

# **Energetisches Potential geschlossener Tunnelgeothermiesysteme**

Von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung,

vorgelegt von

**PATRIK BUHMANN**

aus Aichtal-Neuenhaus

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Westrich  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Dietmar Adam

Tag der mündlichen Prüfung: 15. November 2019

Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart

2019

Mitteilung 73  
des Instituts für Geotechnik  
Universität Stuttgart, Deutschland, 2019

**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann

©Patrik Buhmann  
Institut für Geotechnik  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 35  
70569 Stuttgart

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Autors in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

Schlagworte: Tunnelgeothermie, Wärmetransportmechanismen, Grundwasser, Tunnelklima

Druck: DCC Kästl e.K., Ostfildern-Kemnat, Deutschland, 2020

ISBN : 978-3-921837-73-3  
(D93 - Dissertation, Universität Stuttgart)

## Vorwort des Herausgebers

Mit dem Mitteilungsheft Nr. 73 publiziert das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) die wissenschaftliche Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Patrik Buhmann, der im Rahmen seiner Arbeit einen ganzheitlichen Ansatz zur Ermittlung des energetischen Potentials von thermisch aktivierten Infrastrukturtunneln entwickelt hat und damit die Forschungsaktivitäten des IGS im Bereich der oberflächennahen Geothermie fortführt.

Die oberflächennahe Geothermie leistet mittlerweile einen wesentlichen Beitrag zur Grundlastversorgung mit Wärme- und Kälteenergie. Die thermische Aktivierung von Tunneln ist eine interessante Alternative und ökonomisch sinnvolle Ergänzung der bisherigen Hybridsysteme des Spezialtiefbaus. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal des Tunnelabsorbers gegenüber z.B. aktivierten Pfählen oder Schlitzwandelementen ist die Nutzung von Wärme-strömen aus dem Erdreich als auch aus dem Tunnelinneren.

Zur Abschätzung des energetischen Potentials von thermisch aktivierten Infrastrukturtunneln sind die Wärmetransportmechanismen im Mehrphasenmedium Boden, der Tunnelschale sowie des dort installierten Absorbersystems sowie innerhalb des Tunnel-luftraumes physikalisch zutreffend zu beschreiben. Darüber hinaus sind die Wärme-übergangsmechanismen von der Tunnelschale an den Untergrund sowie an das Tunnelklima zu berücksichtigen. Während für die Abbildung der Wärmetransportvorgänge innerhalb einer Tunnelschale sowie in dem Absorbersystem anerkannte Modellierungsansätze existieren, besteht bezüglich der Tunnel-Aquifer-Interaktion sowie des Übergangs von der Tunnelinnenschale zum Tunnelluftraum noch Forschungsbedarf.

Im Rahmen seiner Arbeit entwickelt Herr Dr. Buhmann Modelle, die es ermöglichen, das Tunnelklima auf der Basis von gemessenen Kraftfahrzeugdichten abzuschätzen und in numerische Berechnungen zu implementieren. Die realitätsnahe Abbildung der Wärmetransportvorgänge innerhalb des Tunnelluftraumes ist für die Abschätzung des energetischen Potentials einer Tunnelgeothermieanlage besonders wichtig, da die Wärmeenergie im Regelfall zu ca. 70 % aus dem Tunnelluftraum extrahiert wird. Wird eine Tunnelgeothermieanlage durch eine Grundwasserströmung beeinflusst, so ist die erzielbare Wärmestromdichte, neben der Grundwassertemperatur und der Filtergeschwindigkeit, maßgeblich von dem Anströmwinkel abhängig. Wie Herr Dr. Buhmann anhand von numerischen Grundsatzuntersuchungen sowie durch die Entwicklung und den Betrieb eines Versuchstandes zur Untersuchung des Wärmeübergangs vom Aquifer zu thermisch aktivierten Flächen zeigt, sind die hydrologischen Verhältnisse im Bereich einer Tunnelgeothermieanlage zu Projektbeginn ausreichend genau und über einen längeren Beobachtungszeitraum zu erheben. Der Betrieb einer Tunnelgeothermieanlage beeinflusst maßgeblich das realisierbare energetische Potential einer solchen Anlage. In diesem Kontext wurden durch Herrn Dr. Buhmann in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart langjährige Versuche im Realmaßstab an der Tunnelgeothermie-

---

Testanlage im Tunnel Stuttgart-Fasanenhof durchgeführt und anschließend in gekoppelte Gebäude-Anlage-Untergrund-Simulationen überführt. Hieraus ist eine Simulationsanwendung entstanden, die sämtliche Wärmetransportvorgänge im Zusammenhang mit einer Tunnelgeothermieanlage abbildet und somit erstmalig eine ganzheitliche energetische Beurteilung eines thermisch aktivierten Infrastrukturtunnels zulässt.

Ein hierauf aufbauendes, web-basiertes Simulationsmodell erlaubt eine einfache, zugleich aber wissenschaftlich abgesicherte Prognose des thermischen Potentials einer Tunnelgeothermieanlage. Ergänzt um auf der Basis von Parameterstudien und Beispielanwendungen abgeleiteten Anwendungsempfehlungen wird damit der Ingenieurpraxis ein effektives Tool zur Verfügung gestellt, um die komplexen Wärmetransportmechanismen zutreffend in der Planung solcher Anlagen zu berücksichtigen.

Die wissenschaftliche Arbeit von Herrn Dr. Buhmann belegt eindrücklich das energetische Potential von thermisch aktivierten Infrastrukturtunneln u.a. zur Klimatisierung von Betriebsräumen, zur Eisfreihaltung von anschließenden Verkehrs- und Betriebsflächen sowie zur nachhaltigen Versorgung benachbarter baulicher Einrichtungen. Die Übertragung dieser Technologie auf Bauwerke der Siedlungswasserwirtschaft (Kanäle) eröffnet, insbesondere im innerstädtischen Bereich, zudem die Möglichkeit einer breiten Anwendung, die das IGS derzeit in weiteren transdisziplinären Forschungsprojekten zur nachhaltigen energetischen Bewirtschaftung von Stadtquartieren intensiv untersucht.

Stuttgart, im November 2019

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner 5-jährigen Zeit am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, in der ich neben meiner Tätigkeit in der Lehre und Projektarbeit meinen Horizont im Bereich der Wärmeübertragung sowie der Gebäudeenergetik erweitern konnte. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit den Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE), der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung der Universität Stuttgart (VEGAS) sowie dem baden-württembergischen Landesforschungszentrum Geothermie hat mir für viele Bereiche meiner Arbeiten wichtige Denkanstöße gegeben, durch die eine ganzheitliche Betrachtung der Wärmetransportvorgänge einer Tunnelgeothermieanlage möglich wurde.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Moormann, dessen Tür zu jeder Tages- und Nachtzeit für fachliche und persönliche Diskussionen offen steht. Seine kritischen Rückfragen trafen meist den Kern einer Fragestellung und halfen mir an so mancher Stelle in die richtige Richtung abzubiegen.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Adam, der an meiner Arbeit als Mitberichter mitgewirkt hat und stets für eine fachliche Diskussion zur Verfügung stand.

Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Westrich, der mich von Beginn meiner Arbeit bis zum letzten Korrekturschliff begleitet hat. Mit seinen Erfahrungen aus den Bereichen Fluidodynamik, Stofftransport und Wärmeübertragung stand Herr Prof. Dr. Westrich für zahlreiche intensive Diskussionen zur Verfügung und hat mir dadurch in vielen Fragestellungen die Augen geöffnet. Ein Doktorand kann sich glücklich schätzen, einen so versierten und interessierten Partner an seiner Seite zu haben.

Neben allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, die mir in vielen Diskussionen wichtige Impulse für meine Arbeit gegeben haben, gilt mein Dank Herrn Crienitz. Die Art und Weise von Herrn Crienitz, wissenschaftliche Zusammenhänge aus allen Bereichen des Bauingenieurwesens und darüber hinaus zu analysieren und zu bewerten, hat meine Arbeit an vielen Stellen positiv beeinflusst.

Ich bedanke mich bei meinen Eltern für ihre Unterstützung während meines gesamten beruflichen Werdegangs. Ohne das Wissen um eine liebe und bedingungslose Unterstützung wäre ich nicht bis an diesen Punkt gekommen.

Liebe Theresia, liebe Lore, ich bedanke mich für eure Unterstützung und eure Bereitschaft, 5 Jahre unserer gemeinsamen Zeit in Stuttgart und Umgebung zu verbringen. Ohne diese Möglichkeit wäre mir meine Arbeit am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart nicht möglich gewesen.

Stuttgart, im November 2019

Patrik Buhmann



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| Abkürzungsverzeichnis . . . . .  | VII       |
| Symbolverzeichnis . . . . .  | VIII      |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2 Tunnelgeothermie - Stand der Technik und der Wissenschaft</b>     | <b>5</b>  |
| 2.1 Verfahrensbeschreibungen . . . . .                                 | 5         |
| 2.1.1 Offene Systeme - Hydrogeothermische Verfahren . . . . .          | 5         |
| 2.1.2 Geschlossene Absorbersysteme . . . . .                           | 7         |
| 2.2 Übersicht bestehender Anlagen und Anlagenkonzepte . . . . .        | 9         |
| 2.2.1 Offene Systeme - Hydrogeothermische Anlagen . . . . .            | 9         |
| 2.2.2 Geschlossene Absorbersysteme . . . . .                           | 13        |
| 2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen und Umweltauswirkungen . . . . .      | 18        |
| <b>3 Motivation und Zielstellung</b>                                   | <b>23</b> |
| <b>4 Wärmetransportmechanismen der Tunnelgeothermie</b>                | <b>27</b> |
| 4.1 Geländeoberfläche . . . . .  | 32        |
| 4.2 Geothermischer Tiefenstrom . . . . .                               | 37        |
| 4.3 Anthropogene Wärmeströme . . . . .                                 | 38        |
| 4.4 Wärmetransport im porösen Medium Boden . . . . .                   | 39        |
| 4.4.1 Wärmeleitung . . . . .   | 42        |
| 4.4.2 Einfluss der Grundwasserströmung . . . . .                       | 43        |
| 4.4.3 Wärmeübergang Tunnelschale/Boden . . . . .                       | 49        |
| 4.4.4 Schlussfolgerungen . . . . .                                     | 52        |
| 4.5 Wärmetransport im Tunnellufttraum . . . . .                        | 53        |
| 4.5.1 Fahrzeugverkehr . . . . .  | 54        |
| 4.5.2 Tunnelluftströmung . . . . .                                     | 59        |
| 4.5.3 Tunnellufttemperatur . . . . .                                   | 62        |
| 4.5.4 Wärmeübergang zur Tunnelschale . . . . .                         | 66        |
| 4.5.5 Tunnelklima in Bahntunneln . . . . .                             | 71        |
| 4.5.6 Schlussfolgerungen . . . . .                                     | 74        |
| 4.6 Wärmetransport im Absorbersystem . . . . .                         | 77        |
| 4.6.1 Betrieb der Tunnelgeothermieanlage . . . . .                     | 79        |
| 4.6.2 Schlussfolgerungen . . . . .                                     | 83        |
| <b>5 Numerische Simulationsmodelle</b>                                 | <b>85</b> |
| 5.1 Finite Elemente Methode und eingesetzte Programmumgebung . . . . . | 85        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.2      | Simulation bestehender Tunnelgeothermieanlagen . . . . .       | 92         |
| 5.2.1    | Tunnel Stuttgart-Fasanenhof . . . . .                          | 92         |
| 5.2.2    | Tunnel Jenbach . . . . .                                       | 105        |
| 5.3      | Entwicklung eines Prognosemodells . . . . .                    | 111        |
| 5.3.1    | Beschreibung Grundmodell - Modell 1 . . . . .                  | 113        |
| 5.3.2    | Modellrandbedingung Grundwasser - Modell 2 . . . . .           | 113        |
| 5.3.3    | Modellrandbedingung Tunnelklima - Modell 3 und 4 . . . . .     | 114        |
| 5.3.4    | Erweiterung 2D zu 3D . . . . .                                 | 117        |
| 5.3.5    | Möglichkeiten einer Online-Plattform . . . . .                 | 119        |
| 5.4      | Variantenuntersuchungen . . . . .                              | 120        |
| 5.4.1    | Parameterstudie . . . . .                                      | 120        |
| 5.4.2    | Transiente Kopplung an eine Gebäudesimulation . . . . .        | 132        |
| 5.4.3    | Nutzung der extrahierten Energie im Tunnelnahbereich . . . . . | 135        |
| 5.4.4    | Empfehlungen für die Praxis . . . . .                          | 141        |
| <b>6</b> | <b>Ausblick</b>  | <b>145</b> |
|          | <b>Literatur</b>   | <b>148</b> |
| <b>A</b> | <b>Anhang zu Kapitel 4.1</b>                                   | <b>161</b> |
| <b>B</b> | <b>Anhang zu Kapitel 4.4.2</b>                                 | <b>165</b> |
| B.1      | Hydrogeologische Situation am Tunnel Jenbach . . . . .         | 165        |
| B.2      | Versuchsstand Wärmeübergang . . . . .                          | 175        |
| <b>C</b> | <b>Anhang zu Kapitel 4.5</b>                                   | <b>185</b> |
| <b>D</b> | <b>Anhang zu Kapitel 4.6</b>                                   | <b>323</b> |
| D.1      | Statischer Gebäudeenergiebedarf . . . . .                      | 323        |
| D.2      | Dynamische Kopplung an ein HLK-System . . . . .                | 326        |
| <b>E</b> | <b>Anhang zu Kapitel 5.3.5</b>                                 | <b>327</b> |

## Abkürzungsverzeichnis

|               |  |
|---------------|--|
| BBergG        | Bundesberggesetz   |
| COMSOL        | COMSOL Multiphysics® Modellierungssoftware                                 |
| FEM           | Finite Elemente Methode  |
| FFT           | Schnelle Fourier-Transformation; englisch: fast Fourier transform          |
| GOK           | Geländeoberkante   |
| GW            | Grundwasser  |
| JAZ           | Jahresarbeitszahl  |
| MATLAB        | LiveLink™ for MATLAB®  |
| PDE           | Partielle Differentialgleichung, (englisch: partial differential equation) |
| SSZ           | Solarspeicherzone  |
| SV            | Schwerverkehr  |
| TGTA          | Tunnelgeothermieanlage   |
| TRNSYS        | TRaNsient SYstems Simulation   |
| UVP           | Umweltverträglichkeitsprüfung  |
| UVP-V Bergbau | Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben   |
| UVPG          | Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung                              |
| WHG           | Wasserhaushaltsgesetz  |

## Symbolverzeichnis

| Symbol      | Einheit     | Beschreibung                               |
|-------------|-------------|--|
| $A$         | $W/m^2$     | Atmosphärische Gegenstrahlung              |
| $A_R$       | $W/m^2$     | Reflektierte atmosphärische Gegenstrahlung |
| $A_T$       | $m^2$       | Tunnelquerschnittsfläche                   |
| $A_{Fahr}$  | $m^2$       | Fahrzeugquerschnittsfläche                 |
| $D_e$       | $m^2/s$     | Charakteristische Porengröße               |
| $E_K$       | $W/m^2$     | Langwellige Ausstrahlung                   |
| $G$         | $W/m^2$     | Globalstrahlung                            |
| $Gr$        | –           | Grashofzahl                                |
| $K$         | $m^2$       | Permeabilität                              |
| $L$         | $m$         | Charakteristische Länge                    |
| $Nu_L$      | –           | Nußeltzahl                                 |
| $P_0$       | $W$         | Betriebsleistung                           |
| $P_{dyn}$   | $W$         | Mechanische Leistung                       |
| $P_{th}$    | $W$         | Thermische Entzugsleistung                 |
| $Pe$        | –           | Pecletzahl                                 |
| $Pr$        | –           | Prandtlzahl                                |
| $R$         | $W/m^2$     | Reflektierte Strahlung                     |
| $R_{Bschl}$ | $kN$        | Beschleunigungswiderstand                  |
| $R_{Fahr}$  | $kN$        | Fahrwiderstand                             |
| $R_{Luft}$  | $kN$        | Luftwiderstand                             |
| $R_{Roll}$  | $kN$        | Rollwiderstand                             |
| $R_{Steig}$ | $kN$        | Steigungswiderstand                        |
| $Ra$        | –           | Rayleighzahl                               |
| $Ra_D$      | –           | Darcy modifizierte Rayleighzahl            |
| $Re_L$      | –           | Reynoldszahl                               |
| $S_r$       | –           | Sättigungsgrad                             |
| $T$         | $s$         | Periodendauer                              |
| $T_B$       | $^{\circ}C$ | Temperatur Tunnelschale                    |

| Symbol           | Einheit       | Beschreibung                                |
|------------------|---------------|---|
| $T_Q$            | $^{\circ}C$   | Temperatur des Quellmodells                 |
| $T_Z$            | $^{\circ}C$   | Temperatur des Zielmodells                  |
| $T_f$            | $K$           | Fluidtemperatur                             |
| $T_m$            | $K$           | Mittlere Fluidtemperatur                    |
| $T_w$            | $K$           | Wandtemperatur                              |
| $T_{TL}$         | $^{\circ}C$   | Tunnellufttemperatur                        |
| $T_{in}$         | $^{\circ}C$   | Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf  |
| $T_{out}$        | $^{\circ}C$   | Austrittstemperatur aus dem Primärkreislauf |
| $\Delta Q_v$     | $J/g$         | Umwandlungswärme                            |
| $\Gamma$         | $K/m$         | Geothermischer Gradient                     |
| $\Theta$         | –             | Proportionalitätsfaktor                     |
| $\alpha$         | $W/m^2$       | Wärmeübergangskoeffizient                   |
| $\alpha^*$       | -             | Absorptionskoeffizient                      |
| $\alpha_{abs}$   | $^{\circ}$    | Streichwinkel Absorber                      |
| $\beta$          | $1/K$         | Räumlicher Ausdehnungskoeffizient           |
| $\beta_{Fahr}$   | $^{\circ}$    | Neigungswinkel Fahrstrecke                  |
| $\beta_{GW}$     | $^{\circ}irc$ | Grundwasseranströmwinkel                    |
| $\delta_{f,t}$   | $m$           | Temperaturgrenzschichtdicke                 |
| $\dot{E}_0$      | $W/m^2$       | Solarkonstante                              |
| $\dot{E}_a$      | $W$           | Absorbierter Energiestrom                   |
| $\dot{E}_e$      | $W$           | Emittierter Energiestrom                    |
| $\dot{Q}$        | $W$           | Wärmestrom                                  |
| $\dot{Q}_{Geo}$  | $W$           | Wärmestrom aus dem Boden                    |
| $\dot{Q}_{KFZ}$  | $W$           | Wärmestrom aus Kfz                          |
| $\dot{Q}_{TL}$   | $W$           | Wärmestrom aus dem Tunnelinneren            |
| $\dot{Q}_{fric}$ | $W$           | Innere Wärmequelle durch Fluidreibung       |
| $\dot{Q}_{wall}$ | $W$           | Wärmetransport durch Rohrwand               |
| $\dot{V}$        | $l/h$         | Volumenstrom                                |
| $\dot{q}$        | $W/m^2$       | Wärmestromdichte                            |
| $\dot{q}_{Geo}$  | $W/m^2$       | Wärmestromdichte aus dem Boden              |

| Symbol                | Einheit        | Beschreibung                                    |
|-----------------------|----------------|---|
| $\dot{q}_{KW}$        | $W/m^2$        | Wärmestromdichte aus kurzwelliger Strahlung     |
| $\dot{q}_{LW}$        | $W/m^2$        | Wärmestromdichte aus langwelliger Strahlung     |
| $\dot{q}_R$           | $W/m^2$        | Wärmestromdichte eingetragen durch Niederschlag |
| $\dot{q}_{TL}$        | $W/m^2$        | Wärmestromdichte aus dem Tunnelinnenraum        |
| $\dot{q}_{kond}$      | $W/m^2$        | Konduktive Wärmestromdichte                     |
| $\dot{q}_{konv}$      | $W/m^2$        | Konvektive Wärmestromdichte                     |
| $\dot{q}_{lat}$       | $W/m^2$        | Wärmestromdichte aus latenter Wärme             |
| $\epsilon^*$          | -              | Emmisionsgrad                                   |
| $\eta$                | $Pa \cdot s$   | Dynamische Viskosität                           |
| $\eta_{Fahr}$         | -              | Motorwirkungsgrad                               |
| $\frac{1}{t_c}$       | $\frac{1}{t}$  | Reziproke Kontaktzeit                           |
| $\gamma_p$            | $kPa/^\circ C$ | Psychrometerkonstante                           |
| $\gamma_{th}$         | $1/K$          | Kubischer thermischer Ausdehnungskoeffizient    |
| $\mu$                 | -              | Reibungsbeiwert                                 |
| $\phi$                | -              | Porosität                                       |
| $\rho^*$              | -              | Reflexionskoeffizient                           |
| $\rho_0$              | -              | Reflektierte Strahlung                          |
| $\rho_d$              | $kg/m^3$       | Trockendichte                                   |
| $\sigma$              | $W/(m^2 K^4)$  | Strahlungskonstante des schwarzen Strahlers     |
| $\tau^*$              | -              | Transmissionkoeffizient                         |
| $\vartheta_{amb,max}$ | $^\circ C$     | Umgebungstemperatur Maximum                     |
| $\vartheta_{amb,m}$   | $^\circ C$     | mittlere Umgebungstemperatur                    |
| $\vartheta_{amb}$     | $^\circ C$     | Umgebungstemperatur                             |
| $\vartheta_{geo}$     | $^\circ C$     | Ungestörte Bodentemperatur                      |
| $\vartheta_{ip}$      | $^\circ C$     | Temperatur des Wassers am Infiltrationspunkt    |
| $c_w$                 | -              | Luftwiderstandsbeiwert                          |
| $d_p$                 | -              | Charakteristische Porengröße                    |
| $d_w$                 | $m$            | Wirksamer Korndurchmesser                       |
| $d_{50}$              | $mm$           | Korndurchmesser bei 50% Siebdurchgang           |
| $d_{hyd}$             | $m$            | hydraulischer Durchmesser                       |

| Symbol     | Einheit    | Beschreibung   |
|------------|------------|--|
| $e_{abs}$  | $cm$       | Schenkelabstand Absorberleitungen                                      |
| $f_D$      | -          | Reibungsfaktor nach Darcy  |
| $i$        | -          | Hydraulischer Gradient   |
| $i_R$      | $mm/h$     | Regenintensität  |
| $k_f$      | $m/s$      | Hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert                                  |
| $l_{TU}$   | $m$        | Tunnellänge  |
| $l_{ip}$   | $m$        | Infiltrationslänge   |
| $m$        | $kg$       | Masse  |
| $n$        | -          | Porenanteil  |
| $p$        | $hPa$      | Umgebungsluftdruck   |
| $p_D$      | $hPa$      | Partialwasserdampfdruck der umgebenden Luft                            |
| $p_S$      | $hPa$      | Wasserdampfsättigungsdruck   |
| $r_a$      | $s/m$      | Aerodynamischer Widerstand der Bodenbedeckung                          |
| $r_s$      | $s/m$      | Oberflächenwiderstand der Bodenbedeckung                               |
| $v_f$      | $m/d$      | Filtergeschwindigkeit  |
| $v_p$      | $m/s$      | Rohrströmungsgeschwindigkeit   |
| $v_{FS}$   | $m/s$      | Fahrzeuginduzierte Strömung  |
| $v_{Fahr}$ | $km/h$     | Fahrzeuggeschwindigkeit  |
| $v_{GS}$   | $m/s$      | Grundströmung im Tunnelluftraum  |
| $v_{TL}$   | $m/s$      | Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit                                     |
| $v_{f,a}$  | $m/d$      | Filtergeschwindigkeit, ab der advektiver Wärmetransport maßgebend wird |
| $x_T$      | $m$        | Abstand Tunnellufttemperaturmessung vom Portal                         |
| $z_Q$      | $m$        | Abstand Auswerteknoten des Quellmodells                                |
| $z_Z$      | $m$        | Abstand Auswerteknoten des Zielmodells                                 |
| $a$        | $m^2/s$    | Temperaturleitfähigkeit  |
| $c_{p,f}$  | $J/(kgK)$  | Spezifische Wärmekapazität des Fluids                                  |
| $c_p$      | $J/(kgK)$  | Spezifische Wärmekapazität   |
| $c_v$      | $J/(m^3K)$ | Volumetrische Wärmekapazität   |
| $d_{pipe}$ | $m$        | Rohrinnendurchmesser   |

| <b>Symbol</b>   | <b>Einheit</b> | <b>Beschreibung</b>                                      |
|-----------------|----------------|--|
| $\lambda_{eff}$ | $W/(mK)$       | Effektive Wärmeleitfähigkeit des Mehrphasenmediums Boden |
| $\lambda_f$     | $W/(mK)$       | Wärmeleitfähigkeit des Fluids                            |
| $\lambda$       | $W/(mK)$       | Wärmeleitfähigkeit                                       |
| $\rho_f$        | $kg/m^3$       | Dichte des Fluids  |
| $w$             | -              | Wassergehalt   |
| $z_{SSZ}$       | $m$            | z-Koordinate der solaren Speicherzone                    |
| $z_{model}$     | $m$            | z-Koordinate des unteren Modellrandes                    |

# Abstract

Despite a continuously improving thermal insulation for residential buildings, the heating energy demand in recent years recorded a steady increase. In urban areas, the cooling energy demand will continue to increase, due to the use of transparent facades on high rising office buildings. Renewable energies such as wind energy and biomass already contribute to a substantial extent to cover the required primary energy, while the proportion of geothermal energy is low.

The reservoir of near-surface geothermal energy up to a depth of 400 meters is mostly tapped by geothermal borehole heat exchangers, whose spatial densification is already reaching their limits, especially within cities. Since the 1980s, the thermal activation of geotechnical construction elements such as piles and diaphragm walls has supplemented the possibilities of energy extraction from the near-surface soil layers, so that the cost-intensive installation of a borehole heat exchanger can be dispensed with. A consistent further development of these systems is the thermal activation of infrastructure tunnels. To date there are 10 plants of this kind worldwide, of which only one plant is in connection with a real use. The geothermal potential of these plants is documented with heat flux densities between 5 - 170  $W/m^2$ . Against this background, the technology of tunnel geothermal energy represents an economically and ecologically interesting supplement in the field of geothermal heat exchangers.

A tunnel geothermal system extracts its heating and cooling energy unlike classical heat exchangers of near-surface geothermal energy not only from the multiphase medium soil, but to a substantial extent from the tunnel air space. In order to quantify the energetic potential of a tunnel geothermal system, in addition to the climatic conditions on the terrain surface, the thermal soil properties and the way of operating of the absorber system, the heat transport processes in the longitudinal direction of the tunnel must be described and considered. Another difference to vertically arranged heat exchangers of near-surface geothermal energy is the influence of advective heat transport in the subsurface on the possible extraction capacity of a tunnel geothermal system. The angle of incidence of the groundwater flow has a non-negligible influence on the resulting heat fluxes.

This work develops models and procedures for describing the relevant heat transfer mechanisms associated with tunnel geothermal energy and transfers them into a closed forecasting model. The basis for this is the evaluation of the measurement data from two completely different tunnel geothermal systems, the analysis of the climate data from 10 road tunnels in Germany as well as the development and operation of a test rig to study the heat transfer from a geothermal absorber to the aquifer. The investigations showed that further research is needed to describe the heat transfer from the tunnel air space to the tunnel shell as well as from the aquifer to the tunnel shell. Using analytical and numerical calculation methods, a web-based simulation model will be developed,

which will enable a simple and, above all, reliable prediction of the thermal potential of a tunnel geothermal system. With the help of this application, parameter studies are carried out to limit significant factors influencing the extractable thermal energy of a tunnel geothermal system. The results of the parameter studies, exemplary calculations of example applications as well as the experiences from different tunnel geothermal projects are transferred into general application recommendations.

# Zusammenfassung

Trotz eines sich immer weiter verbessernden Wärmeschutzes für Wohngebäude verzeichnet der Heizwärmeenergiebedarf in den letzten Jahren einen stetigen Zuwachs. Im Bereich von urbanen Gebieten wird vor allem durch den Einsatz von transparenten Fassaden im Bürogeschossbau der Bedarf an Kühlenergie weiter steigen. Erneuerbare Energien wie Windenergie und Biomasse tragen schon heute zu einem wesentlichen Anteil zur Deckung der benötigten Primärenergie bei, während der Anteil der Geothermie gering ausfällt.

Das Energiereservoir der oberflächennahen Geothermie bis 400 m Tiefe wird zumeist durch Erdwärmesonden erschlossen, deren räumliche Verdichtung besonders innerhalb von Städten bereits an ihre Grenzen stößt. Die thermische Aktivierung von Bauteilen des Spezialtiefbaus, wie Pfähle und Schlitzwände, ergänzt seit den achtziger Jahren die Möglichkeiten der Energieextraktion aus den oberflächennahen Bodenschichten, so dass auf die kostenintensive Herstellung einer Erdwärmesondenbohrung verzichtet werden kann. Eine konsequente Weiterentwicklung dieser Systeme ist die thermische Aktivierung von Infrastrukturtunneln. Weltweit existieren bis dato 10 Anlagen dieser Art, von denen lediglich eine Anlage im Zusammenhang mit einer Realnutzung steht. Das tunnelgeothermische Potential dieser Anlagen ist mit Wärmestromdichten zwischen  $5 - 170 \text{ W/m}^2$  dokumentiert. Vor diesem Hintergrund stellt die Technologie der Tunnelgeothermie eine ökonomisch und ökologisch interessante Ergänzung im Bereich der geothermischen Wärmeübertrager dar.

Eine Tunnelgeothermieanlage extrahiert ihre Wärme- bzw. Kälteenergie anders als klassische Wärmeübertrager der oberflächennahen Geothermie nicht nur aus dem Mehrphasenmedium Boden, sondern zu einem wesentlichen Teil aus dem Tunnellufttraum. Zur Quantifizierung des energetischen Potentials einer Tunnelgeothermieanlage sind neben den klimatischen Verhältnissen an der Geländeoberfläche, den thermischen Untergrundeigenschaften und dem Betrieb der Absorberanlage folglich die Wärmetransportprozesse in Längsrichtung des Tunnels zu beschreiben und entsprechend zu berücksichtigen. Ein weiterer Unterschied zu vertikal angeordneten Wärmeübertragern der oberflächennahen Geothermie besteht im Einfluss des advektiven Wärmetransports im Untergrund auf die mögliche Entzugsleistung einer Tunnelgeothermieanlage. Wird eine Tunnelgeothermieanlage unter unterschiedlichen Winkeln gegen die Horizontale angeströmt, hat dies einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die resultierenden Wärmeströme.

Diese Arbeit entwickelt Modelle und Verfahren zur Beschreibung der maßgeblichen Wärmetransport- und Wärmeübergangsmechanismen im Zusammenhang mit der Tunnelgeothermie und überführt diese in ein geschlossenes Prognosemodell. Die Basis hierfür bilden die Auswertung von Messdaten von zwei gänzlich unterschiedlichen Tunnelgeothermieanlagen, die Analyse von Klimadaten aus 10 deutschen Straßentunneln

sowie die Entwicklung und der Betrieb eines Versuchsstandes zur Untersuchung des Wärmeübergangs von einem Geothermieabsorber zum durchströmten Aquifer. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass zur Beschreibung des Wärmeübergangs vom Tunnel-luftraum zur Tunnelschale wie auch vom Aquifer zur Tunnelschale weiterer Forschungsbedarf besteht. Unter der Verwendung von analytischen und numerischen Berechnungsmethoden wird ein web-basiertes Simulationsmodell entwickelt, mit dem eine einfache und vor allem abgesicherte Prognose des thermischen Potentials einer Tunnelgeothermieanlage möglich wird. Mit Hilfe dieser Anwendung werden Parameterstudien zur Eingrenzung maßgeblicher Einflussfaktoren auf die extrahierbare thermische Energie einer Anlage durchgeführt. Die Ergebnisse der Parameterstudien, exemplarischer Berechnungen von Beispielanwendungen sowie die Erfahrungen aus unterschiedlichen Tunnelgeothermieprojekten werden in allgemeine Anwendungsempfehlungen überführt.

# Kapitel 1

## Einleitung

Rund 32 % des primären Energieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland entfällt auf die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser in Gebäuden, was einem Anteil von 40 % aller CO<sub>2</sub>-Emissionen entspricht. Im Jahr 2017 haben die deutschen Haushalte 1,5 % mehr Energie verbraucht als im Jahr zuvor [114]. Ist der Energieverbrauch im Privatsektor in den Jahren 2000 bis 2014 deutlich zurückgegangen, so hat er 2014 wieder stetig zugenommen. Der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch lag im Jahr 2017 bei 13,1 %, das entspricht einem Zuwachs von 6 % gegenüber dem Jahr 2016 [4]. Innerhalb der erneuerbaren Energien deckt die Geothermie mit ca. 3% einen geringen Anteil (vgl. Abb. 1.1) am Gesamtenergieverbrauch ab. Vor dem Hintergrund, dass die Geothermie einen für menschliche Dimensionen unerschöpflichen Energievorrat besitzt, sollte dieser Anteil weiter ausgebaut werden.

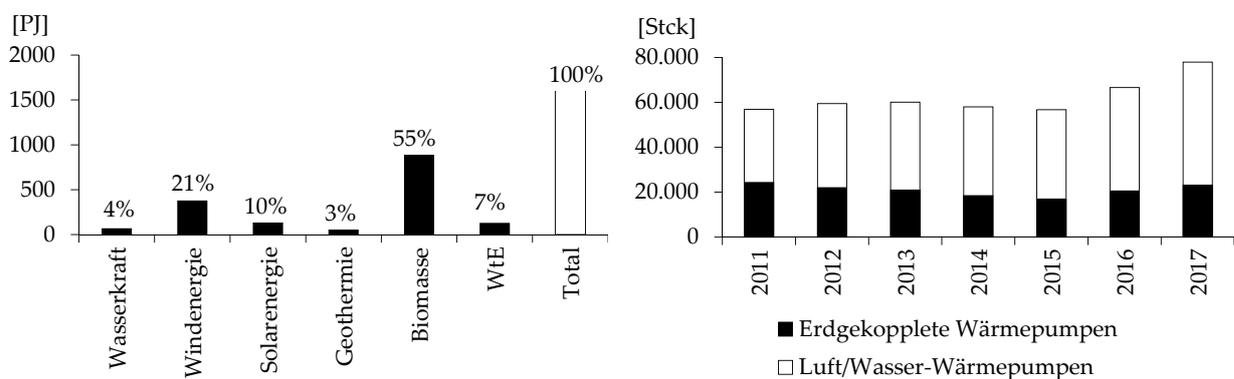


Abbildung 1.1: links: Verteilung des Primärenergieverbrauchs Deutschlands innerhalb der Gruppe der erneuerbaren Energien, WtE = Waste to energy (Abfallverbrennung), Stand: 2017 [4], rechts: Absatzzahlen Wärmepumpen in Deutschland [29]

Oberflächennahe Systeme erschließen die in den oberen Schichten des Untergrundes gespeicherte Wärme solaren Ursprungs, welche in erster Linie über solare Strahlung und Regen- sowie Grundwasser zugeführt wird. Hierbei stellen Erdwärmesondenanlagen die häufigste Nutzungsart der oberflächennahen Geothermie dar. Diese Technologie erfuhr während der Ölkrise in den 1980er-Jahren eine erste Hochphase, die allerdings bereits nach kurzer Zeit wieder beendet war [105]. Bis Mitte der 1990er-Jahre konnten nur geringe Verkaufszahlen festgestellt werden. Eine zweite Hochphase stellte sich in den Jahren 2007 - 2010 während der ersten russischen Gaskrise ein, doch auch diese

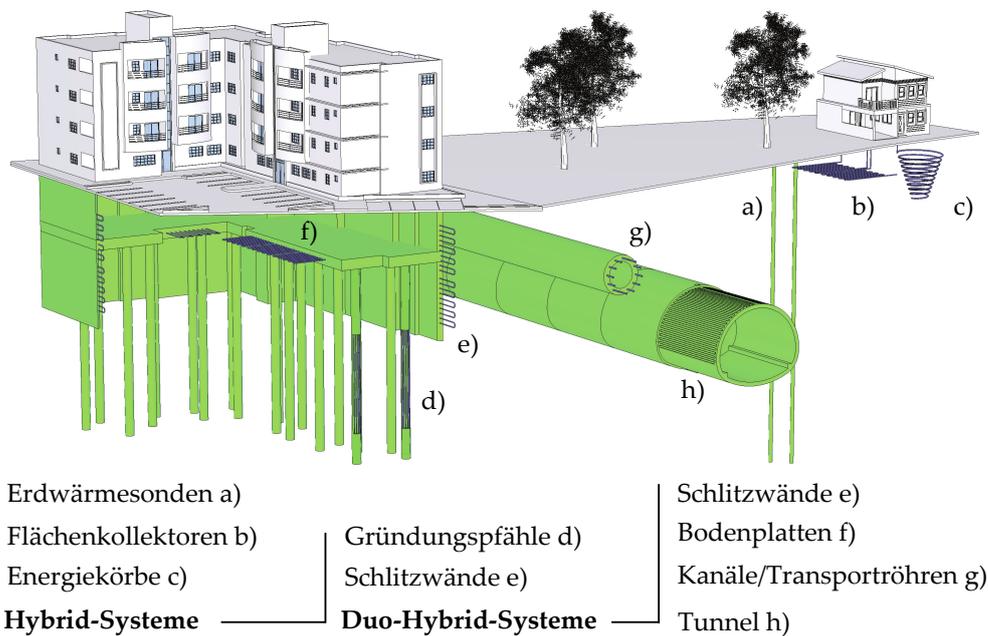


Abbildung 1.2: Systeme der oberflächennahen Geothermie (< 400 m unter Geländeoberkante (GOK)) und Einordnung der TGTA

hielt nur vier Jahre an. Bis zum Jahr 2015 waren die Absatzzahlen von Erdwärmesonden stetig rückläufig und zeigen ersten seit 2016 einen leicht ansteigenden Trend [29]. Ein Grund für die großen Absatzzahlschwankungen bei Erdwärmesonden kann in den hohen Investitionskosten gesehen werden, die ggf. lange Amortisationszeiträume zur Folge haben [41]. Vor diesem Hintergrund stellt die thermische Aktivierung von Bauteilen des klassischen Spezialtiefbaus wie Gründungspfählen oder Schlitzwandelementen (sogenannte Hybrid-Systeme), eine wirtschaftlich interessante Alternative zur bekannten Erdwärmesondentechnologie dar. Bereits seit Beginn der achtziger Jahre werden zur Versorgung von Bauwerken des üblichen Hochbaus mit Wärme- bzw. Kälteenergie Bauteile des schweren Spezialtiefbaus geothermisch aktiviert [22][67], so dass diese Verfahren bereits dem Stand der Technik zugeordnet werden können.

Eine konsequente Weiterentwicklung dieser Technologie stellt die Ausrüstung von Tunnelschalen mit durchströmten Kunststoffrohrleitungen dar, die zusammen mit der Tunnelschale den sogenannten Primärkreislauf einer Tunnelgeothermieanlage (TGTA) bilden. Diese haben gegenüber klassischen Erdwärmesonden oder Hybrid-Systemen den Vorteil, dass sie über einen hohen Anteil an erdberührter Fläche verfügen und Wärmeströme nicht nur mit dem umgebenden Erdreich austauschen, sondern auch aus dem Tunnelklima Wärmeenergie im Sinne einer Luft-Wasser-Wärmepumpe extrahieren. Dies ordnet die Tunnelgeothermie in die Gruppe der Duo-Hybrid-Systeme ein (vgl. Abb. 1.2). Duo-Hybrid-Systeme sind statisch tragende Strukturen im Untergrund, die zum einen thermisch aktiviert sind und darüber hinaus Wärmeströme sowohl aus dem Erdreich, als auch aus dem Inneren des Bauteils aktivieren.

---

Einen weiteren wesentlichen Unterschied zwischen einem thermisch aktivierten Tunnel und klassischen Geothermieabsorbern stellt die Ausrichtung des Bauteils gegenüber einer vorhandenen Grundwasserströmung dar. Während bei Erdwärmesonden oder thermisch aktivierten Pfählen die Strömungsrichtung des Grundwassers vernachlässigt werden kann, hat der Winkel unter dem das Grundwasser eine thermisch aktivierte Schlitzwand oder eine TGTA anströmt, einen entscheidenden Einfluss auf die extrahierbaren Wärmeströme.

Mit den TGTA Stuttgart-Fasanenhof in Deutschland und Jenbach in Österreich existieren zwei tunnelgeothermische Pilotanlagen, die hinsichtlich ihrer Herstellung, der anstehenden Untergrundverhältnisse sowie dem Betrieb nicht unterschiedlicher sein könnten. Diese Anlagen bilden die Grundlage zum Verständnis der Tunnelklima/Tunnel/Boden-Interaktion und dienen im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Entwicklung von Modellen zur ganzheitlichen Beschreibung des geothermischen Potentials einer TGTA.



# Kapitel 2

## Tunnelgeothermie - Stand der Technik und der Wissenschaft

### 2.1 Verfahrensbeschreibungen

Es existieren im Wesentlichen zwei unterschiedliche Nutzungsformen der Tunnelgeothermie: „Offene Systeme“ - Hydrothermale Direktnutzung von warmen Gebirgswässern (überwiegend in der Schweiz) und „Geschlossene Systeme“ - Absorberleitungen, die in die Betontragschale des Tunnels integriert sind. Im Folgenden werden zunächst diese Verfahrenstechniken sowie bestehende Anlagen vorgestellt. Am Ende dieses Kapitels erfolgt eine Zusammenstellung der rechtlichen Rahmenbedingungen mit Blick auf die Genehmigungsfähigkeit einer TGTA.

#### 2.1.1 Offene Systeme - Hydrogeothermische Verfahren

Unter „Hydrogeothermischen Verfahren“ wird die direkte Nutzung der Energie aus Grund- bzw. Schichtwasser verstanden. Ursprünglich gehen die hydrogeothermischen Verfahren auf die Nutzung von Thermalwässern zurück, die Wasser aus tiefliegenden Grundwasserleitern über Förder- und Schluckbrunnen (Primärkreislauf), an einen Wärmepumpenkreislauf übergeben [25]. Der Umstand, dass bei alpinen Tunnelbauwerken das anfallende Tunneldrainagewasser vor der Einleitung in die Vorflut auf ein geringeres, für die Vorflut verträgliches Temperaturniveau zu bringen ist [113], hat zu der Entwicklung von Anlagen zur direkten thermischen Nutzung des Tunneldrainagewassers geführt.

Der nutzbare Wärmestrom  $\dot{Q}$  des an den Tunnelportalen austretenden Drainagewassers steht im thermischen Gleichgewicht mit dem geothermischen Wärmestrom  $\dot{Q}_{Geo}$  sowie dem Wärmeeintrag aus dem Tunnelinneren  $\dot{Q}_{TL}$  (vgl. Abb. 2.1) und ermittelt sich nach Gleichung 2.1. Hierin bezeichnet  $\rho_f$  die Dichte und  $c_{p,f}$  die spezifische Wärmekapazität des Tunneldrainagewassers sowie  $\dot{V}$  die Drainagewasserabstrommenge.  $\Delta T$  beschreibt den wärmestromtreibenden Temperaturgradienten zwischen der Drainagewasseraustrittstemperatur und der Wiedereinleittemperatur nach erfolgter Energieextraktion.

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho_f \cdot c_{p,f} \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Die Drainagewassertemperatur spiegelt im Wesentlichen die Gesteinstemperatur wider und unterliegt zahlreichen Einflussfaktoren, wie der Tunnelüberdeckung, der Topo-

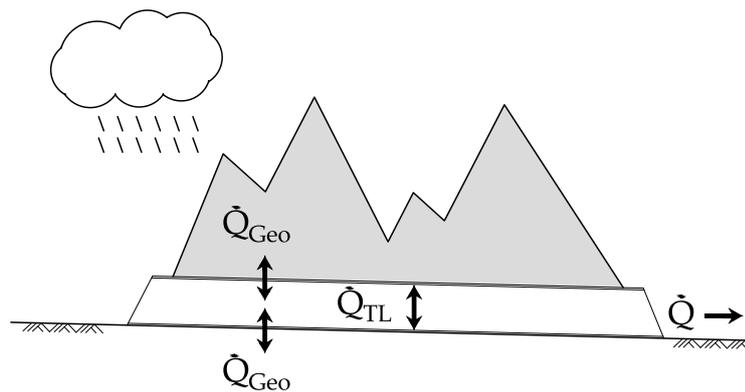


Abbildung 2.1: Hydrogeothermische Verfahren – Prinzipskizze verändert nach [88]

graphie, der anisotropen Gesteinswärmeleitfähigkeit und den hydrogeologischen Randbedingungen [103]. Bei tiefliegenden Tunneln werden aufgrund des geothermischen Gradienten Drainagewassertemperaturen von  $40$  bis  $50^\circ\text{C}$  erreicht [103]. Entscheidend für den extrahierbaren Wärmestrom  $\dot{Q}$  ist die realisierbare Temperaturspreizung  $\Delta T$ . Als minimal zulässige Einleittemperatur in die Vorflut wird in [124] ein Richtwert von  $5^\circ\text{C}$  genannt. Wird zur Auskopplung der Wärmeenergie eine Wärmepumpe eingesetzt, limitiert die maximale Temperaturspreizung der eingesetzten Anlagentechnik, diese liegt im Regelfall bei  $4\text{K}$  auf der Verdampferseite, die extrahierbare Wärmeenergie. Neben der Drainagewassertemperatur hat die zur Verfügung stehende Drainagewasserabstrommenge  $\dot{V}$  einen entscheidenden Anteil an der extrahierbaren Wärmeenergie. Der das hydraulische Potential bestimmende Bergwasserspiegel ist aufgrund der lateral stark variierenden Höhenlage meist nur schwer hinreichend genau zu bestimmen [31]. Ähnlich verhält es sich mit der hydraulischen Leitfähigkeit  $k_f$  des anstehenden Gesteins. Während für einen intakten Fels  $k_f$ -Werte zwischen  $1 \cdot 10^{-8} < k_f < 1 \cdot 10^{-10}\text{m/s}$  abgeschätzt werden können, beeinflussen im Wesentlichen schwer lokalisierbare Störzonen mit deutlich hohen  $k_f$ -Werten den Volumenstrom des Tunneldrainagewassers. So zeigen Messungen der Tunneldrainagewasserschüttungsmengen an unterschiedlichen Tunneln sehr unterschiedliche Charakteristiken [25], die aufgrund der anstehenden hydrogeologischen und klimatischen Verhältnisse nicht zweifelsfrei zu erklären sind.

Bei der Planung von hydrogeothermischen Anlagen ist neben der energetischen Effizienz die physikalisch-chemische Eignung des Tunneldrainagewassers zu bewerten. Bei der direkten Wassernutzung erfährt das Wasser Druck- und Temperaturänderungen. Hierdurch kann es physikochemisch verändert und mikrobiologisch beeinflusst werden. Je nach geplanter thermischer Nutzung des Tunneldrainagewassers sind die zu berücksichtigenden Anforderungen an die Eigenschaften des Tunneldrainagewassers unterschiedlich. Bei der Beurteilung des Drainagewasserchemismus sind die Normen DIN 50930-6, DIN 4030-1, beim Einsatz einer Wärmepumpe, die Angaben der Hersteller sowie im Fall von Verunreinigungen die entsprechenden Einleitgrenzwerte der Länder und des Bundes zu berücksichtigen. Darüber hinaus liefert das Arbeitsblatt 130 des DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V.) „Brunnenregenerierung“ weiterführende Hinweise zu den Ursachen von potentiellen Störeinflüssen beim

Betrieb von Brunnenanlagen. Die thermische Nutzung des Tunneldrainagewassers kann aufgrund des z.T. hohen Temperaturniveaus direkt, d.h. ohne die Einkopplung einer Wärmepumpe oder indirekt durch einen nachgeschalteten Temperaturhub erfolgen. Von den bestehenden Anlagen ist die Nutzung des Tunneldrainagewassers zur Klimatisierung von Wohn- und Betriebsgebäuden sowie zum Betrieb einer Fischzucht bekannt. In [87] wurden potentielle Nutzungsmöglichkeiten der extrahierten Energie untersucht. Hierbei zeigte sich, dass vor allem Nutzungen im Nahbereich des Tunnelportals prädestiniert sind. Hierzu zählen die Klimatisierung von tunneleigenen Betriebsräumen sowie die Eis- und Schneefreihaltung von Betriebsflächen.

### 2.1.2 Geschlossene Absorbersysteme

Geschlossene Absorbersysteme in der Tunnelgeothermie extrahieren Wärmeenergie mittels einem Wärmeübertrager, der zusammen aus der Tunnelschale und den Absorberrohrleitungen gebildet wird. Je nach Art des Tunnelvortriebs werden die Rohrleitungen hierzu entweder zwischen der Tunnelaußenschale und der Tunnelinnenschale (bergmännisch vorgetriebene Tunnel) oder direkt in die vorgefertigten Tunneltübbinge (maschinell vorgetriebene Tunnel) integriert. Darüber hinaus ist die Anordnung der Rohrleitungen innenseitig auf einer bestehenden Tunnelschale dokumentiert [75]. Als Rohrleitungsmaterialien werden in den bekannten TGTAn handelsübliches hochdruckvernetztes Polyethylen bzw. aluminiumverstärkte Verbundmaterialien eingesetzt. Die Befestigung der Rohrleitungen im klassischen Tunnelvortrieb erfolgt auf unterschiedlichen Trägermedien wie z.B. Rasterschienen [109], auf einem Geovlies [79] oder auf Betonstabstahlmatten [23]. Für die thermische Aktivierung von Tunneltübbingen existieren 2 Patente [10][48], darüber hinaus kommen weitere Einzelentwicklungen [90] zur Anwendung. Die Rohrleitungen werden in unterschiedlichen Verlegemustern (schlangenförmig, spiralförmig, gemischt) entsprechend den Kriterien angeordnet, die z.B. auch für Fußbodenheizungen gelten [72]. Durch die Rohrleitungen zirkuliert eine Absorberflüssigkeit, die zumeist aus einem Wasser-Glykol-Gemisch besteht. Hierdurch wird gewährleistet, dass es auch bei Vorlauftemperaturen unterhalb der Frostgrenze für Wasser bei atmosphärischem Druck nicht zum Einfrieren der Absorberrohrleitungen kommt. Die am Markt erhältlichen Glykole enthalten Korrosionsinhibitoren, um Stahlteile in der Anlage zu schützen. Hieraus resultiert ein Mindestanteil an Glykol in der Gesamtmischung von ca. 20%. Mit zunehmendem Glykolanteil steigt die kinematische Viskosität, während die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität abnehmen. Vor diesem Hintergrund ist ein möglichst geringer Anteil Glykol an der Gesamtmischung anzustreben. In den bekannten TGTAn wurden einzelne Absorberteilkreisläufe zu größeren Einheiten zusammengefasst oder direkt an zentrale Verbindungsleitungen angeschlossen. Diese Verbindungsleitungen werden zur Reduktion des Druckverlustes mit entsprechend großen Querschnitten ausgebildet und zumeist im Bereich der Tunnelsohle bzw. in den Tunnelbanketten angeordnet. Die Lage und Konstruktion eines Übergabepunktes zwischen der „Technischen Baugrundausrüstung“ (TBA) und der „Technischen Gebäudeausrüstung“ (TGA) ist im Zuge der Planung einer TGTa zum derzeitigen Stand oftmals eine ungeklärte Fragestellung.

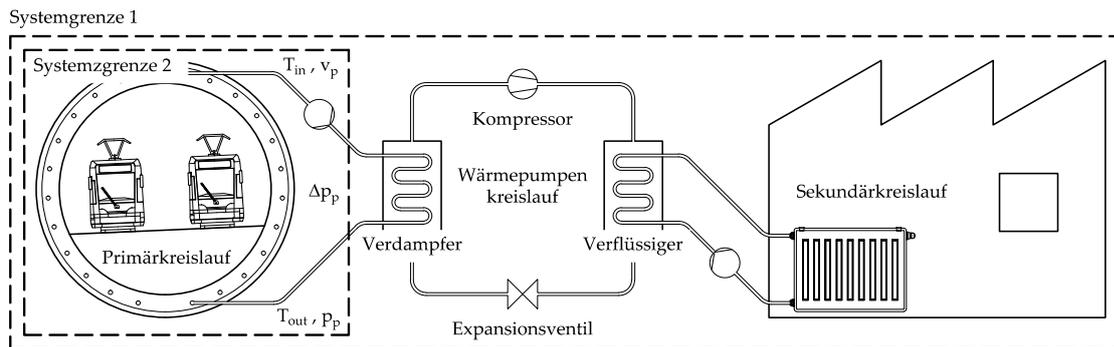


Abbildung 2.2: Schemaskizze einer Gesamtanlage bestehend aus Primär- und Sekundärkreislauf, sowie einem zwischengeschalteten Wärmepumpenkreislauf

Das Temperaturniveau einer TGTA liegt für die meisten Anwendungen unterhalb des für den Sekundärkreislauf erforderlichen Bereiches, so dass ein Temperaturhub durch eine Wärmepumpe erfolgen muss. Die Abbildung 2.2 zeigt die Prinzipskizze einer vollständigen Anlage zur Wärme- bzw. Kälteversorgung eines Gebäudes.

Eine TGTA bildet in dieser Anordnung den sogenannten Primärkreislauf, während der Endenergieverbraucher, die Gebäudeseite, den Sekundärkreislauf darstellt. Der Wärmepumpenkreislauf dient als Verbindungsglied dieser beiden Kreisläufe. Die thermische Effizienz einer geothermischen Anlage wird durch die sogenannte Jahresarbeitszahl (JAZ) ausgedrückt (vgl. Gleichung 2.2).

$$JAZ = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{el} dt} \quad (2.2)$$

Bezieht man  $P_{el}$  auf die eingesetzte primäre Energieform, erfolgt durch die Angabe der JAZ eine energetische Gesamtbilanzierung des Systems bestehend aus den in Abbildung 2.2 gezeigten 3 Teilkreisläufen (Systemgrenze 1). Diese Art der Bilanzierung lässt eine geschlossene energetische Bewertung der eingesetzten TGTA zu. Allerdings ist hierzu eine genaue Kenntnis der einzusetzenden Wärmepumpentechnik sowie des Sekundärkreislaufs erforderlich. Die Abbildung des Gesamtsystems innerhalb einer Simulation wird dementsprechend aufwändig und rechenintensiv. Einfacher ist, besonders in der Planungsphase einer TGTA, sich auf die Teilbilanzierung des Primärkreislaufes (Systemgrenze 2) zu beschränken. Bei dieser Art der Bilanzierung kann man nicht mehr von einer JAZ sprechen, sondern von einer thermischen Entzugsleistung  $P_{th}$  bezogen auf eine erforderliche Pumpenergie  $P_{el}$ . Sie beschreibt die thermische Energie, die über den Zeitraum  $\Delta t$  unter einem gewählten Lastprofil an der TGTA abgerufen werden kann und setzt diese ins Verhältnis zur aufgewendeten Pumpenergie. Diese Art der Bilanzierung ist nur für dreidimensionale Berechnungen möglich, bei denen die Absorberrohrleitungen entsprechend diskretisiert werden. Neben den genannten Möglichkeiten der Bilanzierung einer TGTA kann auch die Bestimmung der thermischen Entzugsleistung (geothermisches Potential) erfolgen. Hierzu genügt die ebene Abbildung der TGTA als zweidimensionale Berechnungsdomain (vgl. Kapitel 5).

Tabelle 2.1: Übersicht über hydrogeothermische TGTAn, Stand: April 2018, \*prognostizierter Wert, \*\*keine Angabe darüber, ob Spitzenleistung oder jährliches Mittel

| Tunnel                         | Land        | Länge<br>[km] | Überdeckung<br>i.M.<br>[m] | thermische<br>Leistung<br>Heizen/Kühlen<br>[kW <sub>th</sub> ] |
|--------------------------------|-------------|---------------|----------------------------|--|
| Straßentunnel<br>St. Gotthard  | Schweiz     | 16,9          | 330                        | **720  |
| Furkatunnel                    | Schweiz     | 15,0          | 930                        | **1372   |
| Rickentunnel                   | Schweiz     | 8,6           | k.A.                       | **156  |
| Mappo-<br>Morettina-<br>Tunnel | Schweiz     | -             | -                          | -  |
| Hauenstein-<br>Basistunnel     | Schweiz     | 8,1           | 350                        | k.A.   |
| Lötschberg-<br>Basistunnel     | Schweiz     | 34,6          | 750                        | k.A.   |
| Grenztunnel<br>Füssen          | Deutschland | 1,2           | 80                         | 152*/438*  |
| Tunnel<br>Rennsteig            | Deutschland | 7,9           | 100                        | 147*/589*  |

## 2.2 Übersicht bestehender Anlagen und Anlagenkonzepte

### 2.2.1 Offene Systeme - Hydrogeothermische Anlagen

Die in der Literatur dokumentierten hydrogeothermischen TGTAn befinden sich ausnahmslos in der Schweiz (vgl. Tabelle 2.1). Die hydrogeologischen und morphologischen Verhältnisse bilden hier die Grundlage für hohe Drainagewassertemperaturen und damit eine hohe thermische Effizienz. In [21] wurde erstmals das geothermische Potential an deutschen Straßentunneln untersucht, derzeit befindet sich am Rennsteigtunnel (Thüringen) eine TGTA in der Umsetzung. Eine weitere Pilotanlage am Tunnel Füssen (Bayern) soll voraussichtlich 2019 folgen.

**Straßentunnel St. Gotthard, Schweiz** Die thermische Tunneldrainagewassernutzung am Straßentunnel St. Gotthard wird in der Literatur als die älteste bekannte tunnelhydrogeothermische Anlage beschrieben [103] (Inbetriebnahme 1979). Der Straßentunnel St. Gotthard ist mit 16,9 Kilometern Länge der längste Straßentunnel in den Alpen und wurde 1980 für den Verkehr freigegeben. Der Tunnel verbindet Göschenen im Kanton Uri mit dem Ort Airolo im Kanton Tessin. Der Straßentunnel St. Gotthard durchfährt zunächst eine kurze Lockergesteinszone gefolgt von den Schichten des Aargranits. Es folgen Gneise sowie Schichten des Permocarbon und Sericit Schiefer, bevor der Tun-

nel in die Granite und Paragneise des Aarmassivs abtaucht und nach der Durchfahrt von Schieferschichten bei Airolo austritt. Die maximale Überdeckung des Tunnels beträgt ca. 1000 m. In Airolo befindet sich am Südportal des Tunnels das Betriebsgebäude des Gotthard-Straßentunnels, wo das Tunneldrainagewasser zu Heiz- und Kühlzwecken thermisch genutzt wird. Die Schüttung am Südportal beträgt ca. 112 l/s und hat eine mittlere Austrittstemperatur von 17 °C [112]. Mit diesem geothermischen Potential wird über den Betrieb von 4 Wärmepumpen eine thermische Leistung von 720 kW<sub>th</sub> [101] zur Verfügung gestellt.

**Furkatunnel, Schweiz** Der Furkatunnel ist ein ca. 15 km langer Eisenbahntunnel, der die Orte Oberwald im Kanton Wallis und Realp im Kanton Uri miteinander verbindet. Er durchfährt von Westen nach Norden zunächst Sedimentgesteine des Permokarbon (Chlotit-Serizitphyllite) und taucht dann in das kristalline Gotthardmassiv bestehend aus Paragneisen, Orthogneisen, Rotondo-Granit sowie die Tälligrat-Gneis-Serie ein. Im Anschluss daran wird erneut die nördliche Paragneiszone des Gotthardmassivs durchfahren. Die maximale Überdeckung des Furkatunnels beträgt ca. 1600 m. Am Westportal treten Drainagewasserschüttungen von ca. 90 l/s und einer mittleren Temperatur von [102] 16 °C aus, die seit 1991 thermisch genutzt werden. Das Drainagewasser wird durch eine ca. 1 km lange Rohrleitung einem kalten Nahwärmenetz zugeführt, das 209 Wohnungen, 1 Hotel, das Schulhaus, das Feuerwehrlokal, das Bahnhofsbuffet sowie die Remise der Matterhorn Gotthard Bahn mit Wärmeenergie versorgt [128] (Stand Ende 2014). Die installierte thermische Gesamtleistung erreicht 1372 kW<sub>th</sub>.

**Rickentunnel, Schweiz** Der Rickentunnel ist ein 8,6 km langer Bahntunnel, der zur wichtigen Ostschweizer Eisenbahnverbindung St. Gallen - Rapperswil gehört. Der Rickentunnel durchfährt die untere Süßwassermolasse (Tertiär), die aus weichen Sandsteinbänken (granitische Molasse) im Wechsel mit harten und weichen graubraunen Mergeln besteht. Unmittelbar am Rand des Dorfes Kaltbrunn liegt das Südportal des Rickentunnels, aus dem das Drainagewasser mit ca. 11 l/s und einer Temperatur von 12,3 °C austritt. Seit 1998 wird an dieser Stelle thermische Energie in einer Höhe von 156 kW<sub>th</sub> zunächst zur Beheizung einer Mehrzweckhalle, später dann darüber hinaus zur Klimatisierung einer Zivilschutzhalle sowie eines Kindergartens durch zwei alternierend arbeitende Wärmepumpen ausgekoppelt. Hierzu wird das Tunneldrainagewasser bis minimal 4 °C abgekühlt und nach der thermischen Behandlung der Vorflut zugeführt. In [34] wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie der Chemismus des Tunneldrainagewassers untersucht. Hierbei fiel ein niedriger Wert an freiem CO<sub>2</sub> auf, der zur Installation einer Dosieranlage zur Stabilisation des Wassers führte. In dieser Anlage wird durch die Zugabe von Komplexbildnern (z.B. Nitrilo-Tri-Acetat oder Polyphosphate) Kalk gebunden und durch die Zugabe von Säure ein Härtegleichgewicht eingestellt. Für die Anlage wurde ein intensives Monitoring aufgesetzt, das die Beurteilung der energetischen Effizienz erlaubt. Aus dem Messzeitraum 1998 - 2000 ergibt sich für die TGTA am Rickentunnel eine mittlere JAZ von ca. 3,26 [34].

**Mappo-Morettina-Tunnel, Schweiz** Der Mappo-Morettina-Tunnel ist ein 5,5 km langer Straßentunnel auf der A13 im Schweizer Kanton Tessin. Der Tunnel wurde im maschinellen Tunnelvortrieb durch vorwiegend metamorphisches Gestein vorgetrieben. Weitere Angaben über die geologischen bzw. hydrogeologischen Verhältnisse des Tunnels liegen nicht vor. Das an diesem Tunnel anfallende Tunneldrainagewasser besitzt eine Schüttungsmenge von ca. 16 l/s bei einer Temperatur von ca. 16 °C [101]. Über die Anlage wird am Nordportal des Tunnels der Wärmebedarf eines Sport- und Freizeitzentrums gedeckt. In den Jahren 2000 - 2001 lag die JAZ bei ca. 4.

**Hauenstein-Basistunnel, Schweiz** Der Hauenstein-Basistunnel ist ein 8,1 km langer Bahntunnel und eine der meistbefahrenen Eisenbahnstrecken der Schweiz. Der in Nord-Südrichtung verlaufende Tunnel verbindet Tecknau im Kanton Basel-Landschaft mit Trimbach im Kanton Solothurn. Der Hauensteintunnel durchfährt bei Tecknau zunächst den Tafeljura, dem die geologischen Formationen Trias (Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper), die Juraformation (Schwarzer Jura oder Lias, brauner Jura oder Dogger, weißer Jura oder Malm) sowie die Tertiärformation angehören. Dem Tafeljura folgt der Kettenjura. Die Serie der Sedimentgesteine liegt auf einem Sockel von gefaltetem Gneis oder Granit, dem sogenannten Grundgebirge. Die maximale Überdeckung des Tunnels beträgt ca. 750 m. Die Drainagewasserschüttung am Südportal beträgt ca. 42 l/s bei einer Austrittstemperatur von im Mittel 19 °C [103]. Die Tunnelgeothermieanlage wurde 1999 in Betrieb genommen und beliefert seitdem 4 Mehrfamilienhäuser mittels einer bivalenten Wärmepumpe mit Wärmeenergie. Als Ergänzung zur Wärmepumpe stehen zwei Ölkessel mit 129 kW<sub>th</sub> und 820 kW<sub>th</sub> Leistung zur Verfügung. Die zentral in einer Tiefgarage situierte Wärmepumpe trägt lediglich zur Deckung von 60% des erforderlichen Wärmebedarfs mit einer mittleren JAZ von 3,0 bei. Der Grund hierfür liegt in den z.T. hohen Absoluttemperaturen der Sekundärkreisläufe, die aufgrund alter Radiatorentechnologie bei 70 °C liegen [84]. Problematisch an der TGTA Hauenstein-Basistunnel sind die physikalischen Eigenschaften des Tunneldrainagewassers. Im Drainagewasser finden sich Verschmutzungen in Form von groben Teilen wie Gummiresten oder Mäusen aber auch feinen Schwebstoffen wie Bremsstaub, Schienenabrieb usw. die eine Verunreinigung der Filter verursachen und damit zu häufigem Stillstand der Anlage führen. Die Betriebserfahrung zeigt, dass alle 2 Tage ein Reinigungsvorgang von ca. 1 Std. notwendig ist [84].

**Großer-St.-Bernhard-Tunnel, Schweiz/Italien** Der Große-St.-Bernhard-Tunnel ist ein 5,8 km langer Straßentunnel, der Martigny im Schweizer Kanton Wallis mit dem italienischen Aosta verbindet. Am 19. März 1964 wurde er als erster Straßentunnel der die Alpen durchquert in Betrieb genommen. Die Energieextraktion am Großen-St.-Bernhard-Tunnel erfolgt nicht wie bei den anderen in diesem Kapitel beschriebenen Tunneln durch eine Wärmeauskopplung aus dem Tunneldrainagewasser, sondern durch die Nutzung der Tunnelluft in Luft-Wasser-Wärmepumpentechnik. Hierzu wird die Tunnelluft in einer Entfernung von 1500 m vom Tunnelportal Nord in der Kalotte entnommen. Nach der erfolgten Energieextraktion durch eine Wärmepumpe wird die abgekühlte Luft zurück in den Tunnel geführt.

**Lötschberg-Basistunnel, Schweiz** Der Lötschberg-Basistunnel ist ein 34,6 km langer Bahntunnel, der das Berner Oberland mit dem Wallis verbindet. Der Tunnel durchfährt von Nord nach Süd zunächst Schiefer und Sandsteine der Taveyannaz-Serie, verläuft im Bereich der Basis Wilhorn-Decke um in die Granite der Doldenhorn-Decke und des Aar-Massiv einzutauchen. Südlich des Gastern-Granits wird eine Zone mit Kalken, Dolomiten und Anhydrit durchquert, bevor das Altkristallin des Aar-Massives sowie die Sedimente des Autochthons anschließen. Die maximale Überlagerung des Lötschberg-Basistunnels beträgt ca. 2000 m. An dem im Jahr 2007 in Betrieb gegangenen Infrastrukturtunnel beträgt die Drainagewasserschüttung am Nordportal ca. 100 l/s bei einer Temperatur von 20 °C [62]. Das am Tunnelportal austretende Drainagewasser wird zunächst direkt einer Fischzuchtanlage zugeführt, womit die Produktion von 45 t Sibirischem Stör, 20 t Flussbarsch und 2 - 3 t Störkaviar pro Jahr möglich werden. Danach erfolgt eine weitere Wärmeauskopplung über einen Wärmeübertrager, der die Energie auf einen Wärmepumpenkreislauf übergibt. Die Wärmeenergie dient dann zur Klimatisierung eines Tropenhauses sowie zur Versorgung eines Nahwärmeverbundes.

**Grenztunnel Füssen, Deutschland** Der Grenztunnel Füssen verbindet mit einer Gesamtlänge von 1,2 km die Bundesautobahn A7 bei Füssen mit der österreichischen Fernpassroute B 179. Die im Gegenverkehr befahrene, zweistreifige Tunnelröhre befindet sich zu 73% auf deutschem und zu 27% auf österreichischem Staatsgebiet. Der Tunnel Füssen befindet sich in einem Gebirgszug der nördlichen Kalkalpen, die in diesem Bereich durch den wasserführenden Hauptdolomit des Burkenbichls, die sogenannten Raibler Schichten (Wechselagerung von Kalken, Dolomiten, Sandsteinen, Tonschluffsteinen) und den Wettersteinkalk des Vilser Bergs gebildet werden. Die maximale Überdeckung des Tunnels beträgt ca. 210 m. Die Entwässerung des Tunnels Füssen erfolgt zur Gänze zum Nordportal auf deutscher Seite. Hierbei werden die anfallenden Schmutzwässer getrennt von den Tragschicht- und Bergwässern abgeführt. Die Tragschicht- und Bergwässer bieten nahezu eine gleichbleibende Drainagewasserschüttung von ca. 11 l/s bei der Drainagewassertemperatur von minimal 8,3 °C. Das Tunnelrainagewasser zeigt für den Betrieb einer TGTA einen leicht erhöhten Wert der freien Kohlensäure, darüber hinaus wird einer Versinterung der Tunnelrainagen durch den Einsatz von Härtestabilisatoren entgegengewirkt. Für das Nordportal des Grenztunnels Füssen wurde im Zuge eines Forschungsprojektes [25][87] eine Pilotanlage zur Klimatisierung der tunnelneigenen Betriebsräume, sowie ein Technikum zur Erprobung eines Wärmeübertragers zur Schnee- und Eisfreihaltung von Freiflächen geplant, die voraussichtlich im Jahr 2019 realisiert werden. Das geothermische Potential für diese Anwendungen wurde auf 152 kW<sub>th</sub>, für den Kühlfall auf 438 kW<sub>th</sub> abgeschätzt.

**Tunnel Rennsteig, Deutschland** Der Tunnel Rennsteig stellt mit ca. 7,9 km Länge das aufwendigste Bauwerk der Kammquerung des Thüringer Waldes dar. Der Tunnel Rennsteig besteht aus 2 separaten Tunnelröhren, die im bergmännischen Tunnelvortrieb aufgeföhren wurden. Insgesamt bilden 1322 Gewölbeblöcke in vier verschiedenen Querschnittsarten die rund 15.794 Tunnelmeter. Der Tunnel Rennsteig liegt im Nordabschnitt in der Oberhafer Scholle und im Südabschnitt in der Beerberg Scholle, die aus unre-

gelmäßig geklüfteten Vulkaniten, vorwiegend Quarzporphyre bestehen, die von einer Sedimentabfolge, bestehend aus Konglomeraten, Sandsteinen sowie Schluffstein- und Tonsteinlagen, in wechselnder Verteilung unterlagert werden. Die maximale Überdeckung des Tunnels Rennsteig beträgt ca. 205 m. Der Tunnel Rennsteig wurde als druckwasserfreier Tunnel mit einer Regenschirm-Abdichtung mit offener Sohle gebaut [37]. Zur Ableitung der Tunneldrainagewässer wurde für den Tunnel Rennsteig ein neues Drainagesystem entwickelt, das im Wesentlichen durch eine vergrößerte Schlitzweite der Drainagerohre gekennzeichnet ist. Die Drainagerohre sind in Filterkies gebettet und von einem Geotextil umhüllt. Die Entwässerung erfolgt entsprechend der Längsneigung des Tunnels zum Nord- bzw. zum Südportal. Am Nordportal des Tunnels Rennsteig tritt das Tunneldrainagewasser mit einer Schüttung von ca. 13,0 l/s und einer minimalen Temperatur von  $7,7^{\circ}\text{C}$ , am Südportal mit einer Schüttung von ca. 6,3 l/s und einer minimalen Temperatur von  $7,0^{\circ}\text{C}$  aus. Für das Nordportal befindet sich derzeit (Stand: April 2018) der Bau einer TGTA in der Umsetzung, die zur Klimatisierung der tunneleigenen Betriebsräume dienen wird. Das geothermische Potential für diese Anlage wurde auf  $147\text{ kW}_{th}$  für den Heizfall und auf  $589\text{ kW}_{th}$  für den Kühlfall abgeschätzt.

### 2.2.2 Geschlossene Absorbersysteme

Weltweit existieren 10 TGTAn (vgl. Tabelle 2.2), die geschlossene Absorbersysteme zur Extraktion von Wärme- und Kälteenergie einsetzen (Stand: April 2018). Hinzu kommt eine unbekannte Anzahl von weiteren Duo-Hybrid-Systemen im Bereich von Tunnelstrecken, die durch die Aktivierung von Bauteilen des schweren Spezialtiefbaus (Schlitzwände, Bohrpfähle, Bodenplatten) gebildet werden. Hierzu zählen z.B. eine Testanlage im Lainzertunnel (Österreich) [3], geothermisch aktivierte Stationsbauwerke der U-Bahn Linie U2 (Österreich) [13] sowie die Tottenham Court Road Crossrail Station (Großbritannien). Im Rahmen dieser Arbeit werden nachfolgend ausschließlich TGTAn von Tunneln in geschlossener Bauweise (bergmännisch und maschinell) betrachtet.

**Metro Turin, Linie 1, Italien** Die Metrolinie 1 ist eine seit 2006 im Bau befindliche U-Bahnstrecke mit einer Gesamtlänge von derzeit 13,4 km, auf der 21 Stationsbahnhöfe angeordnet sind. Aktuell (Stand: April 2018) erfolgt eine Verlängerung der Linie in südlicher Richtung um ca. 1,9 km und zwei Stationsbauwerke. Aufgeföhren wird diese Tunnelröhre durch eine Erddruckschildmaschine mit einem Durchmesser von ca. 8 m. Der Tunnel hat eine mittlere Überdeckung von 21,5 m und liegt zur Gänze unterhalb des Grundwasserspiegels. Innerhalb des Aquifers liegen strömende Grundwasser (GW)-Verhältnisse vor. Der Ausbau des Tunnels erfolgt in Tübbingbauweise mit jeweils 6 Tübbingsteinen je Ring. Die Test-TGTA besteht aus 2 thermisch aktivierten Tübbingringen (Patent 102016000020821: ENERTUN) mit einer Ringbreite von 2,8 m. Innerhalb der Tübbingsteine wurden Rohrleitungen mit einem Außendurchmesser von 20 mm und einer Wandstärke von 2 mm an den vorgefertigten Bewehrungskörben befestigt. Als Besonderheit wurden in dieser TGTA luft- und erdseitig Absorberkreisläufe installiert. Die TGTA besitzt zum einen Sensorik zur Erfassung der mechanischen Eigenschaften des Systems wie z.B. Druckkissen und Dehnungsmessgeber zur Erfassung der tangentialen

Tabelle 2.2: Übersicht über TGTAn mit geschlossenem Absorbersystem, Stand: April 2018, \*bezogen auf die Lage der Absorberleitungen, \*\*prognostizierter Wert

| Tunnel                   | Land           | Länge<br>[km] | thermische<br>Leistung*<br>[W/m <sup>2</sup> ] | Betriebsart                          |
|--------------------------|----------------|---------------|--|--------------------------------------|
| Metro Turin              | Italien        | 13,4          | 49   | Testanlage                           |
| Nanori-Toge<br>Tunnel    | Japan          | 1,0           | 150 - 170                                      | Temperierung<br>Fahrfläche           |
| Linchang Tunnel          | China          | 2,5           | k.A.   | Testanlage                           |
| Tunnel Seocheon          | Süd Korea      | 0,2           | 6 - 36   | Testanlage                           |
| Crossrail                | Großbritannien | 21,6          | 5** - 50**                                     | Versorgung<br>Wohngebäude            |
| Lainzer Tunnel           | Österreich     | 9,4           | 14 - 30  | Testanlage                           |
| U-Bahn Linie U2          | Österreich     | -             | -  | -                                    |
| Rosensteintunnel<br>B10  | Deutschland    | 1,0           | 17**   | Versorgung<br>zoologischer<br>Garten |
| Stuttgart-<br>Fasanenhof | Deutschland    | 0,4           | 5 - 30 (70**)                                  | Testanlage                           |
| Tunnel Jenbach           | Österreich     | 3,5           | 12,5   | Versorgung<br>Bauhof                 |

und radialen Spannungen sowie Dehnungen, zum anderen Messsysteme zur Erfassung des Temperaturfeldes wie faseroptische und konventionelle Temperaturmessungen über Widerstandsthermometer. In einer ersten Testphase der Anlage im Winter 2017 wurden Wärmestromdichten von ca.  $49 \text{ W/m}^2$  erreicht. Unter Berücksichtigung der elektrischen Energie für den Betrieb der Umwälzpumpe lag die JAZ während der Testphase bei ca. 2,7 [11].

**Nanori-Toge Tunnel, Japan** Der Nanori-Toge Tunnel in der Präfektur Fukushima ist ein ca. 1 km langer Straßentunnel. In der Mitte des Tunnels sind auf einer Gesamtlänge von 250 m 20 horizontale Wärmeübertrager in einer Tiefe von 1,20 m unterhalb der Fahrbahnoberfläche angeordnet. Jeder Wärmeübertrager wird durch Rohrleitungen mit einem Durchmesser von 40 mm gebildet, deren U-Form eine Schenkellänge von je 50 m besitzt. Die aus der Tunnelmitte extrahierte Wärmeenergie wird durch Rohrleitungen an das Tunnelportal transportiert, wo diese über einen  $175 \text{ m}^2$  großen Wärmeübertrager unter einem mittleren Volumenstrom von 0,7 l/min die Wärmeenergie zur Temperierung der Fahrfläche wieder abgibt. Die Regelung der Anlage läuft temperaturgeführt über die gemessene Fahrbahntemperatur im Portalbereich. Der Wärmeübertrager im Portalbereich wird durch Stahlrohrleitungen mit einem Durchmesser von 15 mm im Abstand von 10 cm gebildet, die ca. 70 mm unterhalb der Fahrfläche angeordnet sind. Die Geothermieanlage im Nanori-Toge Tunnel ist seit 2003 in Betrieb. Zahlreiche Messsensoren geben Aufschluss über die erzielten Wärmestromdichten für die Winter 2003 und 2004.

So konnte eine Wärmestromdichte von  $150 - 170 \text{ W/m}^2$  bei einer Oberflächentemperatur der temperierten Fläche von  $4^\circ\text{C}$  erreicht werden [65].

**Linchang Tunnel, China** Der Straßentunnel Linchang befindet sich in der Stadt Yakeshi, in der autonomen Region Innere Mongolei [135]. Er besitzt zwei Tunnelröhren mit jeweils ca. 2,5 km und einer maximalen Überdeckung von 100 m. Der Tunneldurchmesser beträgt 7,5 m und ist zweischalig mit einer Außenschale ( $d \approx 15 \text{ cm}$ ) und einer Innenschale ( $d \approx 45 \text{ cm}$ ) ausgebaut. Der anstehende Boden wird durch leicht verwitterten Sandstein gebildet. Der 200 m lange thermisch aktivierte Bereich befindet sich in einer Entfernung von 600 m vom Portal. Die thermische Aktivierung des Linchang Tunnels erfolgt durch 20 Absorberkreise mit je 300 m Rohrlänge (Rohr  $25 \times 2,3 \text{ mm}$ ) mit einem Schenkelabstand von 50 cm, die mit einem Frostschutzmittel durchströmt werden. Die TGTA ist mit Temperatursensoren zwischen den Absorberrohrleitungen sowie mit Temperaturmesslanzen ausgerüstet, die Bodentemperaturen bis in eine Tiefe von 2,0 m messen. Eine erreichte Wärmestromdichte dieser TGTA ist nicht dokumentiert.

**Tunnel Seocheon, Süd Korea** Bei dem Tunnel Seocheon in Süd Korea handelt es sich um einen 200 m langen, verlassenen Eisenbahntunnel, in dem zu Forschungszwecken 3 unterschiedliche Absorberrohrleitungsmuster in 6 separaten Testfeldern der Größe  $10,0 \times 1,5 \text{ m}$  angeordnet sind. Die Testfelder sind vertikal vor der existierenden Tunnelchale angeordnet. Die verlegten Rohrleitungen haben einen Außendurchmesser von 15 mm und eine Wandstärke von 2,5 mm. Für die installierte Anlage wurde zunächst ein Geothermal Response Test (GRT) durchgeführt, bevor über einen Zeitraum von ca. 3 Monaten im Herbst 2010 unterschiedliche Heiz- und Kühlbetriebsmodi untersucht wurden. Die Auswertung des Testbetriebs hat einen starken Einfluss der Tunnellufttemperatur auf die Wärmeentzugsleistung gezeigt, die in [76] zu ca.  $40 - 46 \text{ W/m}^2$  angegeben wird. Im darauf folgenden Jahr wurden weitere Langzeituntersuchungen zur Quantifizierung der Energieextraktionsraten im Heiz- bzw. Kühlbetrieb in Abhängigkeit der Tunnellufttemperatur durchgeführt [75]. Die Ergebnisse zeigen, dass die installierten Wärmeübertrager eine höhere Effizienz im Sommer im Kühlmodus (ca.  $36 \text{ W/m}^2$ ), als im Winter im Heizmodus (ca.  $6 \text{ W/m}^2$ ) aufweisen.

**Crossrail, Großbritannien** In der britischen Hauptstadt London entsteht seit dem Jahr 2009 eines der größten Bahnprojekte Europas. Die zentrale Strecke umfasst fünf separat erstellte Tunnelabschnitte mit einer Gesamtlänge von 21,6 km, die bis zu 40 Meter unter der Erdoberfläche verlaufen. Die zwei separaten Tunnelröhren wurden mit Tunnelbohrmaschinen mit einem Schneidraddurchmesser von 7,1 m aufgeföhren und mit Tunneltübungen ausgebaut. Das geplante Verkehrsaufkommen im Tunnel wird in [90] mit 24 Zugfahrten je Stunde und Richtung angegeben. Unter dem Ansatz eines Abwärmestroms durch die Züge von 1,1 MW resultiert eine Wärmestromdichte aus dem Tunnel in Richtung Tunneloberfläche  $\dot{Q}_{TL}$  von i.M.  $13 \text{ W/m}^2$ . In den Tunneltübungen wurden Absorberleitung mit einem Innendurchmesser von 20 mm mit einem Schenkelabstand von 30 cm platziert. Ein hydraulischer Kreislauf wird durch je 5 Tunnelringe mit ca. 385 m Absorberleitungen gebildet. Insgesamt wurden 31 Absorberkreisläufe verbaut, was bei

einer Ringbreite von 1,6 m eine Tunnellänge von ca. 250 m geothermisch aktiviert. Auf der Basis der Ergebnisse von numerischen Berechnungen werden für das Projekt Cross-rail Wärmestromdichten von 5 - 50  $W/m^2$  prognostiziert. Es ist geplant, dass die Wärme aus den Tunneln an das Fernwärmenetz angeschlossen wird, das die Gebäudeblöcke entlang der Tunnelstrecke mit Wärmeenergie versorgt. Die Einnahmen aus dem Verkauf von Wärme an die Fernwärmeversorgungsunternehmen werden dem Tunnelbetreiber eine Einnahmequelle liefern, die die Installation und den Betrieb der TGTA finanziert [90].

**Lainzer Tunnel, Österreich** Der Lainzer Tunnel ist ein 9,4 km langer Bahntunnel in der österreichischen Hauptstadt Wien, der die Westbahnstrecke mit der Südbahnstrecke, der Ostbahnstrecke und der Donauländebahn verbindet. Der Baubeginn des Tunnels war im Jahr 1999, die Freigabe für den Verkehr erfolgte im Jahr 2012. Innerhalb des Lainzer Tunnels wurden zwei getrennte geothermische Versuchsanlagen in den Baulosen LT22 und LT24 angeordnet, wobei es sich bei der Versuchsanlage im Baulos LT24 um die thermische Aktivierung eines Tunnels in offener Bauweise handelt, bei dem Bohrpfähle mit einem Durchmesser von 1,2 m als Wärmeübertrager ausgebildet wurden. Da die thermische Aktivierung von Systemen des schweren Spezialtiefbaus nicht im Fokus dieser Arbeit stehen, konzentriert sich dieser Abschnitt auf das Baulos LT22-Bierhäuselberg, bei dem zwei Tunnelabschnitte mit je 10 m Länge über sogenannte Energievliese geothermisch aktiviert wurden. Hierbei dient ein Schutz- bzw. Drainagevlies als Konstruktionsbasis, auf der Rohrleitungen mit einem Außendurchmesser von 25 mm und einer Wandstärke von 3,5 mm montiert sind. Eine Energievlieseinheit mit den Abmessungen 2,5 x 16,0 m wird durch ca. 73,0 m Rohrleitung gebildet, die mäandrierend auf dem Vlies befestigt sind. Insgesamt wurden in zwei getrennten Feldern je 4 Energievliese im Baulos LT22 verbaut. Im Zeitraum Februar 2004 bis Oktober 2004 wurde die Testanlage in zwei Langzeit-Dauerbetriebszuständen gefahren, bei der Wärmestromdichten zwischen 14 und 30  $W/m^2$  erzielt wurden.

**U-Bahn Linie U2, Österreich** Die U-Bahn Linie U2 gehört zum Netz der Wiener U-Bahn und hat seit Oktober 2013 auf einer Länge von 17,2 km 20 Stationen. Bei km 12,760 liegt die Station Taborstrasse, die in den Jahren 2003 bis 2008 in quartären Kiesen und einer Wechsellagerung aus tonigen Schluffen sowie Fein- und Mittelsanden bergmännisch aufgefahren wurde. Die beiden Richtungsröhren besitzen einen Ausbruchsquerschnitt von ca. 74  $m^2$  und liegen ca. 15 m unterhalb der GOK. Im Bereich der Tunnelsohle wurden nach [119] Rohrleitungen auf der Tunnelaußenschale verlegt.

**Rosensteintunnel B10, Deutschland** Der Rosensteintunnel B10 in Stuttgart ist ein im Bau befindlicher Straßentunnel mit zwei getrennten Tunnelröhren, die bergmännisch aufgefahren wurden (Stand: April 2018). Die Tunnelröhren besitzen eine Länge von 985 bzw. 1060 m und verbinden den Knotenpunkt Pragsattel im Westen mit dem Bereich am Leuze im Osten. Der Tunnel unterquert den Rosensteinpark und Teile des Zoologisch-Botanischen Gartens Wilhelma. In der Nord- sowie in der Südröhre des Rosensteintunnels B10 wurden jeweils 7 Tunnelblöcke mit insgesamt ca. 6720 m Absorberleitungen

(Außendurchmesser 25 mm) ausgerüstet, womit eine Tunnelfläche von  $3330\text{ m}^2$  geothermisch aktiviert wird [35]. Die Absorberleitungen befinden sich im Bereich der Tunnelfirste sowie den seitlichen Ulmen zwischen der Spritzbetonaußenschale und der Ortbetoninnenschale. In jedem Tunnelblock befinden sich 4 getrennte hydraulische Kreisläufe mit je 120 m Rohrleitung, die in einem sogenannten Modulverteiler in der Tunnelulme zusammengeführt werden. Während in [60] zur Nutzung der geothermischen Energie noch die Klimatisierung der tunneleigenen Betriebsräume vorgesehen war, sehen neuere Planungen die Versorgung einer neuen Elefantenanlage sowie des Asienhauses der Wilhelma mit Wärmeenergie vor [23]. In [35] wird mit Verweis auf die Ausschreibungsplanung zum Rosensteintunnel B10 (Wittke, W., Wittke, M.: Geothermie-Bericht Nr. GT-02, 07.2013, B 10-Rosensteintunnel, Ausschreibungsplanung. Wittke Beratende Ingenieure (WBI), 2013) eine Gesamtleistung für den Heiz- bzw. Kühlfall der Geothermieanlage mit  $56\text{ kW}_{th}$  angegeben, was einer Wärmestromdichte von ca.  $17\text{ W}/\text{m}^2$  entspricht.

**Tunnel Stuttgart-Fasanenhof, Deutschland** Der Tunnel Stuttgart-Fasanenhof ist ein seicht liegender, ca. 380 m langer Stadtbahntunnel im Südwesten der Stadt Stuttgart. Der bergmännisch aufgefahrenen, zweigleisige Tunnel besitzt eine Überdeckung von ca. 10 m und ist durch eine Spritzbetonaußenschale und eine Ortbetoninnenschale ausgebaut. Zwei der in der Regel 10 m langen Tunnelblöcke wurden mit insgesamt ca. 800 m Absorberleitungen mit einem Außendurchmesser von 25 mm ausgerüstet, wodurch eine Fläche von ca.  $360\text{ m}^2$  geothermisch aktiviert wird. Neben dem Absorbersystem wurde im Tunnel Stuttgart-Fasanenhof ein intensives Messsystem zur Überwachung des Tunnelklimas, der Tunnelschalentemperatur sowie der Baugrundtemperatur installiert. Darüber hinaus existieren Messdaten der angeschlossenen Anlagentechnik. Die TGTA Stuttgart-Fasanenhof wurde im Zeitraum 2011 - 2017 durch die Universität Stuttgart als reine Testanlage betrieben. In diesen Zeitraum wurden Wärmestromdichten von bis zu  $30\text{ W}/\text{m}^2$  erzielt. Die TGTA Stuttgart-Fasanenhof bildet zusammen mit der TGTA Jenbach die Grundlage der Entwicklung der numerischen Simulationsmodelle (siehe Kapitel 5) und liefert Messdaten, die im Zusammenhang mit der Entwicklung der Modelle zur Beschreibung des Tunnelklimas (siehe Kapitel 4) verwendet werden. Weiterführende Informationen zur TGTA Stuttgart-Fasanenhof sind dem Kapitel 5 zu entnehmen.

**Tunnel Jenbach, Österreich** Der Tunnel Jenbach ist ein ca. 3,5 km langer zweigleisiger Hydroschild-Tunnel, in dem ein zusammenhängender Abschnitt von 54 m mittels sogenannten Energietübbing<sup>®</sup> geothermisch aktiviert wurde. In den Tübbing<sup>®</sup> sind Rohrleitungen aus vernetztem Polyethylen mit einem Außendurchmesser von 20 mm angeordnet und mit einem Abstand von 25 - 30 cm verlegt. Den Abnehmer der geothermischen Energie bildet ein Gebäude der österreichischen Gemeinde Jenbach, das einen maximalen Heizwärmebedarf von 80 kW bezogen auf eine Außentemperatur von  $-16\text{ °C}$  hat. Im Zuge des Praxisbetriebs von 2012 bis 2014, inklusive eines im Jahr 2013 durchgeführten Testbetriebs, konnte eine Wärmestromdichte von ca.  $12,5\text{ W}/\text{m}^2$  erreicht werden [88]. Die TGTA Jenbach bildet zusammen mit der TGTA Stuttgart-Fasanenhof die Grundlage der Entwicklung der numerischen Simulationsmodelle (siehe Kapitel 5) und liefert Messdaten, die im Zusammenhang mit den Untersuchungen zum Einfluss

der Grundwasserströmung auf den geothermischen Betrieb (siehe Kapitel 4) verwendet werden. Weiterführende Informationen zur TGTA Jenbach sind dem Kapitel 5 zu entnehmen.

## 2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen und Umweltauswirkungen

Die Entstehung der rechtlichen Rahmenbedingungen zur Herstellung und dem Betrieb von Systemen der oberflächennahen Geothermie steht im Zusammenhang mit dem starken Anstieg der Verkaufszahlen von Erdwärmesonden in den 1980er-Jahren. In [74] wurden erstmals die unterschiedlichen Technologien zur Energieextraktion beschrieben und mögliche wasserwirtschaftliche Auswirkungen beim Einsatz von erdgekoppelten Wärmepumpen beschrieben. Mit Stand 2018 existieren in 8 europäischen Ländern 32 unterschiedliche Normenwerke und Richtlinien [104], die sich mit Regelung von geothermischen Anlagen befassen. Die Technologie der Tunnelgeothermie wurde bis dato nicht eindeutig in die Systematik der Systeme der oberflächennahen Geothermie bzw. Tiefengeothermie eingeordnet. Die Unterscheidung ist mit Blick auf die Genehmigungspraxis bzw. die zur Anwendung kommenden Rechtsvorschriften jedoch von Bedeutung. Grundsätzlich gelten bei sämtlichen Eingriffen in den Untergrund, bei denen das Schutzgut Grundwasser betroffen ist, die Bestimmungen des Wasserrechts. Nach § 9 Abs. 1 und 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) gilt als Grundwassernutzung auch die Veränderung der Grundwassertemperatur durch eine geothermische Nutzung, da durch diese nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeigeführt werden können. Hierzu zählt z.B. die Veränderung des Grundwasserchemismus aber auch eine Änderung der Lebensbedingungen für die Grundwasserflora und -fauna. Aquifere bilden einen Lebensraum für eine Vielzahl von Organismen. Neben Mikroorganismen existieren unter der Voraussetzung eines ausreichenden Sauerstoffangebotes auch höhere Organismen, die sogenannte Meio- und Makrofauna, die sich vor allem aus kleinen Krebstieren, Würmern, Milben, und Schnecken zusammensetzt [52]. Diese Organismen tragen zur Reinigung des Grundwassers bei [36] und sind vor diesem Hintergrund ein wichtiger Faktor in der Sicherstellung der Versorgung mit Trinkwasser. Neben dem Bundesgesetz (WHG) sind in Deutschland die Wassergesetze der Länder zu berücksichtigen, in denen z.T. direkt auf die geothermische Nutzung Bezug genommen wird (z.B. Wassergesetz für Baden-Württemberg, § 43), wobei hier die bei konventionellen Erdwärmesonden erforderlichen Bohrungen und deren Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser im Vordergrund stehen. In Deutschland wird das Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzen durch das Bundesberggesetz (BBergG) geregelt. Im § 3 des BBergG wird die Erdwärme als sogenannter „bergfreier Bodenschatz“ eingestuft und ist somit nicht mit dem Eigentumsrecht an einem Grundstück verbunden. Ausgenommen hiervon sind nach § 4 BBergG oberflächennahe Geothermiesysteme, die zur direkten Klimatisierung einer Bebauung auf dem selben Grundstück der geothermischen Erschließung dienen. Wenn der geothermische Wärmeübertrager durch eine Bohrung > 100 m realisiert wird, greift der § 127 BBergG, nach dem eine entsprechende Geneh-

migung zur Erstellung der Bohrung einzuholen ist. Für eine TGTA sind neben dem WHG und dem BBergG bei der Errichtung des Tunnelbauwerks die Bestimmungen des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) zu berücksichtigen. Für Bundesfernstraßen- und Bahntunnel besteht grundsätzlich eine Umweltverträglichkeitsprüfungspflicht (UVP), für Tunnel an Bundesstraßen zumindest eine Pflicht zur allgemeinen Vorprüfung im Einzelfall. Das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) sieht darüber hinaus keine generelle Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)-Pflicht für Anlagen zur Nutzung von Geothermie vor. Hierzu liefert die Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) ergänzende Bestimmungen, die eine UVP-Pflicht für Geothermiebohrungen > 1000 m und für Tiefenbohrungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme mit Aufbrechen von Gestein unter hydraulischem Druck vorsieht. Im Zuge der Planung eines Infrastrukturtunnels ist zu Beginn der UVP eine Umweltverträglichkeitserklärung (UVE) bei der zuständigen UVP-Behörde (jeweilige Landesregierung) vorzulegen, die eine Beschreibung des Vorhabens, die wichtigsten geprüften Alternativen, die Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt und die Maßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung dieser Auswirkungen beschreibt. Die Bewertung der möglichen Auswirkungen eines Vorhabens auf die Umwelt erfolgt durch, von der zuständigen UVP-Behörde bestellte, Sachverständige aus den verschiedensten Fachbereichen. Für Bundesstraßen und Eisenbahn-Hochleistungsstrecken ist die UVP vom Bundesminister/der Bundesministerin für Verkehr, Innovation und Technologie durchzuführen. In einer Zusammenschau bleibt festzuhalten, dass die rechtliche Grundlage für die Genehmigung einer TGTA zunächst das UVP ist, das im Zuge der UVP das WHG und die entsprechenden Wassergesetze der Länder mit einbezogen werden. Grundsätzlich folgen die Behörden bei der Genehmigung von oberflächennahen Geothermieanlagen den Zielen eines umfassenden Trinkwasserschutzes [13]. Im Vordergrund stehen zum einen die Sicherstellung eines intakten Solekreislaufes, so dass eine Kontaminierung des Untergrundes durch austretende Absorberflüssigkeit verhindert wird. Darüber hinaus soll eine nachteilige Veränderung der Grundwassertemperatur ausgeschlossen werden. Mit der Herstellung und dem Betrieb eines Infrastrukturtunnels geht gezwungenermaßen eine Beeinträchtigung der Schutzgüter Wasser und Boden einher. Die Art der Beeinträchtigung unterscheidet sich für hydrogeothermische Anlagen von denen mit einem geschlossenen Solekreislauf, so dass im Folgenden die Auswirkungen getrennt beleuchtet werden.

**Hydrogeothermische Anlagen** Der Bau eines drainierten Tunnels führt zu einer Veränderung des Gebirgswasserhaushalts und der damit ggf. verbundenen Quellwasserschüttungen im Einzugsgebiet. Im Zuge der UVP zur Errichtung eines Gebirgstunnels wird der Einfluss des Tunnels auf den Gebirgswasserhaushalt beleuchtet und das Bauverfahren und der Tunnelausbau darauf abgestimmt. Thermisch nutzbares Tunneldrainagewasser steht folglich nur dann zur Verfügung, wenn der Gebirgswasserhaushalt nicht nachteilig verändert wird. Darüber hinaus kann das an langen Tunneln mit großer Überdeckung austretende Drainagewasser thermisch so verändert sein, dass es ohne eine thermische Behandlung nicht in die Vorflut übergeben werden kann [62]. Dies hat zur Folge, dass auch ohne den Einsatz einer TGTA eine thermische Änderung des Tun-

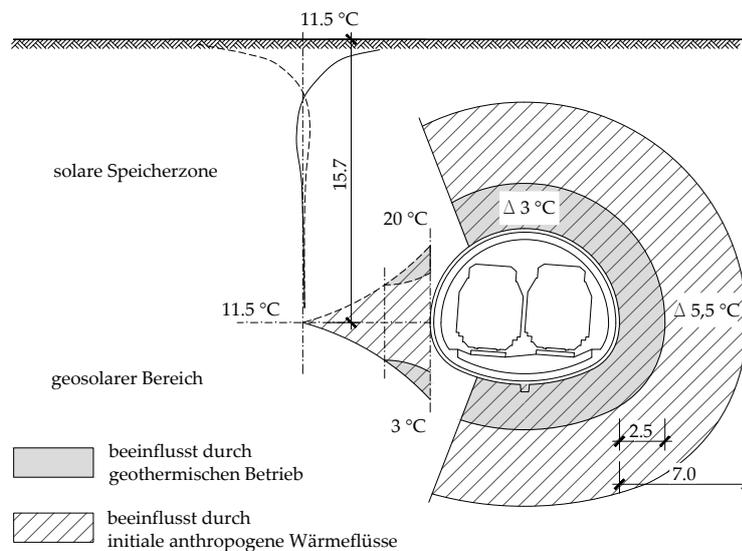


Abbildung 2.3: Einhüllende Baugrundtemperaturen im Nahbereich des Tunnels Stuttgart-Fasanenhof mit und ohne geothermischen Betrieb

neldrainagewassers herbei geführt werden muss, also eine thermische Energieauskopplung erfolgt, die direkt genutzt werden kann. Tritt das Tunneldrainagewasser bereits mit einer einleitfähigen Temperatur aus dem Berg, ist zur Genehmigung der Anlage die Wiedereinleittemperatur nach erfolgter Energieauskopplung zu bestimmen und eine wasserrechtliche Genehmigung zu beantragen.

**Geschlossene Absorbersysteme** Eine unvermeidbare Auswirkung einer geschlossenen TGTA auf die Schutzgüter Wasser und Boden stellt die Veränderung der Boden- bzw. Grundwassertemperatur im Nahbereich eines thermisch aktivierten Tunnels dar. In [124] werden hierzu Grenzwerte der Temperaturen im Untergrund angegeben ( $5\text{ °C} < T < 20\text{ °C}$ ), die möglichst einzuhalten sind. Hierbei wird nicht unterschieden, ob sich die Geothermieanlage im Festgestein oder Lockerboden befindet. Ein Infrastrukturtunnel stellt per se eine anthropogene Wärmequelle im Untergrund dar [83], die das Temperaturfeld beeinflusst. Der Betrieb einer TGTA führt daher zu einer zusätzlichen Veränderung der Untergrundtemperaturen. Die an der TGTA Stuttgart-Fasanenhof durchgeführten Messungen der Baugrundtemperaturen (vgl. Abb. 2.3) zeigen, dass selbst ohne den Betrieb einer TGTA mit einer thermischen Beeinflussung des Untergrundes von ca.  $5,5\text{ °C}$  zu rechnen ist. Über den Jahresverlauf breitet sich die Temperaturanomalie bis in eine Entfernung von ca. 7 m ab der Außenkante der Tunnelaußenschale aus und schwingt um die mittlere Oberflächentemperatur von ca.  $11,5\text{ °C}$ . Der Einfluss aus dem geothermischen Betrieb der TGTA ist bis in eine Entfernung von ca. 2,5 m feststellbar und beträgt ca.  $3\text{ °C}$ .

Durch die Lage des Tunnels Stuttgart-Fasanenhof im Bereich der Solarspeicherzone (SSZ) überlagert sich im Bereich der Firste der Einfluss aus dem Tunnelklima mit den Wärmestrombedingungen an der GOK und bestimmt das Temperaturfeld im Untergrund. Dies zeigt sich in einer über den gesamten Jahresgang anthropogen veränder-

ten Bodentemperatur für den gesamten Firstbereich. Mit Blick auf die Genehmigungsfähigkeit einer TGTA mit geschlossenem Absorbersystem ist die Frage zu klären, gegen welchen thermischen Zustand zulässige Temperaturabweichungen abzugrenzen sind. Ist hierbei das initiale anthropogene Temperaturfeld mit einzubeziehen, wird die Genehmigung einer TGTA schwieriger zu erreichen sein, als wenn sich die zulässige Temperaturänderung lediglich auf den geothermischen Betrieb bezieht. Für TGTA die auch im Bereich von Prozess- oder Gebäudekühlung zum Einsatz kommen und mit einem gegenüber der ungestörten Bodentemperatur hohen Temperatur der TGTA zu rechnen ist, werden die Temperaturgrenzwerte nach [124] nicht einzuhalten sein und es bedarf grundsätzlich einer Prüfung des Einzelfalls. Für Anlagen, die sich im Bereich strömenden Grundwassers (GW) befinden ist hierzu eine entsprechende Abschätzung der Temperaturfahnenbildung vorzunehmen. Entsprechende Empfehlungen zur Durchführung dieser Berechnungen liefert z.B. [118], wobei im Bereich der TGTA in den meisten Fällen eine detaillierte numerische Simulation der Temperaturfahnenbildung eingesetzt werden muss. Ein weiterer Einfluss einer TGTA auf das Schutzgut Boden und Wasser resultiert aus dem Betrieb des Absorbersystems. Wie bei Erdwärmesonden ist die Dichtigkeit des Absorbersystems nachzuweisen und über den Betrieb sicherzustellen. Dies erfolgt auf der Basis der aus dem Bereich der Hausinstallationstechnik bekannten Verfahren zur Druckprüfung nach DIN EN 806-4 „Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 4: Installation“. Der Zeitpunkt und die Durchführung der Druckprüfung ist so zu planen, dass eine Schädigung des umgebenen Betons sowie der Absorberrohre verhindert wird. Hierbei ist besonders auf den infolge der Hydratationswärme beeinflussten Druck in den Rohrleitungen zu achten. Für die Betriebsphase einer TGTA fordert die DIN 8901 „Kälteanlagen und Wärmepumpen - Schutz von Erdreich, Grund- und Oberflächenwasser - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen und Prüfung“ die Einrichtung einer typgeprüften Sicherheitseinrichtung, die die Anlage im Leckagefall abschaltet.



# Kapitel 3

## Motivation und Zielstellung

Die Entscheidung zur Ausrüstung eines Infrastrukturtunnels mit Absorbertechnik zum Betrieb einer TGTA fußt auf der Bewertung der im Jahresgang zur Verfügung stehenden Endenergie im Vergleich zur aufgebrauchten Primärenergie für die Herstellung und den Betrieb der TGTA. Das geothermische Potential bzw. die thermische Entzugsleistung einer TGTA wird durch die Interaktion unterschiedlicher Wärmeströme und Wärmetransportvorgänge sowie den Betrieb des Wärmeübertragers bestimmt. Eine Darstellung maßgeblicher Einflussfaktoren auf das Temperaturfeld in und um den Tunnel zeigt die Abbildung 3.1.

Hierbei werden die maßgeblichen Wärmeströme durch instationäre Einflussgrößen wie z.B. das Tunnelklima und quasi stationäre Phänomene wie z.B. die Grundwasserströmungsgeschwindigkeit getrieben. Zur Bewertung der Energieeffizienz einer TGTA ist eine transiente Simulation der Tunnelklima/Tunnel/Boden-Interaktion erforderlich, bei der neben einer realitätsnahen Abbildung der unterschiedlichen Wärmetransportmechanismen die Beschreibung der wirkenden Randbedingungen (Wärmeübergänge) von entscheidender Bedeutung ist. Das Ziel dieser Arbeit ist zunächst die Erklärung der unterschiedlichen Wärmetransportphänomene im Bereich der Tunnelgeothermie sowie die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung zutreffender Randbedingungen. Hierzu werden je nach Wärmetransportphänomen und Art der Randbedingung unterschiedliche Methoden wie die Auswertung von Messdaten, die Nutzung von thermischen oder thermisch-hydraulisch gekoppelten Berechnungen sowie Literaturrecherchen zur Anwendung gebracht. Auf dieser Basis werden numerische Simulationen nach der Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt und gegen Messdaten des Tunnels Stuttgart-Fasanenhof und des Tunnels Jenbach validiert. Sämtliche Simulationen im Rahmen dieser Arbeit werden mit Hilfe der Simulationsumgebung COMSOL Multiphysics® Modellierungssoftware (COMSOL) durchgeführt (siehe Kapitel 5.1). Auf der Basis der generellen Voruntersuchungen und der Nachrechnung von Fallstudien erfolgt die Erstellung eines parametrisierten Prognosemodells, mit dem eine abgesicherte Prognose des geothermischen Potentials einer TGTA möglich ist. Mit Hilfe dieses Prognosemodells werden exemplarische Parameter- und Modellstudien durchgeführt, auf deren Basis maßgebliche Faktoren und deren Einfluss auf die Effizienz einer TGTA identifiziert werden. Dies bildet die Grundlage für die Ableitung von Entwurfs- und Planungsempfehlungen zur Ausbildung einer TGTA für die Praxis.

Das Kapitel 4 beschäftigt sich zunächst mit der Erklärung unterschiedlicher Wärmetransportmechanismen und Wärmeübergangsvorgänge aus dem Bereich der Tunnelgeothermie, sowie der Entwicklung von Modellen zur Beschreibung entsprechender Randbedingungen. Im Kapitel 4.1 erfolgt die Beschreibung der thermischen Randbedingung

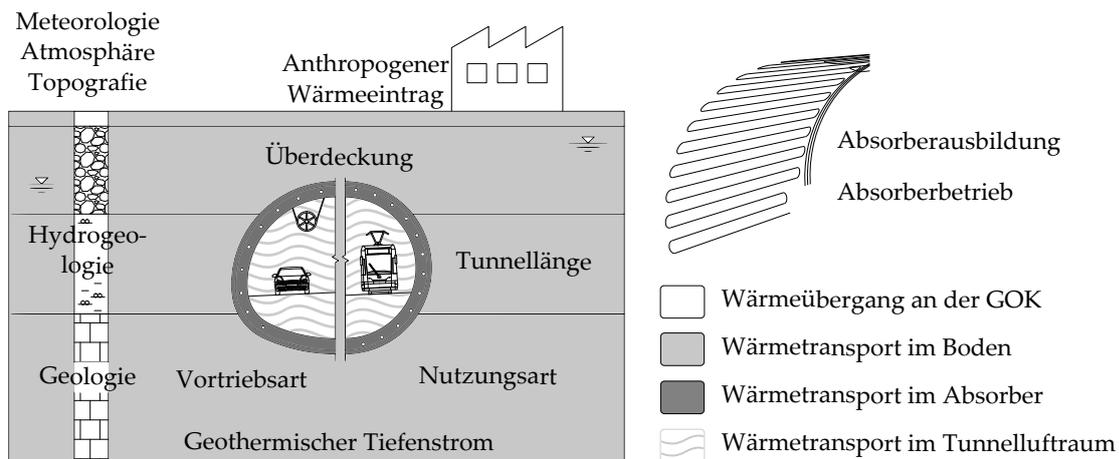


Abbildung 3.1: Zuordnung der Wärmetransportbereiche im Zusammenhang mit einer TGTA und Darstellung der maßgeblichen die Wärmeströme beeinflussenden Faktoren

an der GOK mit Hilfe der Auswertung von Temperaturmessdaten unterschiedlicher Klimastationen sowie der Simulation von eindimensionalen Wärmetransportvorgängen im Boden. In den Kapiteln 4.2 und 4.3 werden die Hintergründe zu den Wärmequellen aus dem Erdinneren bzw. der solaren Speicherzone sowie Wärmeströmen anthropogenen Ursprungs auf der Basis von Literaturrecherchen wiedergegeben. Das Kapitel 4.4 beschäftigt zunächst mit den Mechanismen des Wärmetransports im Boden. Ein Fokus dieses Kapitels liegt auf der Beurteilung des Einflusses einer Grundwasserschragenströmung einer TGTA, ein Sonderfall, der für horizontal ausgerichtete Geothermieabsorber maßgebend werden kann. Die Grundlage für diese Untersuchungen bilden die Messdaten des Tunnels Jenbach sowie unterschiedliche zwei- und dreidimensionale numerische Simulationen unter Berücksichtigung des advektiven Wärmetransports im Boden. Auf die Wärmeübertragungsmechanismen von einem umströmten Bauteil zum Aquifer wird in der aktuellen Ingenieurspraxis kein Bezug genommen. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf der Basis von Literaturrecherchen sowie eines Index-Versuches und entsprechenden numerischen Simulationen dieser Wärmeübergang diskutiert. Im Kapitel 4.5 werden Modelle zur Beschreibung der Tunnelluftströmung sowie der Entwicklung der Tunnellufttemperatur in Längsrichtung des Tunnels auf der Basis von Messdaten von 13 Straßen- bzw. Bahntunneln entwickelt. Hierbei kommen Verfahren der klassischen Signalanalyse zum Einsatz. Die Untersuchungen zum Wärmeübergang von der Tunnelluft an die Tunnelinnenschale gründen auf der Auswertung der Temperaturmessdaten der Tunnelinnenschale aus dem Tunnel Stuttgart-Fasanenhof sowie der Simulation von eindimensionalen Wärmetransportvorgängen in der Tunnelinnenschale. Die Wärmetransportmechanismen innerhalb der Tunnelschale und der Absorberrohrleitungen erklärt das Kapitel 4.6. Darüber hinaus werden zwei Ansätze zur Abbildung unterschiedlicher Betriebsmodi entwickelt, unter denen eine TGTA betrieben werden kann. Der erste Ansatz kombiniert die Inhalte unterschiedlicher Literaturquellen zur Erstellung von Wärmerferenzlastprofilen mit den Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes [38] und ge-

neriert hieraus statische Wärmeenergielastprofile. Für den zweiten Ansatz wird eine dynamische Schnittstelle zur direkten Kopplung des Simulationsmodells der TGTA an eine Simulationsumgebung aus dem Bereich der energetischen Gebäudesimulation zur Abbildung des Energiebedarfs eines Wohn- oder Bürogebäudes programmiert.

Jeweils am Ende eines Unterkapitels stellt eine Schlussfolgerung die wesentlichen Erkenntnisse und Sachverhalte hinsichtlich der zu berücksichtigenden Wärmetransportvorgänge und Randbedingungen zur Abbildung in einer numerischen Simulation zusammen.

Die Erstellung eines Prognosemodells zur Abschätzung des geothermischen Potentials einer TGTA erfolgt in Kapitel 5. Hierzu wird eine Simulationsumgebung entwickelt, die je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Detailtiefen durch die Abbildung unterschiedlicher Berechnungsdomains berücksichtigt (vgl. Abb. 3.2).

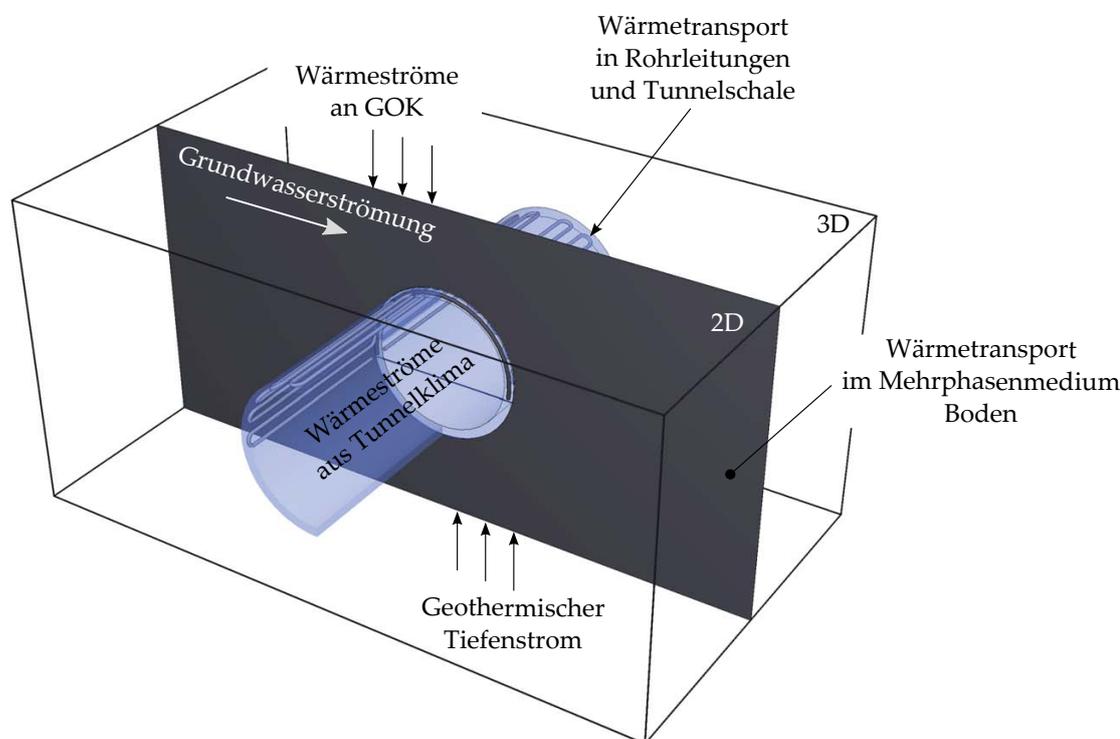


Abbildung 3.2: Isometrische Darstellung der innerhalb des Prognosemodells abgebildeten Simulationbereiche

Das Kapitel 5.1 gibt eine allgemeine Beschreibung der FEM sowie der eingesetzten Programmumgebung. Diese Beschreibung gilt gleichfalls für die in Kapitel 4 durchgeführten numerischen Berechnungen. Im Kapitel 5.2 werden die Fallbeispiele TGTA Stuttgart-Fasanenhof und Jenbach eingeführt und die zur Verfügung stehenden Messdaten aufbereitet. Diese bilden die Grundlage zur Validierung von zwei grundsätzlich unterschiedlich aufgebauten numerischen Simulationsmodellen. Das dreidimensionale Modell des Tunnels Stuttgart-Fasanenhof dient der Validierung der Wärmetransportprozesse innerhalb des Bodens sowie des geothermischen Absorbers. Das zweidimensionale Simulationsmodell des Tunnels Jenbach dient zusammen mit einem im Kapitel

4.4.2 entwickelten Ansatz zur Berücksichtigung einer Grundwasserschräganströmung der Validierung der Abbildung der Strömungsvorgänge im Boden sowie im Tunnel-  
lufttraum. Im Kapitel 5.3 werden die Grundlagen des Kapitels 4 und die Erkenntnisse  
aus dem Kapitel 5.2 in eine Simulationsanwendung überführt, mit der eine abgesicher-  
te Prognose des tunnelgeothermischen Potentials möglich wird. Mit Hilfe der Simula-  
tionsanwendung werden im Anschluss Parameterstudien durchgeführt, um maßgebliche,  
den Wärmetransport bestimmende, Einflussfaktoren zu identifizieren. Darüber hin-  
aus wird die programmierte Schnittstelle zu Gebäudesimulationsumgebungen genutzt,  
um an einem exemplarischen Beispiel die Möglichkeiten zur Gesamtbilanzierung einer  
TGTA aufzuzeigen. Ein anschließendes Praxispiel zeigt die Interaktion einer TGTA mit  
möglichen Nutzungen der tunnelgeothermischen Energie im direkten Nahbereich eines  
Tunnels. Auf der Basis der durchgeführten Parameterstudien und unter Berücksichti-  
gung der Erfahrungen aus den bestehenden TGTAn werden Empfehlungen für die Pla-  
nung und den Betrieb einer TGTA gegeben. Den Abschluss dieser Arbeit bildet ein Aus-  
blick in das Potential der Tunnelgeothermie und zeigt Möglichkeiten zur Ausbildung  
der Schnittstelle zwischen dem tunnelgeothermischen Absorber und der Energieabneh-  
merseite.

## Kapitel 4

# Wärmetransportmechanismen der Tunnelgeothermie

In Kapitel 3 wurden die unterschiedlichen Einflüsse und Wechselwirkungen vorgestellt, unter denen eine TGTA Wärme- bzw. Kälteenergie extrahiert. Diese Einflüsse und Wechselwirkungen sind zur Beschreibung der resultierenden Wärmeströme in die unterschiedlichen Mechanismen des Wärmetransportes und der Wärmeübertragung zu überführen. In der Mehrzahl der aktuellen Lehrbücher zum Fachgebiet der Wärmeübertragung, einem Teilgebiet der Wärmelehre, wird von vier, teilweise von 5 Arten des Wärmetransportes bzw. der Wärmeübertragung berichtet: Wärmeleitung, freie und erzwungene Konvektion, Strahlung und latente Wärme. In [80] wird mit Bezug auf den von Wilhelm Nußelt bereits 1915 veröffentlichten Artikel "Das Gesetz des Wärmeübergangs" kritisiert, dass die Transportphänomene freie und erzwungene Konvektion streng genommen der Wärmeleitung in Fluiden gleichkommt, und somit ausschließlich ein Wärmetransport durch Strahlung und durch Wärmeleitung zu unterscheiden ist. Durch eine Betrachtung der Differentialgleichungen zur Beschreibung des konvektiven Wärmetransportes lässt sich zeigen, dass in diesen Gleichungen kein physikalischer Transportkoeffizient für Konvektion enthalten ist, Konvektion also ausschließlich Wärmeleitung in einem bewegten Fluid ist.

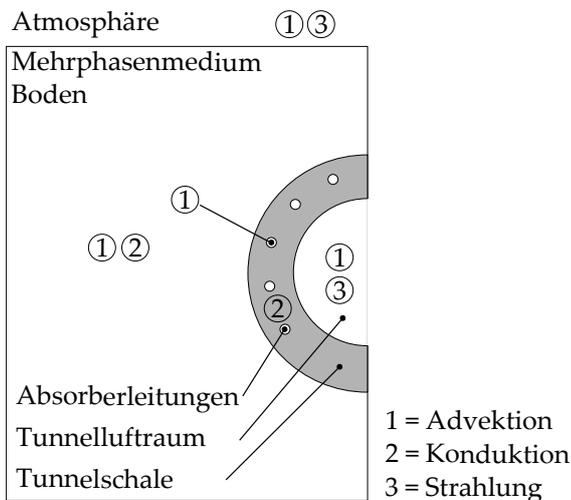
Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Wärmetransportmechanismen unterschieden:

- Advektion: Wärmetransport infolge Strömung eines Fluides
- Konduktion: Molekularer diffusiver Wärmetransport infolge eines Temperaturgradienten in einem Feststoff oder einem Fluid
- Strahlung: Wärmetransport durch elektromagnetische Wellen ohne stofflichen Träger

Zur Beschreibung eines Wärmeübergangs wird in

- Latenten Wärmestrom: Wärmeübergang durch Phasenwechsel
- Freie Konvektion: Wärmetransport infolge eines Temperaturgradienten in einem Fluid, dessen Strömung durch einen Temperatur induzierten Dichteunterschied aufrecht erhalten wird

**Wärmetransportmechanismen**



**Wärmeübergänge**

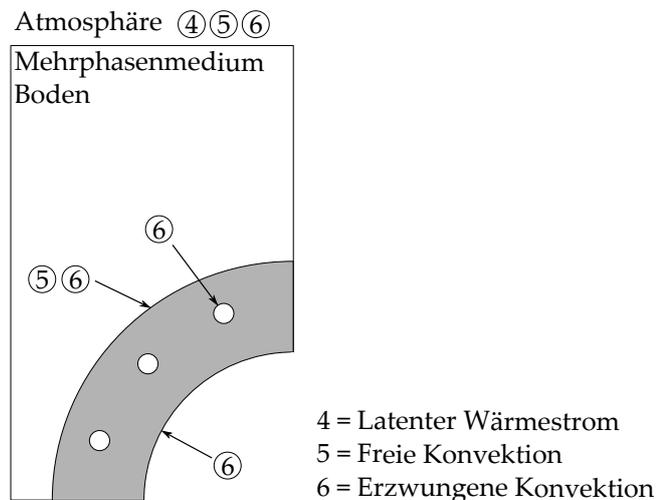


Abbildung 4.1: Maßgebliche Mechanismen des Wärmetransportes und des Wärmeüberganges im Zusammenhang mit einer TGTA

- Erzwungene Konvektion: Wärmetransport infolge eines Temperaturgradienten in einem Fluid, dessen Strömung durch eine äußere Druckdifferenz verursacht wird

unterschieden. Darüber hinaus werden Wärmeströme, die auf einen Phasenwechsel innerhalb eines Mediums zurückzuführen sind, als Quell- bzw. Senkterme berücksichtigt und nicht dem Wärmetransport- oder dem Wärmeübergang zugeordnet.

Die Abbildung 4.1 zeigt die im Zusammenhang mit einer TGTA maßgeblichen Wärmetransport- und Wärmeübergangsmechanismen, die nachfolgend detailliert beschrieben werden.

**Advektion** Im Zusammenhang mit dem Stoff- oder Wärmetransport durch ein strömendes Fluid wird der Begriff der Advektion verwendet. Zum Verständnis dieses Begriffes hilft die Eulersche und Lagrangesche Betrachtungsweise einer Strömung (vgl. Gleichung 4.1).

$$\frac{Df}{Dt} = \underbrace{\frac{\partial f}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z}}_{(2)} \quad (4.1)$$

Die Fließvorgänge einer Strömung werden in der Regel von einem festen Bezugssystem aus beschrieben (Eulersche Betrachtungsweise). Diese Betrachtungsweise entspricht der partiellen Ableitung einer physikalischen Größe (Geschwindigkeit, Temperatur) nach der Zeit  $\frac{\partial f}{\partial t}$ . Da jedoch nicht nur die Dynamik des System (Zustand zum Zeitpunkt t) sondern auch die Kinematik (Analyse des Weges eines Fluidpartikels) von Interesse ist, behilft man sich mit der Lagrangeschen Betrachtungsweise, die der Bahnableitung  $\frac{Df}{Dt}$  entspricht. Betrachtet man den rechten Teil der Gleichung 4.1, so setzt sich dieser eben aus den Eulerschen (1) und den Lagrangeschen Anteilen (2) zusammen und

---

wird als Advektionsgleichung 1. Ordnung bezeichnet. Diese Gleichung beschreibt das Verhalten einer physikalischen Größe, im Falle einer Fluidströmung der Geschwindigkeit  $f = u$ , die advektiv im Strömungsfeld treibt und darüber hinaus keine weitere Dynamik zeigt.

**Konduktion** Als Konduktion oder Wärmeleitung wird der Wärmefluss innerhalb eines Feststoffes oder eines Fluids infolge eines Temperaturgradienten bezeichnet. Die Träger des Energietransportes sind dabei je nach Art des Mediums unterschiedlich (Atome, Moleküle usw.). Die Richtung des Wärmestroms ist immer von der höheren zur niedrigeren Temperatur gerichtet. Ist in einem Stoff ein Temperaturgradient vorhanden, tritt immer Wärmeleitung auf. Die Größe der Wärmestromdichte  $\dot{q}$  wird für den stationären Fall durch das Fouriersche Gesetz über die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und den Temperaturgradienten beschrieben (vgl. Gleichung 4.2).

$$\dot{q} = -\lambda \operatorname{grad} T \quad (4.2)$$

Der resultierende Wärmestrom  $\dot{Q}$  durch eine Bezugsfläche  $A$  ermittelt sich nach Gleichung 4.3:

$$\dot{Q} = \int_A \dot{q}_n dA \quad (4.3)$$

Bei röhrenförmigen Wärmeübertragern wie z.B. TGTAn ändert sich die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  über den Radius  $r$  des wärmeübertragenden Bauteils mit der Länge  $l$ , und der Wärmestrom  $\dot{Q}$  ermittelt sich nach Gleichung 4.4.

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A(r) \cdot \frac{d\vartheta}{dr} = -\lambda \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot l \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \quad (4.4)$$

Im Bereich der Tunnelgeothermie treten instationäre Wärmetransportvorgänge aufgrund der transienten Randbedingungen aus dem Tunnelklima, der Wärmeströme an der GOK oder dem Betrieb des Absorbers nur in sehr kleinen Zeitfenstern auf, so dass bei der Untersuchung von TGTAn zeitliche Temperaturänderungen zu berücksichtigen sind. Während die instationäre Temperaturfeldberechnung in einer ebenen Platte noch mit Hilfe von analytischen Berechnungen erfolgen kann, ist die Lösung für dreidimensionale Geometrien meist nur mittels numerischer Methoden möglich.

**Strahlung** Die Wärmeübertragung bei Strahlungswärmeaustausch erfolgt durch elektromagnetische Wellen in Abhängigkeit der absoluten Temperatur. Wärmeenergie wird im sogenannten ultraroten Bereich bei Wellenlängen zwischen 0,8 bis 400  $\mu\text{m}$  übertragen. Sichtbares Licht liegt zum Vergleich in einem Wellenbereich von 0,35 bis 0,75  $\mu\text{m}$ . Trifft Wärmestrahlung auf einen Körper, so kann diese transmittiert, reflektiert oder absorbiert werden. Diese drei Effekte werden mit dem Transmissions- ( $\tau^*$ ), dem Reflexions- ( $\rho^*$ ), und dem Absorptionskoeffizienten ( $\alpha^*$ ) quantifiziert. Das Kirchhoffsche Gesetz besagt, dass im thermischen Gleichgewicht der absorbierte Energiestrom  $\dot{E}_a$  gleich dem emittierten Energiestrom  $\dot{E}_e$  ist, so dass  $\epsilon^*$  (Emmissionsgrad) =  $\alpha^*$  gilt. Hiermit und durch die Strah-

lungskonstante des schwarzen Strahlers  $\sigma$  läßt sich die Größe der Wärmestrahlung  $\dot{Q}$  auf eine Fläche  $A$  über Gleichung 4.5 beschreiben.

$$\dot{Q} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (4.5)$$

**Konvektion** Strömt ein Fluid an einer festen Berandung vorbei und wird hierbei Wärme übertragen, spricht man von konvektivem (lateinisch: convectum, mitgetragen) Wärmeübergang. Der Temperaturgradient steht hierbei senkrecht zum Vektor der Strömung also parallel zu den Isothermen. Es ist zwischen erzwungener und freier Konvektion zu unterscheiden. Bei erzwungener Konvektion wird der Wärmeübergang zum einen durch den Temperaturgradienten, zum anderen durch eine Strömung bestimmt, die durch eine äußere Druckdifferenz aufrechterhalten wird. Im Gegensatz hierzu entsteht die Strömung bei einer freien Konvektion nicht durch eine Druck- sondern durch einen Dichteunterschied innerhalb des strömenden Fluids. Die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  ermittelt sich für die erzwungene wie auch die frei Konvektion über den sogenannten Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  und die Temperaturdifferenz zwischen der unbeeinflussten Fluidtemperatur  $T_f$  und der Oberflächentemperatur des überströmten Körpers  $T_w$  gemäß (4.6).

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_f - T_w) \quad (4.6)$$

Bei dieser Definition wird das Fluid mit einer konstanten Temperatur  $T_f$  im gesamten Raum angenommen.

**Erzwungene Konvektion** Bei turbulenten Strömungen, wie diese z.B. in den Absorberrohrleitungen oder dem Tunnelluftraum einer TGTA erreicht werden, entstehen in Wandnähe Temperaturprofile ähnlich dem Strömungsgeschwindigkeitsprofil. Unmittelbar in Wandnähe ist eine Temperaturgrenzschicht vorhanden, in der sich die Wandtemperatur zur Fluidtemperatur ändert. In dieser Temperaturgrenzschicht wird Wärme durch Wärmeleitung übertragen, so dass der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  durch die Wärmeleitfähigkeit des Fluids  $\lambda_f$  und die Dicke der Temperaturgrenzschicht  $\delta_{f,t}$  beschrieben werden kann 4.7:

$$\alpha = \frac{\lambda_f}{\delta_{f,t}} \quad (4.7)$$

Die Dicke der Temperaturgrenzschicht lässt sich in Versuchen nicht zuverlässig vermessen. Eine analytische Herleitung des Wärmeübergangskoeffizienten ist für turbulente Strömungen nicht möglich. Um die Anzahl der Versuche zur empirischen Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten gering zu halten, nutzt man in der Disziplin der Wärmeübertragung Modellvorstellungen für komplexe Verhältnisse und physikalische Ähnlichkeitsprinzipien zur Beschreibung des Wärmeübergangs in Abhängigkeit der Geometrie des um- oder überströmten Körpers sowie der thermischen Stoffeigenschaften des Fluids. Aus der Bewegungsgleichung eines strömenden Fluids lässt sich die dimensionslose Kennzahl  $Re_L$  herleiten (siehe Gleichung 4.8):

---


$$Re_L = \frac{u \cdot L}{\nu} = \frac{u \cdot L \cdot \rho}{\eta} \quad (4.8)$$

Die Reynoldszahl  $Re_L$  enthält die Strömungsgeschwindigkeit, eine charakteristische Länge sowie die Zähigkeit des Fluids. Darüber hinaus sind zur Beschreibung des Wärmeübergangs noch Informationen zur Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Fluids erforderlich. Aus der Wärmetransport- bzw. Energiegleichung lässt sich die dimensionslose Kennzahl  $Pr$  herleiten (siehe Gleichung 4.9):

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} \quad (4.9)$$

Die Prandtlzahl  $Pr$  beschreibt den Impulstransport infolge von Reibung im Verhältnis zum Wärmetransport durch Wärmeleitung. Mit Hilfe von  $Re_L$  und  $Pr$  sowie unter Berücksichtigung der Geometrie des um - oder überströmten Bauteils sowie der Richtung des auftretenden Wärmestroms lässt sich unter Verwendung sogenannter Nußeltkorrelationen  $Nu_L$  der Wärmeübergangskoeffizient für unterschiedliche Geometrien, Fluide und Strömungszustände bestimmen:

$$Nu_L = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (4.10)$$

Nußeltkorrelationen existieren in der Literatur für zahlreiche Geometrien und Strömungszustände.

**Freie Konvektion** Zur Beschreibung der freien Konvektion, bei der Fluidbereiche kleinerer Dichte aufsteigen und größerer Dichte absinken und so zum Strömungszustand in der Fluidomain führen, ist  $Nu_L$  als Funktion der Grashofzahl  $Gr$  (siehe Gleichung 4.11), der  $Pr$  und der Geometrie des um - oder überströmten Körpers definiert.  $Gr$  beschreibt das Verhältnis der Auftriebskräfte zu den Reibungskräften und somit die analogen Zusammenhänge wie  $Re_L$  für turbulente Strömungen.

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot (T_w - T_f)}{\nu^2} \quad (4.11)$$

In der Gleichung 4.11 ist  $\beta$  der räumliche Wärmeausdehnungskoeffizient. Da sowohl  $Gr$  als auch  $\alpha$  von der Temperaturdifferenz zwischen Wand und Fluid abhängig sind, erfolgt die Berechnung von  $Gr$  iterativ.

Die in Abbildung 4.1 gezeigten Formen der Wärmeübertragung zeigen die im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigten Wärmetransportmechanismen in den Bereichen Atmosphäre, Mehrphasenmedium Boden, Tunnelschale, Absorberrohrleitungen und Tunnelinnenraum. Darüber hinaus treten auch weitere Arten der Wärmeübertragung auf, die jedoch auf der Basis von analytischen und numerischen Untersuchungen für die TGTA als nicht relevant bewertet werden konnten. In Kapitel 5 wird die Entwicklung von Simulationsmodellen beschrieben, die auf der Basis der Lösung von komplexen partiellen Differentialgleichungen (PDE) nach der Finiten Elemente Methode eine gesicherte Prognose möglicher Entzugsleistungen von TGTAn ermöglichen. Das Lösen

dieser Partielle Differentialgleichung, (englisch: partial differential equation) (PDE) erfordert das Einführen von Anfangs- und Randbedingungen, die das Berechnungsgebiet initialisieren und abgrenzen. In den nachfolgenden Kapiteln werden die unterschiedlichen Wärmetransport- und Wärmeübertragungsmechanismen sowie die zur Lösung der PDE erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen getrennt nach dem Ort ihrer Wirkung im Hinblick auf ihre Eignung bei der Simulation von TGTAn untersucht und bewertet. Die Grundlage hierzu bilden neben Messdaten unterschiedlicher TGTAn auch die Ergebnisse von numerischen Simulationen. Die für diese Berechnungen verwendeten mathematischen Modelle werden in Kapitel 5 beschrieben.

## 4.1 Geländeoberfläche

Wärmeströme an der GOK spiegeln sich mit täglicher und jährlicher Periodendauer in den oberen Bodenschichten wider. Sie sind das Resultat der klimatischen Gegebenheiten an der Oberfläche und den vorherrschenden Bodentemperaturen. Als klimabestimmende Parameter nennt [97] die Umgebungslufttemperatur, die Luftströmungsgeschwindigkeit an der Geländeoberfläche sowie den Bewölkungsgrad. Zusammen mit der Luftfeuchtigkeit bestimmen sie die Wärmeströme aus Strahlung ( $\dot{q}_{KW}$  und  $\dot{q}_{LW}$ ), Konvektion ( $\dot{q}_{konv}$ ) und latenter Wärme ( $\dot{q}_{lat}$ ) (vgl. Abbildung 4.2). Daneben ist bei Niederschlagsereignissen ein weiterer direkter Wärmestrom aus dem Niederschlagswasser  $\dot{q}_R$  zu berücksichtigen.

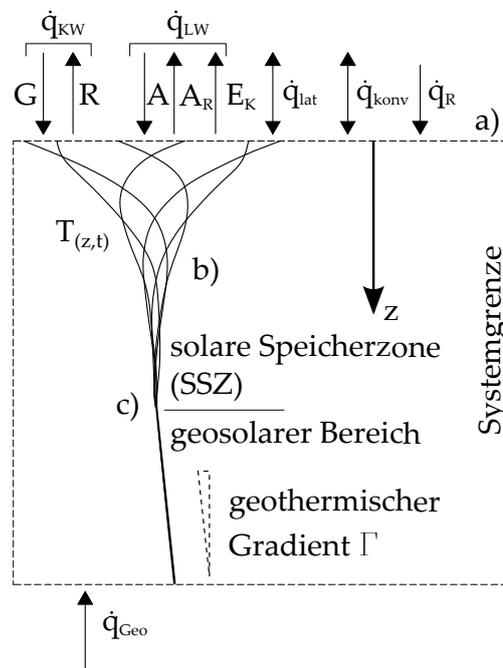


Abbildung 4.2: a) Wärmeströme an einem finiten Bodenkörper, b) Darstellung jahreszeitlich variierender Bodentemperaturverläufe, c) Begriffliche Trennung zwischen solarer Speicherzone und geosolarem Bereich

Der an der GOK eingetragene Gesamtwärmestrom wird in [133] zu ca. 12,5 % der extraterrestrischen Strahlungsstärke von  $\dot{E}_0$  angegeben und beträgt für bewachsene Landflächen der Erde im Mittel ca.  $170 \text{ W/m}^2$ . Der tatsächliche Wärmeeintrag an der GOK ist von zahlreichen Faktoren wie z.B. dem Längen- bzw. Breitengrad, der Jahreszeit, dem Bewölkungsgrad entsprechend abhängig. An einem Sommertag kann die Globalstrahlung in Mitteleuropa bis zu einem Wert von  $900 \text{ W/m}^2$  ansteigen, während bei trübem bzw. wolkeigem Himmel die Strahlungsstärke auf unter  $100 \text{ W/m}^2$  sinkt.

Die Einflusstiefe der Wärmeströme an der GOK, die sogenannte SSZ, wird durch die Temperaturleitfähigkeit  $a$  des Untergrundes sowie die Periodendauer  $T$  ( $\omega = 2\pi/T$ ) der angenommenen harmonischen Temperaturschwingung in der Atmosphäre beeinflusst [121].

$$\vartheta_{z,t} = \hat{\vartheta} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot z\right) \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot z + \omega t\right) \quad (4.12)$$

Für Wärmeübertrager die im Bereich der SSZ liegen, kommt der Wahl der Randbedingung zur Abbildung der Wärmeströme an der GOK eine besondere Bedeutung zu [94]. Je geringer die Überdeckung von TGTAn ist, desto größer wird der Einfluss der thermischen Randbedingung an der Geländeoberfläche auf die extrahierbaren Wärmeströme. In [20] wird an der GOK eine adiabate Randbedingung 2. Art (thermisch isoliert) gesetzt. In [108] und [82] werden Randbedingungen 1. Art in Form der Temperatur in 2 m über der GOK verwendet, in weiteren Literaturquellen wird die Art der Randbedingung an der GOK nicht beschrieben. Wird an der GOK eine Randbedingung 1. Art (Temperaturrandbedingung) gesetzt, kann sich die Temperatur an der GOK infolge der Wärmeströme aus der TGTA nicht ändern und Energieentzugsleistungen werden ggf. über- oder unterschätzt. Vor diesem Hintergrund wurde auf der Basis von zweidimensionalen Simulationsberechnungen der Einfluss einer TGTA auf die Oberflächentemperatur im Bereich oberhalb der Firste untersucht.

Für das in Abbildung 4.3 dargestellte Modell wurde zunächst der initiale Temperaturverlauf über den Jahresgang unter Berücksichtigung einer Randbedingung 3. Art, d.h. Temperatur in 2 m über der GOK und einem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  in Abhängigkeit der Luftströmungsgeschwindigkeit, an der GOK berechnet, der sich für die zweidimensionale Berechnungsdomain (inkl. der „Aussparung“ der TGTA) einstellt. Im Anschluss daran wurde am Rand der Aussparung eine stationäre Randbedingung 1. Art (Temperaturrandbedingung  $0^\circ\text{C}$ ) aufgeprägt. Die Simulation erfolgte transient über die Dauer von 3 Jahren, wobei die Tiefenlage der Aussparung innerhalb der Berechnungsdomain zwischen 1 und 12 m variiert wurde. Die Abbildung 4.3 rechts zeigt die berechneten Temperaturdifferenzen zwischen der initialen Oberflächentemperatur oberhalb der Tunnelfirste am Punkt a) und bei Betrieb des Absorbers über unterschiedliche Tiefenlagen der TGTA. Untersucht wurde der Einfluss der Tiefenlage des Wärmeübertragers für zwei unterschiedliche Böden mit Temperaturleitfähigkeiten  $a$  zwischen  $3,23 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (Sand/Ton, trocken)  $< a < 8,75 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (Sand, gesättigt). Die gewählten Temperaturleitfähigkeiten decken den Bereich möglicher Temperaturleitfähigkeiten von Lockerböden ab. Eine höhere Temperaturleitfähigkeit führt zu einer stärkeren Beeinflussung der Oberflächentemperatur und der Einfluss des Wärmeübertragers ist bis in größere

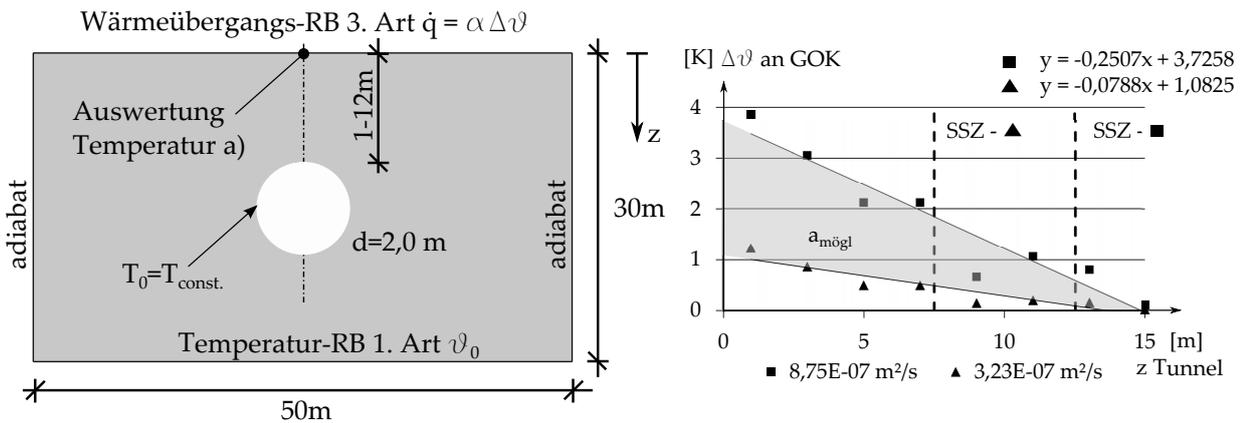


Abbildung 4.3: Beurteilung der Randbedingung an der GOK, links: schematische Skizze des Untersuchungsgebietes unter Angabe der verwendeten Randbedingung, rechts: über den Jahresgang gemittelte Abweichung der Temperatur oberhalb der Tunnelfirste im Vergleich zur ungestörten Temperatur am Punkt a), Angabe der Tiefe der entsprechenden Grenze der SSZ, schraffierte Fläche = Bereich möglicher Temperaturleitfähigkeiten  $a$

Tiefen feststellbar. Liegt der Wärmeübertrager am Übergang von der SSZ zum geosolaren Bereich oder darunter, ist die Beeinflussung der Oberflächentemperatur durch die geothermische Nutzung vernachlässigbar. Diese Untersuchung zeigt, dass besonders bei hochliegenden TGTAn die an der GOK gewählte Randbedingung einen maßgeblichen Einfluss auf das geothermische Potential einer TGTA besitzt.

**Strahlung an der GOK** Bei Wärmeübertragern, die nahe der GOK liegen oder diese ggf. bilden (z.B. Systeme zur Eis- und Schneefreihaltung) wird das Temperaturfeld maßgeblich durch die Strahlungswärme bestimmt. Die Strahlungswärme setzt sich aus den Anteilen der kurzwelligigen Strahlung  $\dot{q}_{KW}$  und der langwelligigen Strahlung  $\dot{q}_{LW}$  zusammen. Die Messung der Globalstrahlung  $G$  als Teil von  $\dot{q}_{KW}$  erfolgt in Deutschland an lediglich 30 Stationen, so dass zur Angabe von räumlich hochauflösenden Strahlungswerten ergänzend Strahlungsdaten radiometrischer Satellitenmessungen Verwendung finden [70]. Die Globalstrahlung setzt sich aus den Anteilen der diffusen und direkten Einstrahlung zusammen, deren Werte in den Datensätzen der Testreferenzjahre [38] angegeben werden. Der Anteil der Reflexion  $R$  wird durch die Oberflächenbeschaffenheit der GOK und dem Einfallswinkel der Sonne bestimmt. Das Maß der Reflexion, die Albedo  $\rho_0$ , entspricht dem Verhältnis der rückgestrahlten zur einfallenden Strahlung, so dass die kurzwellige Strahlung nach Gleichung 4.13 berechnet werden kann.

$$\dot{q}_{KW} = (1 - \rho_0) \cdot G \quad (4.13)$$

Große Albedo liefern schneebedeckte Oberflächen mit  $\rho_0 = 0,95$ , offene bzw. bewachsene Böden haben ein Albedo von  $\rho_0 = 0,20$  während freie Wasseroberflächen die geringsten Albedo von  $\rho_0 = 0,07$  zeigen.

Die langwellige Strahlung setzt sich aus den Anteilen der atmosphärischen Gegenstrahlung  $A$ , der reflektierten atmosphärischen Gegenstrahlung  $A_R$  und der langwelligen Ausstrahlung  $E_K$  zusammen. Die Werte von  $A$  bauen in den Datensätzen der Testreferenzjahre auf einem satelliten- und stationsbasierten Wolkendatensatz auf, auf die ein bewölkungsabhängiger Strahlungsantrieb angewendet wird. Die Daten der langwelligen Ausstrahlung  $E_K$  in den Datensätzen der Testreferenzjahre basieren auf räumlich hochauflösenden Realdaten, wobei die Oberflächenemissivität aus Landnutzungsdaten abgeleitet wurde. Der Anteil der reflektierten atmosphärischen Gegenstrahlung  $A_R$  errechnet sich für eine horizontale Fläche gemäß Gleichung 4.14.

$$A_R = (1 - \epsilon^*) \cdot A \quad (4.14)$$

Langwellige Emissionsgrade  $\epsilon^*$  liegen in einem Bereich von  $\epsilon^* = 0,11$  für Aluminium bis zu  $\epsilon^* = 0,95$  für Beton, Schnee oder Boden.

Der Gesamtwärmestrom durch Strahlung ergibt sich nach Gleichung 4.15.

$$\dot{q}_{KW} + \dot{q}_{LW} = (1 - \rho_0) \cdot G + A + A_R + E_K \quad (4.15)$$

**Bodennahe Luftströmung** Am Übergang von der GOK an die Atmosphäre wird Wärme durch Konvektion transportiert (vgl. Gleichung 4.6). Die treibenden Größen sind die Lufttemperatur in 2 m Höhe über der GOK, die Oberflächentemperatur an GOK, die Strömungsgeschwindigkeit der Luftströmung an GOK sowie die Luftdruck- und Luftfeuchtigkeitsverhältnisse. Zur Beschreibung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  werden in der Literatur zumeist Korrelationen unter Vernachlässigung der Luftdruck- und Luftfeuchtigkeitsverhältnisse angegeben, z.T. wird sogar auf eine Beschreibung des Wärmeübergangs in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit verzichtet. Für den Bereich der Gebäudesimulation wird in [86] eine Zusammenschau von 21 existierenden Korrelationen von  $\alpha$  und deren Implementierung in gängige Simulationsumgebungen gegeben, die zu dem Schluss kommt, dass selbst für gut zu definierende Gebäudeoberflächen mit Abweichungen bei der Berechnung des jährlichen Kühlbedarfs von Gebäuden von bis zu 30% zu rechnen ist.

**Verdunstungs- und Kondensationswärmeströme** Am Übergang von der GOK an die Atmosphäre wirken latente Wärmeströme ( $\dot{q}_{lat}$ ) durch Verdunstungs- oder Kondensationsvorgänge, die nach der Daltonschen Verdunstungsformel berechnet werden können (siehe Gleichung 4.16).

$$\dot{q}_{lat} = \alpha \cdot \frac{0,622 \cdot \Delta Q_v}{p \cdot c_{p,a}} \cdot (p_D - p_S) \quad (4.16)$$

Hierbei resultiert der Faktor 0,622 aus dem Quotienten des Molekulargewichtes von Wasser und dem Molekulargewicht von Luft.  $\Delta Q_v$  steht für die Umwandlungswärme (latente Verdunstungswärme) von Wasser bei Atmosphärendruck,  $p$  beschreibt den Umgebungsluftdruck und  $p_D - p_S$  stellt den wärmestromtreibenden Druckgradienten aus Partial- und Wasserdampfsättigungsdruck. Für die potentielle Verdunstung über Land-

flächen wurde ausgehend von der Penman-Gleichung für die Verdunstung über freien Wasserflächen die Penman-Monteith-Formel entwickelt (zitiert in [19]).

$$ETP = \frac{1}{\Delta Q_v} \cdot \frac{s \cdot (\dot{q}_{LW} + \dot{q}_{KW} - \dot{q}_{Geo}) + \rho_l \cdot c_{p,l} \cdot \left(\frac{p_s - p}{r_a}\right) \cdot t}{s + \gamma_p \frac{r_s}{r_a}} \quad (4.17)$$

In Gleichung 4.17 ist  $r_s$  der Oberflächenwiderstand der Bodenbedeckung,  $r_a$  der aerodynamische Widerstand der Bodenbedeckung und  $\gamma_p$  die Psychrometerkonstante. In [19] wird auf der Basis einer Studie gezeigt, dass der Zusammenhang nach Penman-Monteith vor allem sensitiv auf die Parameter  $r_s$  und  $r_a$  reagiert. Vor allem der Oberflächenwiderstand der Bodenbedeckung sei nur schwer abzuschätzen.

**Wärmestrom durch Niederschlag** Handelt es sich bei der GOK um eine nicht versiegelte Oberfläche, wird durch das Eindringen von Niederschlagswasser in den Boden Wärmeenergie in den Untergrund eingetragen. Dieser Wärmeeintrag lässt sich nach Gleichung 4.18 berechnen.

$$\dot{q}_R = i_R \cdot c_{p,w} \cdot (T_{Regen} - T_{GOK}) \quad (4.18)$$

Hierbei beschreibt  $i_R$  die Regenintensität und  $T_{Regen}$  die Temperatur des Niederschlags, die im Allgemeinen gleich der Temperatur in 2 m über GOK gesetzt werden.

**Schlussfolgerungen** Eine realitätsnahe Abbildung der Wärmetransportvorgänge an der GOK erfordert bei der Simulation von TGTAn die sich im Bereich der SSZ befinden eine genaue Betrachtung der anzusetzenden Randbedingung. Die Berücksichtigung einer Temperaturrandbedingung an der GOK kann dazu führen, dass Temperaturgradienten im Bereich der Tunnelfirste unter- oder überschätzt werden und prognostizierte Wärmeentzugsleistungen in der Realität nicht erreicht werden können. Vor diesem Hintergrund ist die Wahl einer "gedämpften" Randbedingung im Sinne eines Wärmeüberganges zu wählen. Für oberflächennahe Wärmeübertrager oder Systeme welche die GOK bilden, wie z.B. Systeme zur Schnee- und Eisfreihaltung von Fahrflächen, ist die Berücksichtigung einer vollständigen Wärmebilanz gemäß Abbildung 4.2 (siehe S. 32) als Randbedingung abzubilden. Dies wird exemplarisch in Kapitel 5.4.3 gezeigt. Hierbei ist durch die Wahl des Wärmeübergangskoeffizienten sowie die nur abschätzbaren Druck- und Feuchtigkeitsverhältnisse der oberflächennahen Bodenzone mit entsprechenden Unsicherheiten bei der Prognose von Entzugsleistungen zu rechnen. TGTAn und thermisch aktivierte Transportkanäle besitzen in der Regel eine Überdeckung von mehr als 0,5 m, so dass sich die Wärmeströme an der GOK in gedämpfter Form in den Simulationsergebnissen einer TGTA widerspiegeln. An einem eindimensionalen Wärmetransportmodell wird der Temperaturgang der Bodentemperaturen in den Tiefen 5, 10, 20 und 50 cm unterhalb der GOK für den Standort der Klimastation Leinfelden-Echterdingen (siehe Anhang A) unter Berücksichtigung eines Wärmeübergangs ausschließlich infolge Konvektion simuliert. Für die Beschreibung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  wurde ein

vereinfachter Ansatz nach [111] gemäß Gleichung 4.19 zu Grunde gelegt, bei dem  $v_{GOK}$  die Strömungsgeschwindigkeit an der GOK beschreibt.

$$\begin{aligned} \alpha &= 1,8 + v_{GOK} \cdot 4,1 \quad \text{für } v_{GOK} \leq 5m/s \\ \alpha &= 7,3 \cdot v_{GOK}^{0,73} \quad \text{für } v_{GOK} > 5m/s \end{aligned} \quad (4.19)$$

Die Simulationsergebnisse (vgl. Anhang A) zeigen eine mit der Tiefe unterhalb der GOK abnehmende Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Untergrundtemperatur. In einer Tiefe von 0,05 m unter der GOK beträgt die mittlere jährliche Abweichung zwischen simulierter und berechneter Bodentemperatur ca. 0,5 K, in einer Tiefe von 0,5 m führt die Dämpfung durch das Erdreich zu einer mittleren jährlichen Abweichung von 0,2 K. Die Berücksichtigung eines ausschließlich konvektiven Wärmeübergangs an der GOK liefert nach dieser Untersuchung eine ausreichende Genauigkeit zur Simulation einer TGTA besonders vor dem Hintergrund, dass die Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  sowohl für die Konvektion als auch für den latenten Wärmestrom mit großer Variabilität behaftet sind.

## 4.2 Geothermischer Tiefenstrom

Unter dem geothermischen Tiefenstrom wird die Wärmestromdichte  $\dot{q}_{Geo}$  aus dem Erdinneren bezeichnet, die das Resultat aus dem Zerfall radioaktiver Isotope (ca. 50 - 70 %) sowie aus der Restwärme (Arrektionswärme) der Entstehung der Erde (ca. 30 - 50 %) ist. Die Größe dieses Wärmestroms wird in [30] für Europa mit einem Mittelwert von  $61 mW/m^2$  angegeben. Mit zunehmendem Abstand von der GOK in Richtung Erdkern nimmt die Bodentemperatur entsprechend dem geothermischen Gradienten  $\Gamma$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eff}$  des Untergrundes zu [47]. Die Größe des geothermischen Gradienten  $\Gamma$  ist von Temperaturanomalien im Untergrund abhängig und kann für Europa zu  $3 K/100 m$  Tiefe angenommen werden. In Deutschland und Österreich geben Kartenwerke der Geoportale der Landes- bzw. Bundesämter Aufschluss über die zu erwartenden Bodentemperaturen in entsprechenden Tiefenstufen. Den Einfluss von lokalen Unterschieden im geothermischen Tiefenstrom zeigen Untersuchungen an zwei Tunnelprojekten in Chile und Argentinien [58], bei denen Wärmeströme von bis zu  $114 mW/m^2$  festgestellt wurden. Geothermische Wärmeströme für den alpinen Raum der Schweiz liegen nach [100] in einer Größenordnung von  $70 - 80 mW/m^2$  und damit deutlich unter den erkundeten Werten aus [58]. Im Vergleich zum solaren Wärmestrom an der GOK (vgl. Kapitel 4.1), ist der geothermische Tiefenstrom ca. um den Faktor 2500 geringer und leistet damit nur einen untergeordneten Beitrag zum extrahierbaren Gesamtwärmestrom. Werden TGTA unterhalb der SSZ angeordnet und findet keine advective Wärmenachführung über das Grundwasser statt, verändert sich das Temperaturfeld im Boden durch die thermische Bewirtschaftung nachhaltig. Temperaturgradienten werden immer flacher und Energieextraktionsraten werden immer geringer. Unter diesen Randbedingungen wächst jedoch das Potential zur Nutzung der TGTA im Sinne eines thermischen Untergrundspeichers, dessen Funktionsweise in [91] beschrieben wird.

**Schlussfolgerungen** In Kapitel 4.1 wird für die Beschreibung der Wärmetransportvorgänge an der GOK eine Randbedingung 3. Art eingeführt. Um eine in vertikaler Richtung korrekte Problemstellung zu erreichen, ist an dem Modellrand des Berechnungsmodells, der den geothermischen Tiefenstrom repräsentiert, eine Randbedingung 1. Art zu setzen. Hierbei ist der Modellrand mit ausreichender Entfernung von der in der Berechnungsdomain angeordneten Wärmequelle oder Wärmesenke (TGTA) anzuordnen. Als Anhaltswert können in diesem Zusammenhang die Bodentemperaturmessungen am Tunnel Stuttgart-Fasanenhof dienen (vgl. Abb. 2.3 auf S. 20), wobei der thermisch beeinflusste Bereich um einen Tunnel neben der Temperaturleitfähigkeit des Untergrundes vom Betrieb der TGTA abhängt. Eine verbesserte Prognose zur Festlegung der Lage des unteren Modellrandes liefert folglich die Bestimmung des maßgeblichen Temperatureinflussbereiches um die TGTA auf der Basis einer harmonischen Temperaturanregung des Bodenkontinuums durch ein, dem geothermischen Betrieb entsprechendes Signal. Die Festlegung der Größe der Temperaturrandbedingung am unteren Modellrand erfolgt in folgenden Schritten:

- Anwendung von Gleichung 4.12 und Bestimmung der Tiefe der SSZ
- Recherche des geothermischen Gradienten  $\Gamma$  für den betreffenden Standort
- Berechnung der ungestörten Untergrundtemperatur  $\vartheta_{geo}$  am unteren Modellrand über Gleichung 4.20

$$\vartheta_{geo} = \bar{\vartheta}_{amb} + \Gamma \cdot (z_{model} - z_{SSZ}) \quad (4.20)$$

In Gleichung 4.20 sind  $z_{model}$  die Lage des unteren Modellrands und  $z_{SSZ}$  der Bereich der SSZ.

### 4.3 Anthropogene Wärmeströme

Wärmeströme anthropogenen Ursprungs können das Temperaturfeld um eine TGTA verändern und beeinflussen dadurch die extrahierbaren Entzugsleistungen eines Geothermieabsorbers. Besonders im urbanen Umfeld ist mit einer gegenüber dem Umland erhöhten Luft- und Bodentemperatur zu rechnen, die bei der Auslegung einer TGTA zu berücksichtigen ist. Das als „Wärmeinsel“ oder Urban-Heat-Island-Effekt beschriebene Phänomen wird auf veränderte Strahlungsbilanzen und versiegelte Oberflächen im städtischen Bereichen zurückgeführt [129]. In [89] wird ein direkter Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch eines Landes und der Lufttemperatur hergestellt. Bemerkenswert an diesen Untersuchungen ist, dass sich ein rückgehender Energieverbrauch in einer sinkenden Lufttemperatur zeigt. Neben veränderten klimatischen Verhältnissen an der GOK wirken anthropogene Wärmequellen auch direkt im Untergrund, die zu einer Veränderung des Temperaturfeldes führen können. In [83] wurde für 6 Städte in Deutschland ein Zusammenhang zwischen Temperaturanomalien im Untergrund und der Landnutzung bzw. der Bebauung hergestellt. Hiernach ist mit den größten Temperaturanomalien im Bereich der Stadtzentren mit einer hohen Bebauungsdichte bzw.

im Umfeld von Industriestandorten zu rechnen. Mit einer zunehmenden geothermischen Bewirtschaftung im Untergrund nehmen auch die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den geothermischen Wärmeübertragern zu. Dies kann unter dem Einfluss einer Grundwasserströmung zu nachteiligen Auswirkungen für das unterströmige Temperaturfeld führen (Wärme- bzw. Kältefahnenbildung), was bei der Dimensionierung hier angeordneter Geothermieabsorber von Bedeutung sein kann. In [68] wird diskutiert, ob vor allem im innerstädtischen Bereich die Planung der Nutzung der oberflächennahen Geothermie Einzug in die Raumordnungsplanung erhalten muss. So wird z.B. für die Stadt Zürich mit einer Verzehnfachung der Anzahl der Erdwärmesonden bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2012 gerechnet, wodurch sich der mittlere horizontale Sondenabstand von derzeit 90 m auf 30 m reduzieren wird. Daneben kann die Interaktion von unterschiedlichen anthropogenen Wärmequellen im Untergrund unter der Voraussetzung einer entsprechenden Energieleitplanung zu positiven Wechselwirkungen unterschiedlicher Wärmequellen und -senken führen, wie in [20] und [96] für die Interaktion von Erdwärmesonden mit Infrastrukturtunneln gezeigt wird. Bei Infrastrukturtunneln mit Richtungsrohren ist je nach hydrogeologischer Situation mit einer direkten thermischen Beeinflussung der Röhren untereinander zu rechnen. Zur Abschätzung der gegenseitigen Beeinflussung werden im Zuge der Parameterstudie in Kapitel 5.4.1 entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

Die Auswirkungen anthropogener Wärmeströme auf das geothermische Potential einer TGTA lassen sich aufgrund der sehr unterschiedlichen Wärme- bzw. Kältequellen und der unterschiedlichen hydrogeologischen Randbedingungen nicht verallgemeinern und sind im Zuge der Planung einer TGTA von Fall zu Fall entsprechend zu erfassen. Erhöhte Luft- und Bodentemperaturen im innerstädtischen Bereich werden in den Klimadaten der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes [38] bereits berücksichtigt.

## 4.4 Wärmetransport im porösen Medium Boden

**Thermodynamische Stoffparameter** Die hydraulischen und thermischen Eigenschaften des Mehrphasenmediums Boden werden durch das gleichzeitige Vorhandensein der Phasen Luft und/oder Wasser und der Festsubstanz auf engstem Raum sowie der Struktur des Korngerüstes und die Ausbildung des Porenraumes bestimmt. Darüber hinaus tragen die thermischen Eigenschaften der einzelnen Konstituenten und deren volumetrisches Verhältnis zur Temperaturleitfähigkeit  $a$  des Kontinuums bei. Innerhalb des Bodens treten die in Abbildung 4.4 gezeigten Wärmetransportmechanismen auf, die die Temperaturverteilung innerhalb des Kontinuums bestimmen.

In den meisten Anwendungen im Bereich der Wärmeübertragung wird für das poröse Medium thermisches Gleichgewicht zwischen den Konstituenten vorausgesetzt. In [85] wird gezeigt, dass für den Fall eines schnellen Wärmeeintrags in das poröse Medium diese Annahme zu Fehlern in der Berechnung des Temperaturfeldes führt. Aus dem Bereich der Geothermie sind aus der aktuellen Literatur keine Untersuchungen bekannt, die Hinweise darauf geben, dass bei den relativ langsam ablaufenden Wärmetransportprozessen im Boden die Annahme des thermischen Gleichgewichtes zu einer Über- oder Unterschätzung möglicher Wärme- bzw. Kälteextraktionsraten führt. Aus diesem Grund

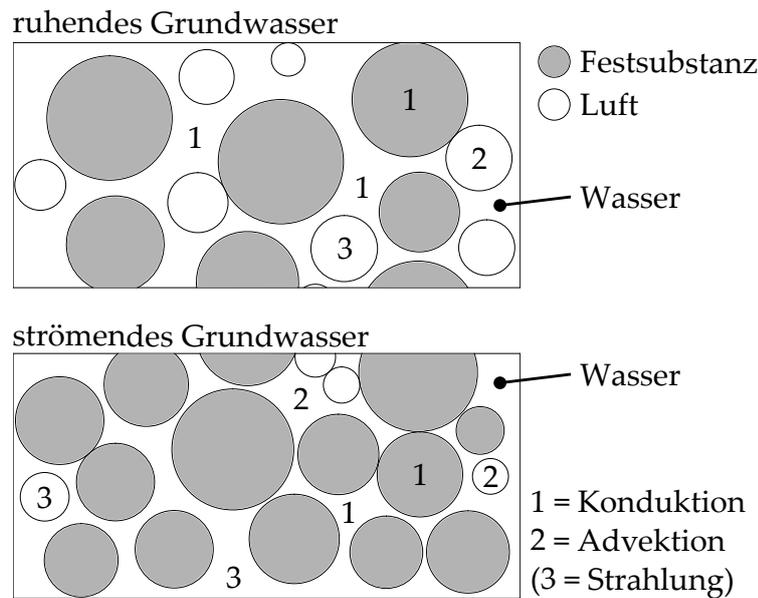


Abbildung 4.4: Wärmetransportmechanismen im Mehrphasenmedium Boden

wird im Rahmen dieser Arbeit von thermischem Gleichgewicht zwischen den Konstituenten ausgegangen. Sämtliche Wärmetransportvorgänge werden daher für das Kontinuum bestehend aus Feststoff und Fluid mittels eines Mischungsansatzes betrachtet. Die Eigenschaften der Mischung werden im Wesentlichen durch die Porosität  $\phi$  (Porenanteil  $n$ ) und die Permeabilität  $K$  des anstehenden Untergrundes bestimmt. Die thermischen Stoffkennwerte werden in diesem Zusammenhang als effektive Werte beschrieben.

$$n = \frac{V_p}{V} \quad (4.21)$$

$$K = \frac{k_f \cdot \eta}{\rho \cdot g} \quad (4.22)$$

**Wärmetransport Kenngrößen** Zur Charakterisierung des Wärmetransportes innerhalb des Bodens dient die dimensionslose Kennzahl  $Pe$ , die den advektiven Wärmetransport mit dem Wärmetransport durch Wärmeleitung ins Verhältnis setzt (siehe Gleichung 4.23). Hierin sind  $d_p$  die charakteristische Porengröße und  $D_e$  der Dispersionskoeffizient [63].

$$Pe = \frac{v_f \cdot d_p}{D_e} \quad (4.23)$$

Für  $Pe < 1$  dominiert der Transport durch Wärmeleitung, für  $Pe > 10$  dominiert der advektive Wärmetransport. Im Bereich zwischen  $1 < Pe < 10$  sind beide Transportprozesse von Bedeutung. In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen der  $Pe$ -Zahl [63], die z.T. der Beschreibung des Stofftransportes im Boden dienen und nicht direkt auf den Wärmetransport übertragbar sind. Der Zusammenhang gemäß Gleichung

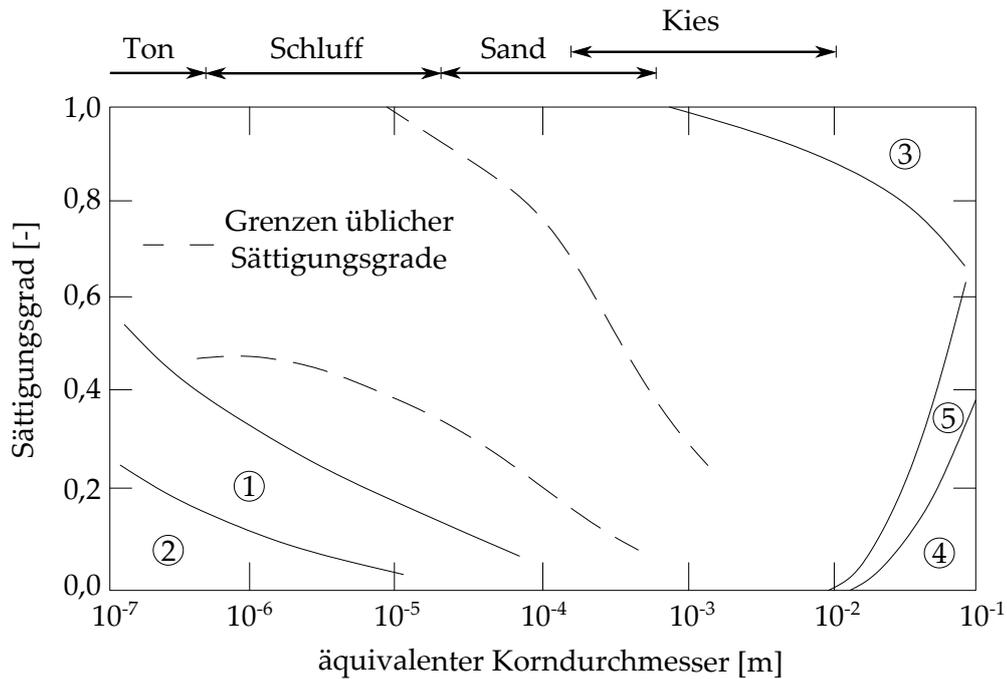


Abbildung 4.5: Mechanismen des Wärmetransports in Böden, 1 = thermische Umverteilung von Feuchte, 2 = Dampfdiffusion infolge Feuchteunterschiede, 3 = Freie Konvektion im Porenwasser, 4 = Freie Konvektion in der Porenluft, 5 = Wärmestrahlung, nach [44]

4.24 interpretiert den Zusammenhang für den Wärmetransport nach [14].

$$Pe = \rho_f \cdot c_{p,f} \cdot v_f \cdot L \cdot \frac{1}{\lambda_f} \quad (4.24)$$

Unter Berücksichtigung des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$  für die charakteristische Länge  $L$  und einem Temperaturbereich  $2^\circ C < T_f < 20^\circ C$ , kann die Filtergeschwindigkeit  $v_{f,a}$ , ab der advektiver Wärmetransport im Boden maßgebend wird, in Abhängigkeit des mittleren Korndurchmessers beschrieben werden. Hierzu sind in der nicht Einheiten reinen empirischen Gleichung 4.25  $T_f$  in  $[\circ C]$  und  $d_{50}$  in [m] zu berücksichtigen.

$$v_{f,a} = \frac{0,02 \cdot T_f + 3,08}{d_{50}} \quad (4.25)$$

Auch in porösen Medien kommt es zu Strömungen infolge einer temperaturinduzierten Dichteänderungen. Zur Charakterisierung dieser Strömung wird aufbauend auf der bereits beschriebenen  $Ra$ -Zahl in [42] die um Darcy modifizierte Rayleighzahl  $Ra_D$  nach Gleichung 4.26 eingeführt. Freie Konvektion im Boden ist in einem Bereich von  $5 < Ra_D < 50$  zu berücksichtigen.

$$Ra_D = \frac{g \cdot K \cdot l_K}{v_f \cdot a} \cdot \gamma_{th} \cdot (T_w - T_f) \quad (4.26)$$

Hierbei ist  $l_K$  die maßgebende Länge und  $\gamma_{th}$  der kubische thermische Ausdehnungskoeffizient.

#### 4.4.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eff}$  des Mehrphasenmediums Boden wird durch den Wassergehalt, die Dichte, die Mineralbestandteile der Festsubstanz sowie die Korngröße und -verteilung beeinflusst. Es existieren analytische und empirische Ansätze um die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes abzuschätzen. [136] gibt eine Übersicht über die existierenden Modelle und zeigt, dass neben dem Sättigungsgrad  $S_r$  der Quarzgehalt der Festsubstanz den größten Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit besitzt. Der Quarzgehalt bestimmt darüber hinaus die für die Wahl der Tunnelvortriebsart und -technik maßgebliche Abrasivität des anstehenden Bodens (vgl. [69]). Vor diesem Hintergrund liegt bei der Planung von TGTAn, anders als bei üblichen Wärmeübertragern der Geothermie wie z.B. Erdwärmesonden, eine zusätzliche Information zur Abschätzung von  $\lambda_{eff}$  vor. Am Beispiel der Geologie am Tunnel Jenbach in Österreich lässt sich zeigen, dass mit dem Zusammenhang nach [44] (vgl. Gleichung 4.27) eine gute Übereinstimmung mit den tabellierten Wärmeleitfähigkeiten gemäß [125] gefunden werden kann, während unter Annahme einer volumetrisch gemittelten Wärmeleitfähigkeit nach Gleichung 4.28 diese deutlich überschätzt wird.

$$\lambda_{eff} = \lambda_s \cdot \left[ 1 - \frac{n_{ges} \cdot (1 + 2 \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_s}) \cdot (1 - \frac{\lambda_f}{\lambda_s})}{n_{ges} \cdot (1 - \frac{\lambda_f}{\lambda_s}) + 3 \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_s}} \right] \quad (4.27)$$

$$\lambda_{eff} = (1 - n_f) \cdot \lambda_s + n_f \cdot \lambda_f \quad (4.28)$$

Zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eff}$  wird ein Porenanteil  $n$  nach [64] von 0,25 zu Grunde gelegt. Unter der Berücksichtigung einer Wärmeleitfähigkeit für das strömende Fluid (Wasser) von  $\lambda_f = 0,58 \text{ W/mK}$  und einer Gesteinsleitfähigkeit  $\lambda_s$  gemäß Tabelle 4.6 ergibt sich ein  $\lambda_{eff}$  nach Gleichung 4.27 zu  $2,09 \text{ W/mK}$  bzw. nach Gleichung 4.28 zu  $2,77 \text{ W/mK}$ . Vergleicht man die ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit mit den in [125] tabellierten Werten für wassergesättigte Kiese (i.M.  $2,05 \text{ W/mK}$ ), liegt die nach Gleichung (4.27) ermittelte Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem tabellierten Mittelwert leicht erhöht, der nach Gleichung (4.28) ermittelte Wert außerhalb der aufgezeigten Bandbreite. Der Zusammenhang nach [44] scheint folglich gut geeignet zu sein, die effektive Wärmeleitfähigkeit auf der Basis der aufgenommenen Petrographie für den Tunnelvortrieb abschätzen zu können.

Für transiente Problemstellungen bildet die volumetrische Wärmekapazität  $c_v$  gemäß Gleichung 4.29 die zweite thermische Bodeneigenschaft.

$$c_v = \rho \cdot c_p \quad (4.29)$$

Die Ermittlung von  $c_p$  erfolgt für gesättigte Böden nach [1] auf der arithmetischen Mittlung der jeweiligen spezifischen Wärmekapazitäten der einzelnen Konstituenten gemäß Gleichung 4.30, wobei hier die Indizes  $w$  für Wasser und  $s$  für Feststoff stehen.

| 19Ca                              |        |             |                          | 19B                               |        |             |                          |
|-----------------------------------|--------|-------------|--------------------------|-----------------------------------|--------|-------------|--------------------------|
| Konfraktion ≥ 2.0 mm (2/3-Gew.-%) |        |             |                          | Konfraktion ≥ 2.0 mm (2/3-Gew.-%) |        |             |                          |
|                                   | Gew.-% | λ<br>[W/mK] | λ <sub>m</sub><br>[W/mK] |                                   | Gew.-% | λ<br>[W/mK] | λ <sub>m</sub><br>[W/mK] |
| Gneis                             | 39%    | 2.9         |                          | Gneis                             | 31%    | 2.9         |                          |
| Karbonat                          | 52%    | 2.8         |                          | Karbonat                          | 58%    | 2.8         |                          |
| Amphibolit                        | 3%     | 2.0         |                          | Amphibolit                        | 4%     | 2.0         |                          |
| Schiefer                          | 2%     | 2.0         |                          | Schiefer                          | 2%     | 2.0         |                          |
| Quarz                             | 5%     | 6.0         | 3                        | Quarz                             | 5%     | 6.0         | 2.9                      |
| Konfraktion < 2.0 mm (1/3 Gew.-%) |        |             |                          | Konfraktion < 2.0 mm (1/3 Gew.-%) |        |             |                          |
|                                   | Gew.-% | λ<br>[W/mK] | λ <sub>m</sub><br>[W/mK] |                                   | Gew.-% | λ<br>[W/mK] | λ <sub>m</sub><br>[W/mK] |
| Schichtsilikat                    | 7%     | 2           |                          | Schichtsilikat                    | 7%     | 2           |                          |
| Quarz                             | 41%    | 6           |                          | Quarz                             | 37%    | 6           |                          |
| Feldspat                          | 14%    | 2           |                          | Feldspat                          | 19%    | 2           |                          |
| Kalzit                            | 17%    | 5.5         |                          | Kalzit                            | 15%    | 5.5         |                          |
| Dolomit                           | 21%    | 4           | 4.7                      | Dolomit                           | 21%    | 4           | 4.4                      |
|                                   |        |             | λ <sub>s</sub> = 3.6     |                                   |        |             | λ <sub>s</sub> = 3.4     |

Abbildung 4.6: Wärmeleitfähigkeit der Festschubstanz der Innschotterfazies 19Ca und 19B arithmetisch gemittelt über die Mineral- bzw. Gesteinsanteile nach [64]

$$c_{p,eff} = \frac{\rho_w \cdot V_w \cdot c_{p,w} + \rho_s \cdot V_s \cdot c_{p,s}}{\rho_w \cdot V_w + \rho_s \cdot V_s} \quad (4.30)$$

Im Allgemeinen bleibt die Gasphase (Luft) aufgrund der zu vernachlässigenden Wichte unberücksichtigt. Für Böden mit einem hohen organischen Anteil erweitert sich die Gleichung 4.31 um den entsprechenden Term für das organische Material. Unter Berücksichtigung der Definition des Wassergehalts  $w$  ( $w = m_w/m_s$ ) und der Trockendichte  $\rho_d$  lässt sich die volumetrische Wärmekapazität  $c_v$  nach Gleichung 4.31 berechnen.

$$c_{v,eff} = \rho_d \cdot c_{p,s} + \rho_d \cdot w \cdot c_{p,w} \quad (4.31)$$

In [1] konnte für Sand- und Tonböden eine gute Übereinstimmung zwischen dem Zusammenhang nach Gleichung 4.31 und den an unterschiedlichen Bodenproben durchgeführten Messungen nach der Kalometriemethode hergestellt werden.

#### 4.4.2 Einfluss der Grundwasserströmung

Die Grundwasserströmung und damit der Wärmetransport durch Advektion im Mehrphasenmedium Boden hat einen entscheidenden Einfluss auf die mögliche Energieextraktion einer TGTA. Neben der absoluten Grundwassertemperatur sind die Filtergeschwindigkeit  $v_f$ , die Anströmrichtung des Grundwassers auf den thermisch aktivierten Tunnelabschnitt sowie der Wärmeübergang vom Aquifer zur Tunnelschale von wesentlicher Bedeutung.

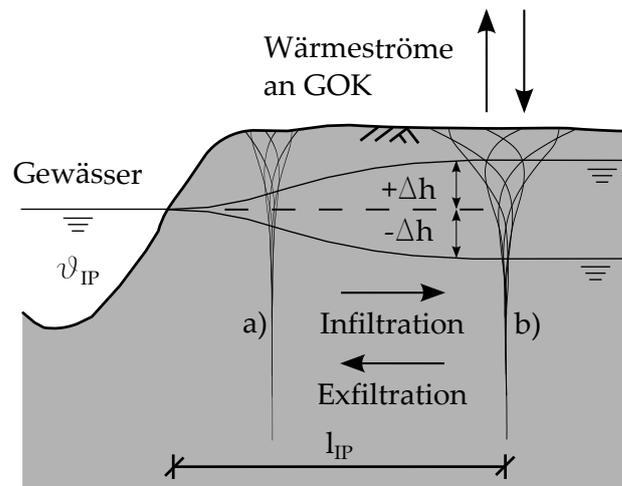


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der Temperaturentwicklung im Boden unter dem Einfluss einer Grundwasserströmung in Gewässernähe, a) Bodentemperatur infolge Infiltration/Exfiltration, b) ungestörte Bodentemperatur

**Grundwassertemperatur** Die absolute Grundwassertemperatur entwickelt sich im Boden in Abhängigkeit von der Entfernung  $l_{ip}$  und der Temperatur des Wassers am Infiltrationspunkt  $\vartheta_{ip}$  (vgl. Abb. 4.7).

Untersuchungen in [18] zeigen tiefenaufgelöste Grundwassertemperaturprofile im Unterstrombereich von 8 repräsentativen Baggerseen Baden-Württembergs. Der Einfluss eines offenen Gewässers auf die Grundwassertemperatur wird hiernach für  $l_{ip} > 200 \text{ m}$  bei Filtergeschwindigkeiten  $1,5 < v_f < 6,5 \text{ m/d}$  als vernachlässigbar beschrieben. Die aufgenommenen Temperaturtiefenprofile zeigen außerhalb des Infiltrationseinflussbereiches das charakteristische Temperaturprofil im Bereich der SSZ. Bei der Simulation von TGTAn in strömendem GW kann davon ausgegangen werden, dass die ungestörte Grundwassertemperatur gleich der ungestörten Baugrundtemperatur ist, also ein thermisches Gleichgewicht zwischen fester und fluider Phase vorliegt. Für TGTAn, die sich im direkten Einflussbereich eines Gewässers befinden ( $l_{ip} < 200 \text{ m}$ ), kann unter Umständen eine über den Jahresgang tiefenunabhängige Grundwassertemperatur vorliegen (vgl. Kapitel 5.2 Tunnel Jenbach). Die absolute Grundwassertemperatur variiert für diesen Fall saisonbedingt, je nachdem ob das offene Gewässer in den Boden infiltriert, oder das Grundwasser in das offene Gewässer exfiltriert. Durch den advektiven Wärmetransport bei der Simulation eines an die Grundwasserströmung angekoppelten Wärmetransportes, kommt der Wahl der anzusetzenden Randbedingung an dem Modellrand, an dem das GW in das Berechnungsgebiet „einströmt“, eine wesentliche Bedeutung zu. Ein Modell, das diese Randbedingung beschreibbar macht, wird in Kapitel 5.3 beschrieben.

**Filtergeschwindigkeit und Anströmrichtung** Neben der Grundwassertemperatur ist die Filtergeschwindigkeit  $v_f$  die treibende Größe für den advektiven Wärmetransport

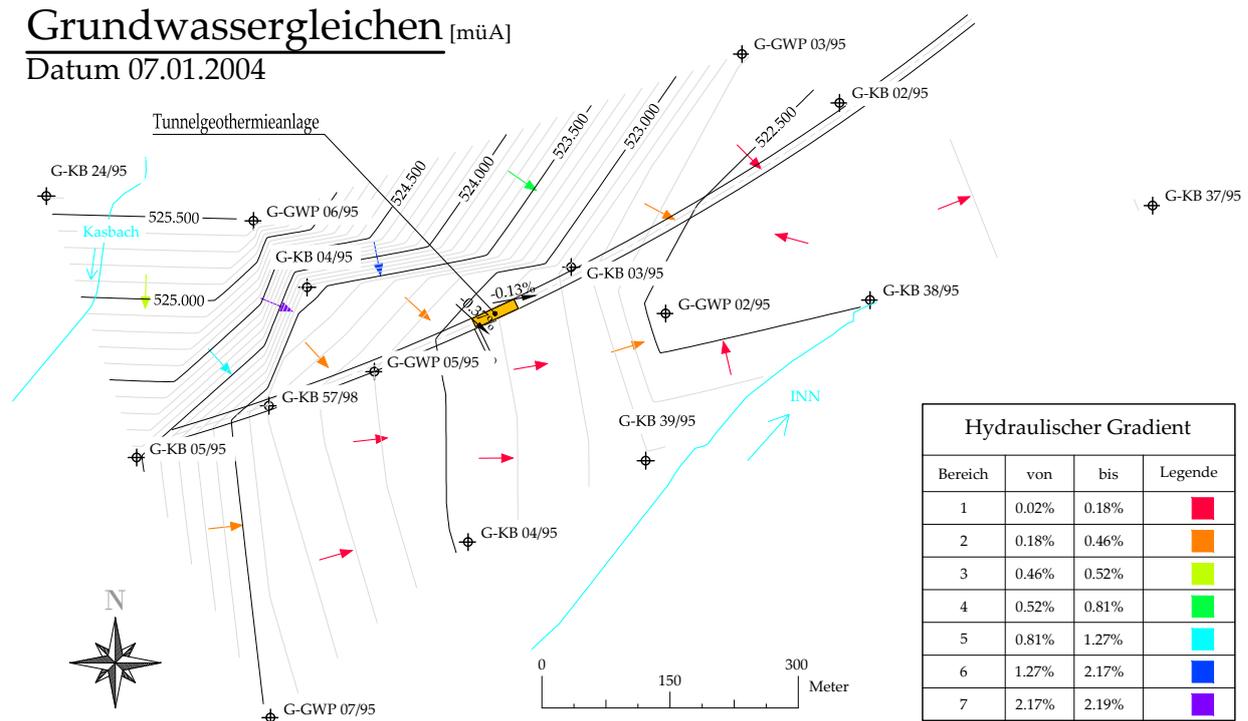


Abbildung 4.8: Tunnel Jenbach: Messstellennetz und Grundwassergleichen Januar 2004

im Boden. Nach dem Gesetz von Darcy ist die Filtergeschwindigkeit  $v_f$  direkt proportional zum hydraulischen Gradienten  $i$  und beschreibt einen flächenbezogenen Durchfluss (Volumenstromdichte), dessen Proportionalitätsfaktor der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  ist.

$$v_f = k_f \cdot i \quad (4.32)$$

Im Allgemeinen wird bei der Untersuchung von Geothermieabsorbern, die unter dem Einfluss eines advektiven Wärmetransportes stehen, eine quasi stationäre Grundwasserströmung vorausgesetzt. In [8] wurde auf der Basis von numerischen Studien gezeigt, dass Tidenschwankungen erhebliche Auswirkungen für das lokale Grundwassergeschwindigkeitsfeld nahe des Infiltrationspunktes haben können. Der Einfluss von Wasserstandsänderungen auf das Grundwasserregime wird durch die Auswertung der Grundwassergleichen im Nahbereich des Tunnel Jenbach bestätigt. Die in Abbildung 4.8 dargestellten Pfeile geben die Grundwasserfließrichtung, ihre Farbkennung das errechnete hydraulische Gefälle wider. Im Nahbereich des Flusses Inn erkennt man im Monat Januar eine Infiltration in den Uferbereich, während sich im übrigen Bereich eine flussparallele Strömung ausbildet. In den Sommermonaten (siehe Anhang B.1) kehrt sich die Strömung im Nahbereich um und der Grundwasserstrom ist in Richtung Inn gerichtet. Über den Jahresgang betrachtet, ändert sich im Bereich der TGTA nicht nur die Grundwasserfließrichtung, sondern auch das hydraulische Gefälle.

Die Abbildung 4.9 zeigt die Auswertung der zeitlichen Änderung des Anströmwinkels und der Filtergeschwindigkeit im Bereich der TGTA getrennt nach den Bereichen

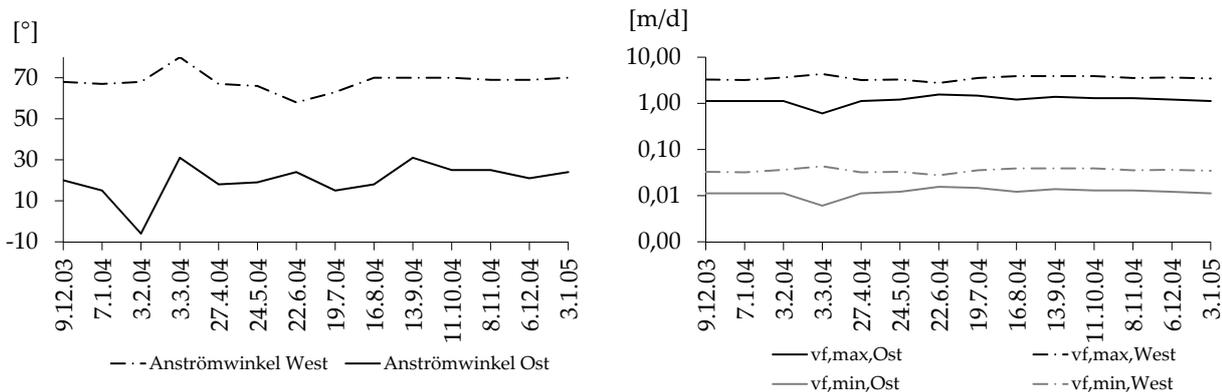


Abbildung 4.9: Grundwasserströmungsregime im Bereich der TGTA Jenbach, links: Jahreszeitlicher Verlauf der Anströmwinkel, rechts: Bandbreite möglicher Filtergeschwindigkeiten  $v_f$

Ost und West entsprechend der Angaben gemäß Anhang B.1.

Hierbei fällt auf, dass, obwohl die TGTA nur eine Längenausdehnung von ca. 50 m besitzt, die Strömungsverhältnisse zwischen den Bereichen Ost und West stark variieren. So werden z.B. im Monat Februar gegenläufige Strömungen bezogen auf den Verlauf der Tunnelachse vermutet. Zur endgültigen Beurteilung der Strömungsverhältnisse im Bereich der TGTA Jenbach ist das vorhandene Messstellennetz zu grob und die zeitliche Auflösung der Messwerte nicht hinreichend.

Dem Anströmwinkel  $\beta_{GW}$  an eine TGTA kommt eine besondere Bedeutung zu, die bei vertikal angeordneten Linienquellen- oder senken, wie z.B. bei Erdwärmesonden, vernachlässigt werden kann. Betrachtet man zunächst die Potentialfunktion gemäß Gleichung 4.33, so beschreibt diese die Umströmung eines quer angeströmten Zylinders als Spezialfall der Potentialtheorie (Darcy-Strömung). Für die Tangentialkomponente der Geschwindigkeit gilt die Gleichung 4.34.

$$\Phi(r, \Theta) = u_\infty \left( r + \frac{R^2}{r} \right) \cos \Theta \quad (4.33)$$

$$u_\Theta(r, \Theta) = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} = -u_\infty \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \sin \Theta \quad (4.34)$$

Die Auswertung der Gleichung 4.34 führt zu einer sinusförmigen Geschwindigkeitsverteilung um den Tunnelumfang. Mit immer flacher werdendem Anströmwinkel  $\beta_{GW}$  erfolgt eine Dämpfung der maximalen Geschwindigkeitsordinate, bis bei einer vollständigen Parallelströmung die ungestörte Filtergeschwindigkeit  $v_f$  erreicht ist. Die absolute Strömungsgeschwindigkeit sowie die Geschwindigkeitsverteilung hat einen direkten Einfluss auf das sich entwickelnde Temperaturfeld um und entlang des umströmten und temperierten Tunnels (vgl. Abb. 4.10 rechts). Das sich einstellende Temperaturfeld bestimmt letztendlich die auf den Tunnel wirkenden Wärmeströme und damit die Möglichkeit, Wärme- bzw. Kälteenergie von der TGTA zum umgebenden Boden zu transportieren. Die Effekte auf die möglichen Wärmeströme einer unter verschiedenen Winkeln

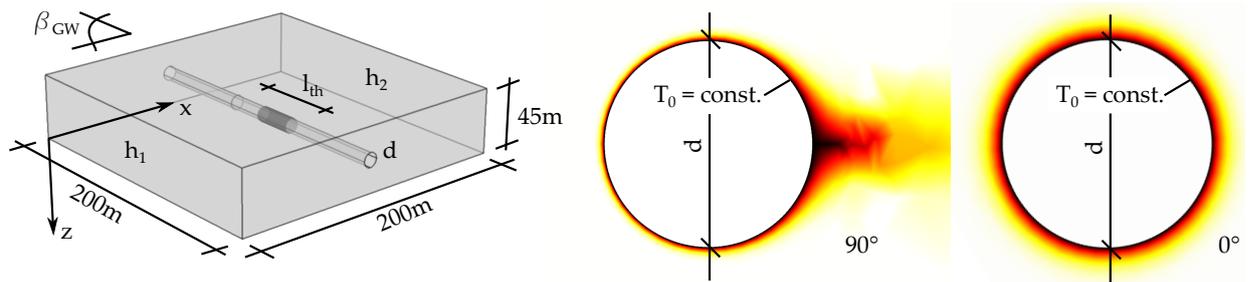


Abbildung 4.10: links: Isometrische Darstellung des Berechnungsmodells zur Untersuchung des Einflusses einer Schräganströmung auf eine TGTA, rechts: Temperaturverteilung um eine TGTA unter senkrechter ( $90^\circ$ ) und paralleler ( $0^\circ$ ) Anströmung

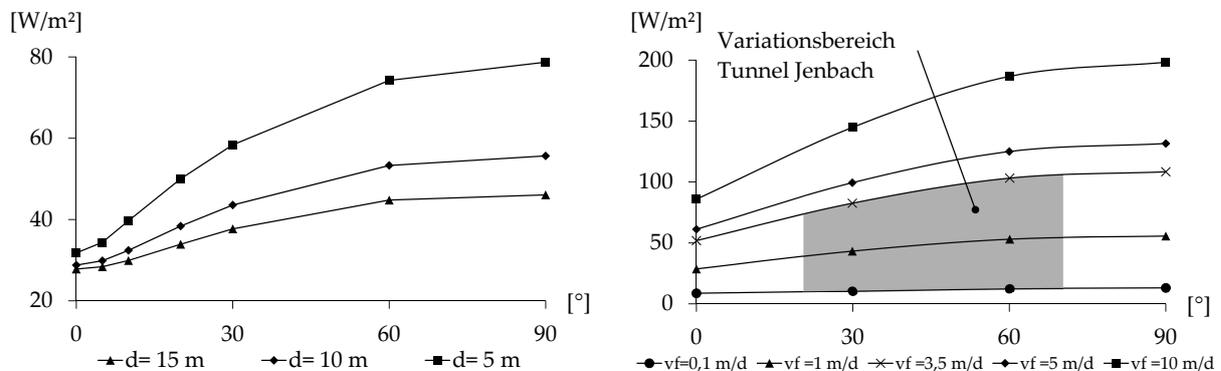


Abbildung 4.11: links: mittlere Wärmestromdichte für unterschiedliche Tunneldurchmesser und Anströmwinkel bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $v_{f,\infty} = 1\text{ m/d}$ , rechts: Wärmestromdichte in Abhängigkeit des Anströmwinkels für unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten für einen Tunneldurchmesser von  $10\text{ m}$

angeströmten TGTA, werden auf der Basis des in Abbildung 4.10 links gezeigten Modells in [24] untersucht.

Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen mit dem Programm COMSOL zeigen, dass bei Anströmwinkeln  $\beta_{GW}$  zwischen  $90^\circ$  und  $60^\circ$  der Einfluss der Schräganströmung auf die extrahierbare Entzugsleistung einer TGTA vernachlässigt werden kann, was sich mit den Angaben aus [121] zu schräg angeströmten Zylindern deckt. Mit abnehmendem Anströmwinkel  $\beta_{GW}$  vergleichmäßigt sich die Wärmestromdichte entlang des Tunnelumfangs, gleichzeitig nimmt der Einfluss der thermischen Einlaufstrecke entlang des Tunnels zu. Dies führt zu einer nahezu nichtlinearen Abhängigkeit der mittleren Wärmestromdichte über die Tunneloberfläche in Abhängigkeit unterschiedlicher Tunneldurchmesser und Filtergeschwindigkeiten (vgl. Abb. 4.11).

In der Abbildung 4.11 rechts ist der Bereich möglicher Wärmestromdichten eingetragen, der sich für die in Abbildung 4.9 gezeigten Strömungsverhältnisse an der TGTA Jenbach ergibt. Dieser reicht von ca.  $12 < \dot{q} < 100\text{ W/m}^2$  und streut somit über eine große

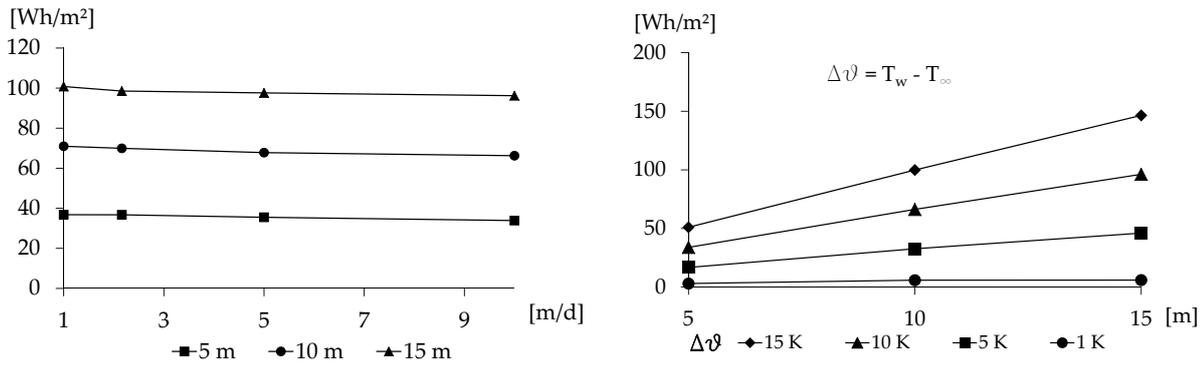


Abbildung 4.12: Spezifische Wärmestromstärke, links: für unterschiedliche Filtergeschwindigkeiten und Tunneldurchmesser, rechts: für unterschiedliche  $\Delta\vartheta$  zwischen Tunneloberfläche  $T_w$  und Aquifer  $T_\infty$

Bandbreite. Der generelle nichtlineare Zusammenhang zwischen der Wärmestromdichte  $\dot{q}$  und dem Tunnelradius  $d$ , der Anströmrichtung  $\beta_{GW}$  und der Filtergeschwindigkeit  $v_f$  lässt sich alleine auf der Basis des Strömungsfeldes nicht erklären, da die Potentialtheorie keinerlei Trägheitseffekte berücksichtigt und die Stromlinien einen annähernd elliptischen (linearen) Verlauf um den Tunnel darstellen. Entscheidend für Wärmetransport infolge der geometrischen Effekte ist die Kontaktzeit  $t_c$  (vgl. Gleichung 4.35) des Fluids mit dem umströmten Körper, die durch die lokale Strömungsgeschwindigkeit und die Länge  $U_e$  der Stromlinie bestimmt wird.

$$t_c = \frac{\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{d}{\sin \beta_{GW}} + d \right) \cdot \pi \cdot \left( 1 + \frac{3\lambda^2}{10 + \sqrt{4 - 3\lambda^2}} \right)}{v_{f,\infty}} \quad (4.35)$$

$$\lambda = \frac{\frac{d}{\sin \beta_{GW}} - d}{\frac{d}{\sin \beta_{GW}} + d}$$

Bei einer gleichbleibenden Anströmgeschwindigkeit ergeben sich für kleine Tunnelradius kleine Kontaktzeiten und umgekehrt. Anders verhält es sich mit der extrahierbaren Wärmeenergie. Hier liefern kleine Tunnelradius größere mittlere Wärmestromdichten als große Tunnelradius. Aus diesem Grund wird die reziproke Kontaktzeit  $\frac{1}{t_c}$  eingeführt. Bezieht man nun die Wärmestromdichte auf die reziproke Kontaktzeit, erhält man einen linearen Zusammenhang zwischen Wärmestromstärke in  $Wh/m^2$  und dem Tunnelradius bzw. der Filtergeschwindigkeit (vgl. Abb. 4.12 links). Unter der Wärmestromstärke ist die spezifische Wärmearbeit zu verstehen, die während der Kontaktzeit des Grundwassers an der Tunneloberfläche geleistet wird.

Die Ergebnisse numerischer Vergleichsberechnungen unter Variation der Wärmeleitfähigkeit des Mehrphasenmediums Boden im Bereich üblicher effektiver Wärmeleitfähigkeiten  $0,4 < \lambda_{eff} < 5,0 W/mK$  haben gezeigt, dass unter Ansatz von Filtergeschwindigkeiten  $v_f \geq 1,0 m/d$  die Änderung der Wärmeleitfähigkeit einen vernachlässigbaren Einfluss (max. 9%) auf den extrahierbaren Wärmestrom besitzt. Somit ist die extrahier-

bare Wärmestromdichte lediglich von der Temperaturspreizung  $\Delta\vartheta$  zwischen der Tunneloberflächentemperatur und der Aquifertemperatur abhängig (vgl. Abb. 4.12 rechts). Diesen Zusammenhang beschreibt die lineare Gleichung 4.36 unter Vernachlässigung sämtlicher thermischer Einlaufeffekte.

$$\dot{q}_{(\Delta\vartheta, d, v_f)} = 24 \cdot \left( \frac{((0,6604 \cdot \Delta\vartheta - 0,3693) \cdot d_{tunnel} + 0,1194 \cdot \Delta\vartheta + 1,926) \cdot v_f}{U_e} \right) \quad (4.36)$$

Wird für die Länge der Stromlinie  $U_e$  der elliptische Verlauf bei Schräganströmung zu Grunde gelegt, werden die extrahierbaren Wärmeströme bei kleinem  $l_{th}/l_{tunnel}$ -Verhältnis eher überschätzt.

### 4.4.3 Wärmeübergang Tunnelschale/Boden

Die Motivation zur Untersuchung des Wärmeübergangs von einem durch Grundwasser um- oder überströmten Bauteil zu einem Aquifer gründet sich zum einen auf die Untersuchungen in [26], in denen gezeigt wird, dass die Temperaturen im Nahfeld sowie innerhalb einer Erdwärmesonde für rein konduktiven Wärmetransport im Boden durch numerische Simulation gut reproduzierbar sind, sich für advektiven Wärmetransport jedoch deutliche Unterschiede zwischen Messung und Simulation einstellen. Darüber hinaus wird in [32] bei der numerischen Simulation eines Geothermal Response Test an einem Energiepfahl festgestellt, dass die prognostizierten Wärmeströme in der Realität nicht erreicht wurden, was auf einen veränderten Kontakt zwischen Pfahl und Boden zurückgeführt wird. Durch das Auffahren eines Tunnels wird der Bodenbereich um den Tunnel in seiner Struktur verändert. Dieser auch als „excavation damage zone“ beschriebene Bereich lockert sich bei bergmännischen Vortrieben in der Regel auf, was in [132] mit einer Zunahme des  $k_f$ -Wertes von  $1 \cdot 10^{-9} m/s$  auf  $1 \cdot 10^{-3} m/s$  dokumentiert wird (Vortrieb im unausgelaugten Gipskeuper). Im Gegensatz hierzu kann bei einem maschinellen Hydroschildvortrieb eine deutliche Zunahme der Lagerungsdichte im Bereich der Ortsbrust festgestellt werden [110] (Vortrieb im gesättigten Kies). Der Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte und der hydraulischen Durchlässigkeit für technische Schüttungen wird in der Schätzformel von Fair & Hatch (zitiert nach [92]) deutlich (siehe Gleichung 4.37).

$$k_f = \Theta \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_w^2 \quad (4.37)$$

Hierin ist  $\Theta$  ein Proportionalitätsfaktor zur Berücksichtigung der Fluideigenschaften und  $d_w$  der wirksame Korndurchmesser. Durch den Tunnelvortrieb ändert sich die hydraulische Durchlässigkeit innerhalb der „excavation damage zone“ und damit das Strömungsregime um den Tunnel. Dies beeinflusst direkt den Wärmeübergang vom Tunnel zum Aquifer. Darüber hinaus bilden sich zwischen über- und umströmten Bauteilen eines Wärmeübertragers sogenannte Strömungsgrenzschichten aus, die den wandnahen Strömungszustand und damit den Wärmeübergang vom Bauteil zum Fluid maßgeblich bestimmen. Diese Grenzschichtphänomene werden auch am Übergang eines Wärme-

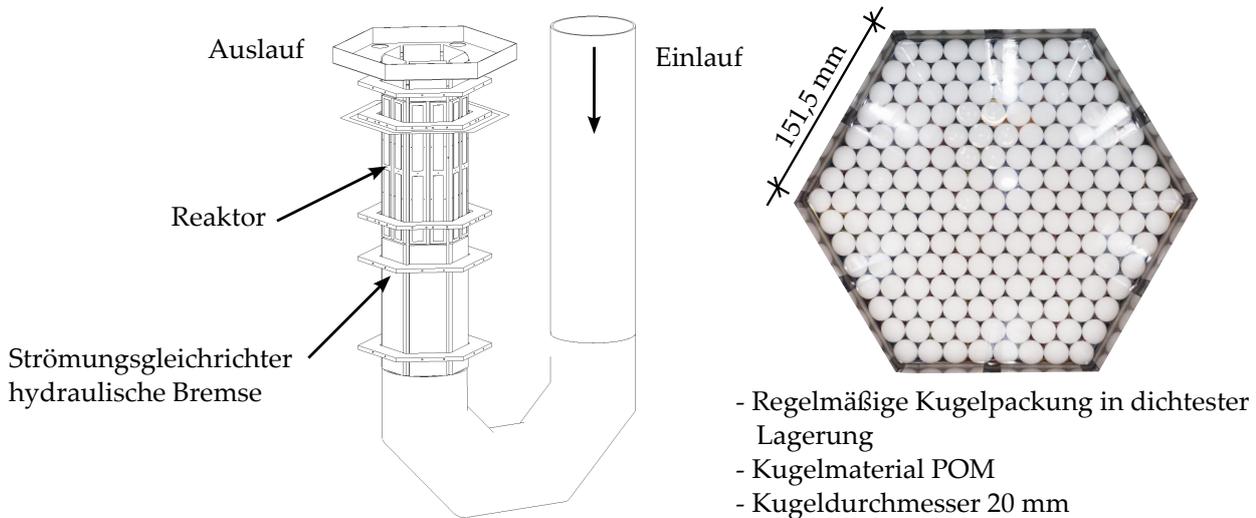


Abbildung 4.13: Versuchsstand zur Untersuchung des Wärmeübergangs vom Aquifer an einen um- oder überströmten Geothermieabsorber

übertragers der Geothermie (Erdwärmesonde, TGTA) zum anstehenden Aquifer vermutet. Der derzeitige Stand der Wissenschaft berücksichtigt weder den Einfluss aus einer veränderten Permeabilität in der „excavation damage zone“ noch ggf. auftretende Grenzschichteffekte.

Untersuchungen in Festbettreaktoren [66] zeigen bereits für technische Kugelschüttungen, dass die in der Literatur dokumentierten Modelle die sich über den Radius des Festbettreaktors ändernde Porosität der Schüttung nur unzureichend beschreiben können. In [134] wird auf der Basis experimenteller Untersuchungen an unterschiedlichen luftdurchströmten Partikelpackungen gezeigt, dass sowohl die Partikelform als auch die Anordnung der Partikel in der Packung wesentliche Auswirkungen auf die Eigenschaften des Strömungsfeldes und damit den Wärmeübergang haben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Versuchsstand zur Beschreibung des Wärmeübergangs vom Aquifer zu einem im Boden angeordneten Wärmeübertrager entwickelt und erste Indexversuche durchgeführt.

Die Abbildung 4.13 links zeigt eine isometrische Darstellung des Versuchsaufbaus, bei dem durch ein Kunststoffrohr DN 300 Wasser zu einer hydraulischen Bremse und einem Strömungsgleichrichter geführt wird und danach im Bereich des Reaktors ein poröses Medium durchströmt (siehe Abb. 4.13 rechts). Dieses wird in der aktuellen Versuchsreihe durch eine regelmäßige Kugelpackung (Material: Polyoxymethylen (POM)) mit einem Durchmesser von  $d = 20 \text{ mm}$  in dichtester Lagerung gebildet. Für die gewählte Kugelpackung ergibt sich nach Gleichung 4.37 und Anpassungen nach [92] ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f = 0,65 \text{ m/s}$ . An den Seiten des Reaktors wird über die gesamte Reaktorfläche eine konstante und über die Fläche gleichmäßige Wärmestromdichte aufgeprägt. Im Bereich der Reaktorwände sind entlang der Strömungsrichtung Temperatursensoren PT-1000 angeordnet, um die Oberflächentemperatur der inneren Reaktorwände zu messen. Über diese Versuchsanordnung ist es möglich, auf den loka-

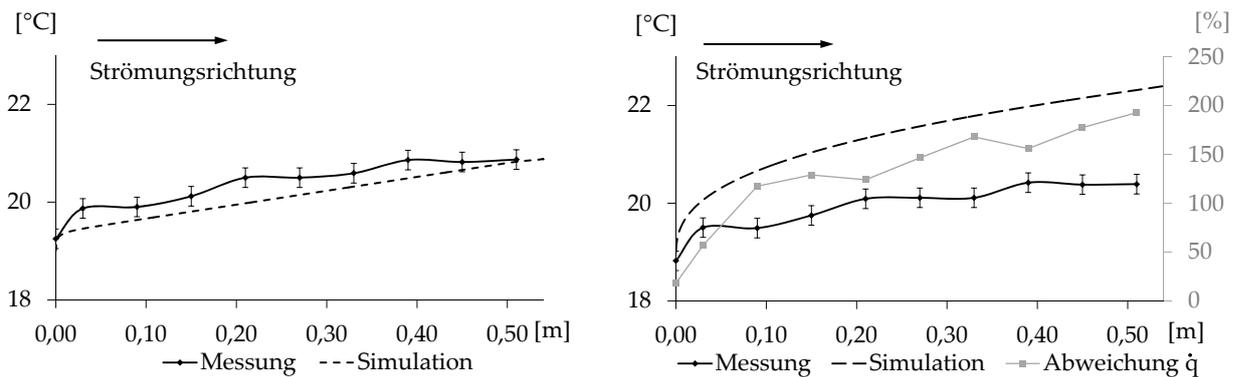


Abbildung 4.14: Vergleich der gemessenen und simulierten Oberflächentemperatur entlang der senkrechten Reaktorwand, links: Validierungsversuch bei freier Fluidströmung  $u_\infty = 10\text{ m/d}$  und  $100\text{ W/m}^2$ , rechts: Indexversuch mit Kugelpackung bei  $v_f = 10\text{ m/d}$  und  $100\text{ W/m}^2$  und Angabe der prozentualen Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Wärmeübergang, Indikatoren zeigen Messungenaugigkeit der Temperatursensoren

len Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  unter Anwendung der Gleichung 4.6 zu schließen. Die Validierung des Versuchsstandes erfolgte auf der Basis numerischer Simulationen für eine freie Fluidströmung innerhalb des Versuchsstandes. Hierzu wurden erste Versuchsreihen (siehe auch Anhang B.2) ohne poröses Medium durchgeführt bei denen gezeigt werden konnte, dass die Versuchsrandbedingungen eine gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen zeigen (vgl. Abb. 4.14 links). Hierbei war in der numerischen Simulation die durch Temperaturunterschiede induzierte freie Konvektion zu berücksichtigen.

Im Vergleich des Validierungsversuches mit dem Indexversuch zeigt sich zunächst die Verbesserung des Wärmeübergangs durch die Kugelpackung innerhalb des Reaktors. Die Temperatur entwickelt sich entlang der Reaktorwand in der Form eines klassischen Einlaufeffektes, bei dem zu Beginn der Strömung ein hoher Wärmeübergang stattfindet, der mit der Lauflänge abnimmt. Beim Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturentwicklung des Indexversuches (vgl. Abb. 4.14 rechts) zeigt sich die Diskrepanz zwischen der derzeit dem Stand der Wissenschaft entsprechenden Beschreibung des Wärmetransportes im Boden am Übergang zu einer temperierten Fläche und den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen. Die simulierte Wandtemperatur liegt deutlich oberhalb der gemessenen, die Größe des Wärmeübergangs wird in der Simulation also unterschätzt. Nach einer Kontaktlänge von 0,5 m wird der Wärmeübergang durch die numerische Simulation bereits um ca. 200% unterschätzt. Der wesentliche Grund hierfür wird in der am Übergang der Reaktorwand zum Boden veränderten Permeabilität (Wandläufigkeit) gegenüber der gemittelten Gesamtpermeabilität vermutet. Die Ergebnisse des Indexversuches besitzen ausschließlich für die verwendete regelmäßige Kugelpackung in dichtester Lagerung Gültigkeit. Durch das Eindringen von Suspension (z.B. Zementsuspension) in den Porenraum des Bodens bei der Herstellung eines Geothermieabsorbers ist es durchaus denkbar, dass sich für natürliche Böden in Abhängig-

keit des Herstellungsvorganges des Geothermieabsorbers gegenläufige Effekte zeigen. Vor diesem Hintergrund zeigt sich zur Beschreibung des Wärmeübergangs von einem um- oder überströmten Geothermieabsorber zum Aquifer folgender Forschungsbedarf:

- Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher thermischer und hydraulischer Bodeneigenschaften auf den extrahierbaren Wärmestrom
- Untersuchung des Einflusses großer Temperaturunterschiede zwischen der Oberfläche des Geothermieabsorbers und dem Aquifer zur Bestätigung des thermischen Gleichgewichts innerhalb des Bodens
- Untersuchungen zum Einfluss der Herstellbedingungen auf den extrahierbaren Wärmestrom, wie z.B. die vortriebsbedingte Veränderung der „excavation damage zone“ oder eine mögliche Penetration des Untergrundes im Zuge von Ringraumverpressungen

#### 4.4.4 Schlussfolgerungen

Zur Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit des Mehrphasenmediums Boden können anders als bei üblichen Geothermieprojekten, für die ein klassisches Baugrundgutachten vorliegt, die Erkenntnisse zur mineralogischen Zusammensetzung der Festsubstanz genutzt werden. Zur Beschreibung der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus den Stoffkenngrößen der Festsubstanz und dem Porenanteil liefert der Ansatz nach [44] plausible Ergebnisse. Für TGTA im Einfluss von Grundwasserströmungen kommt neben der Modellierung der Grundwassertemperatur und der Filtergeschwindigkeit  $v_f$  der Anströmrichtung auf den thermisch aktivierten Bereich eine besondere Bedeutung zu. Für Anströmwinkel  $\beta_{GW}$  zwischen  $90^\circ - 60^\circ$  bezogen auf die Tunnelachse kann der Einfluss einer Schräganströmung vernachlässigt werden. Für flachere Anströmwinkel wird die Untersuchung des Einflusses der Grundwasserströmung auf mögliche Entzugsleistungen der TGTA sowie die thermische Einlauflänge auf der Basis von dreidimensionalen thermisch-hydraulisch gekoppelten Strömungssimulationen empfohlen. Für eine überschlägige Abschätzung des Wärmestroms unter Schräganströmung kann der Zusammenhang nach Gleichung 4.36 genutzt werden. Darüber hinaus konnte für die Untersuchungen an der TGTA Jenbach ein funktionaler Zusammenhang gemäß 4.38 gefunden werden, der die thermische Einlauflänge für einen thermisch aktivierten Bereich von ca. 50 m berücksichtigt.

$$\dot{q}_{\beta_{GW}} = \frac{\dot{q}_{90^\circ}}{-0,7 \cdot \ln(\beta_{GW}) + 1,06} \quad (4.38)$$

Zur Anwendung von Gleichung 4.38 wird die bodenseitige Wärmestromdichte der TGTA unter der Annahme einer senkrechten Anströmung simuliert ( $\dot{q}_{90^\circ}$ ) und um den Einfluss der Schräganströmung korrigiert. Hierbei ist  $\beta_{GW}$  im Bogenmaß einzusetzen.

Untersuchungen zum Wärmeübergang von der Tunnelschale zum Aquifer haben gezeigt, dass es unter Vernachlässigung einer am Übergang zum Absorber veränderten

Porosität des Bodens und sich der entwickelten Grenzschichtphänomene zu einer deutlichen Über- bzw. Unterschätzung der wirklichen Wärmeströme kommen kann. Modelle zur Beschreibung des Wärmeübergangs von Boden zur Tunnelschale sind im Zuge von weiterführenden Forschungsarbeiten zu entwickeln.

## 4.5 Wärmetransport im Tunnelluftraum

Eine TGTA extrahiert Wärme- bzw. Kälteenergie in einem komplexen Zusammenspiel zwischen den aus dem umgebenden Erdreich auf den Tunnel gerichteten Wärmeströmen sowie Wärmeströmen, die das Resultat von Temperaturdifferenzen zwischen der Oberflächentemperatur der Tunnelinnenschale und der Tunnelluft sind. In [108] konnte gezeigt werden, dass ein maßgeblicher Anteil der Wärmeenergie einer TGTA aus dem Inneren des Tunnels, dem Tunnelklima stammt.

Der Wärmetransport zwischen der Oberfläche der Tunnelschale und dem Tunnelluftraum erfolgt im Wesentlichen durch Konvektion. Die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  ermittelt sich über den sogenannten Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  und die Temperaturdifferenz zwischen der Tunnellufttemperatur  $T_f$  und der Oberflächentemperatur an der Tunnelinnenschale  $T_w$ . Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  ist eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Tunnels und der Stoffeigenschaft der Luft. Vor diesem Hintergrund sind folgende zentrale Messdaten zur Beschreibung des Wärmestroms zwischen dem Tunnelklima und der Tunnelwand zu erheben:

- Tunnellufttemperatur
- mittlere und turbulente Tunnelluftströmung

Das Strömungs- und Temperaturprofil innerhalb eines durchströmten Querschnitts ist vom Strömungszustand (turbulent, laminar) des Fluids abhängig. Unter der Annahme einer Mindestluftströmungsgeschwindigkeit von 0,1 m/s, einem Tunneldurchmesser von  $d=10,0$  m und einer Lufttemperatur von 10°C treten Re-Zahlen von ca. 35.000 auf, so dass für den Strömungszustand von Tunnelluftströmungen stets von turbulenten Strömungsverhältnissen ausgegangen werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zur Beschreibung des Tunnelklimas Messdaten von 10 deutschen Straßentunneln, einem Bahntunnel in Deutschland sowie einem Bahntunnel in Österreich erhoben und ausgewertet. Eine Übersicht der untersuchten Tunnel und ausgewerteten Messdaten zeigt der Anhang C. In den folgenden Kapiteln werden zunächst die Messdaten der 10 Straßentunnel systematisch aufbereitet und analysiert. Neben den gemessenen Tunnelklimadaten (Luftströmungs- und Temperaturmessdaten) wird das Verkehrsaufkommen der Tunnel analysiert und mit den Klimadaten in Bezug gesetzt.

Für die Bahntunnel liegen nur in einem sehr begrenzten Umfang Messdaten des Tunnelklimas vor, so dass im Kapitel 4.5.5 für die Bahntunnel Stuttgart-Fasanenhof und Jenbach ein Modell zur Abschätzung des Tunnelklimas vorgestellt wird, das von der Aufbereitungssystematik der Straßentunnel abweicht.

| 1     | 2                | 3   | 4                          |
|-------|------------------|---|----------------------------|
| Kfz   | Pkw ähnlich      | nicht klassifizierbare KfZ                        | nicht klassifizierbare KfZ |
|       |                  | Pkw-Gruppe  | Motorräder                 |
|       |                  |   | Pkw o. Anhänger            |
|       | Lkw ähnlich (SV) | Lieferwagen o. Anhänger                           |                            |
|       |                  | Pkw mit Anhänger                                  | Pkw mit Anhänger           |
|       |                  | Lkw > 3,5 t o. Anhänger                           | Lkw > 3,5 t o. Anhänger    |
|       |                  | Lkw > 3,5 t mit Anhänger/<br>Sattelkraftfahrzeuge | Lkw > 3,5 t mit Anhänger   |
|       |                  | Sattelkraftfahrzeuge                              |                            |
| Busse | Busse            |   |                            |

Abbildung 4.15: Erfassungsarten nach den technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen, Schwerverkehr (SV) (Kfz > 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht), LKW-ähnlich: SV + PKW mit Anhänger aus [28]

### 4.5.1 Fahrzeugverkehr

Für Teile der untersuchten Straßentunnel liegen stündlich aufgelöste Messdaten über die Fahrzeugdichte getrennt nach unterschiedlichen Fahrzeugkategorien vor. Diese Messdaten werden als Zeitreihen durch die Bundesanstalt für Straßenwesen [28] zum freien Download zur Verfügung gestellt. Die Erfassung der Fahrzeuge erfolgt nach den „Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, das die Fahrzeugkategorien entsprechend Abbildung 4.15 berücksichtigt.

Die Unterscheidung der Fahrzeugtypen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit auf der Basis der Spalte 2 in Abbildung 4.15, wobei „Lkw-ähnlich“ mit SV gleichgesetzt wird.

**Verkehrscharakteristik** Die Charakteristik des Fahrzeugverkehrs innerhalb der untersuchten Tunnel lässt sich anschaulich über die Darstellung der unterschiedlichen Fahrzeugkategorien „Pkw-ähnlich“ und „Lkw-ähnlich“ für einen exemplarischen Zeitraum ableiten (Abb. 4.16 links).

Zum einen erkennt man einen typischen Wochengang des Fahrzeugaufkommens sowie das Wochenendfahrverbot gemäß § 30 Absatz 3 der Straßenverkehrsordnung für Fahrzeuge der Kategorie „Lkw-ähnlich“. Die Zunahme des Pkw-Aufkommens zum Ende der Woche lässt sich mit wöchentlichen Pendlerströmen erklären, die in der Gegenrichtung einen entsprechend inkongruenten Verlauf zeigen.

Für die Tunnel, bei denen die Richtungsfahrbahnen in getrennten Tunnelröhren geführt werden, zeigt die Korrelation des SV der einzelnen Richtungsfahrbahnen für die Mehrzahl der untersuchten Tunnel eine gute Übereinstimmung des SV-Aufkommens (Abb. 4.16 rechts). Diese Eigenschaft wird in den Unterkapiteln 4.5.2 und 4.5.3 für die Analyse und Interpretation der Messergebnisse genutzt.

Mit Blick auf eine mögliche synthetische Generierung des Fahrzeugaufkommens über den Jahresgang, werden die Messdaten des SV einer Signalanalyse unterzogen, um die maßgeblichen Signalfrequenzen sowie die entsprechenden Amplituden zu erhalten (Abb. 4.17 links). Zu erkennen ist die bereits erwähnte wöchentliche sowie tägliche Periode, die

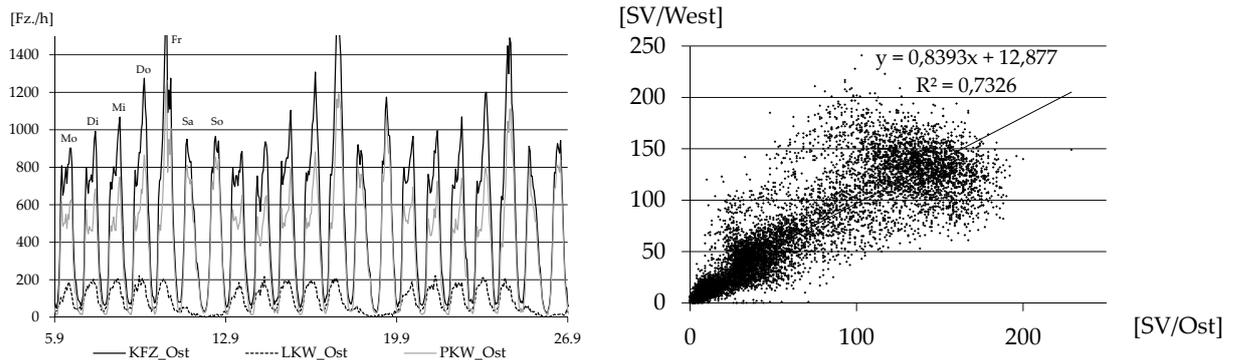


Abbildung 4.16: links: Exemplarische Verkehrscharakteristik am Beispiel der Oströhre des Tunnels Berg Bock über den Zeitraum von 3 Wochen im September 2016, rechts: Korrelation des SV der Oströhre gegen den SV der Weströhre des Tunnels Rennsteig unter Berücksichtigung des gemessenen SV-Aufkommens des Jahres 2016

für den Tunnel Berg Bock eine nahezu gleich große Amplitude zeigen. Des Weiteren erkennt man die Nebenfrequenzen (Ober- und Unterfrequenzen), die zur Abbildung der disharmonischen Schwingung über den Jahrgang erforderlich sind. Unter Berücksichtigung der in Abbildung 4.17 links beschrifteten Frequenzen und unter Ansatz einer zusammengesetzten harmonischen Schwingung, kann der in Abbildung 4.17 rechts dargestellte SV-Gang generiert werden.

Erwartungsgemäß lässt sich unter Berücksichtigung von lediglich vier Frequenzen nur eine unzureichende Übereinstimmung der gemessenen Werte mit den generierten Signalen erreichen. Während die SV-Dichte unter der Woche deutlich unterschätzt wird, verlagert sich das SV-Aufkommen der Tage Montag und Freitag auf das Wochenende. Die synthetische Generierung des Verkehrsaufkommens eines Straßentunnels ist in einer Zusammenschau der durchgeführten Untersuchungen nur unter Tolerierung einer starken Vergleichmäßigung über den Wochengang zu erreichen. Inwieweit dieser Effekt zu einer akzeptablen Beschreibung des Tunnelklimas führt, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Statt dessen wird für die Modellierung des Tunnelklimas auf das gemessene, stündlich aufgelöste Verkehrsaufkommen zurückgegriffen, das in den Ländern Deutschland, Österreich und Schweiz als dichtes Messstellennetz zur Verfügung steht.

**Abschätzung Wärmestrom aus Kfz** Die Abschätzung des durch den Fahrzeugverkehr eingetragenen Wärmestroms erfolgt auf der Basis eines makroskopischen Verbrauchsmodells, das Angaben über spezifische Verbräuche zum Beispiel in Liter/Kfz/km liefert. Hierbei werden nur die Anteile des Treibstoffverbrauchs für die Berechnung herangezogen, die innerhalb des Tunnels zu einer Erhöhung der Tunnellufttemperatur führen. Die Hauptursache des Kraftstoffverbrauchs liegt in der Überwindung des Fahrwiderstandes  $R_{Fahr}$ , der sich aus den Anteilen Hangabtrieb  $R_{Steig}$ , Trägheit (Beschleunigung)  $R_{Bschl}$ , Luft  $R_{Luft}$ - und Rollwiderstand  $R_{Roll}$  zusammensetzt [117]. Darüber hinaus wirken wei-

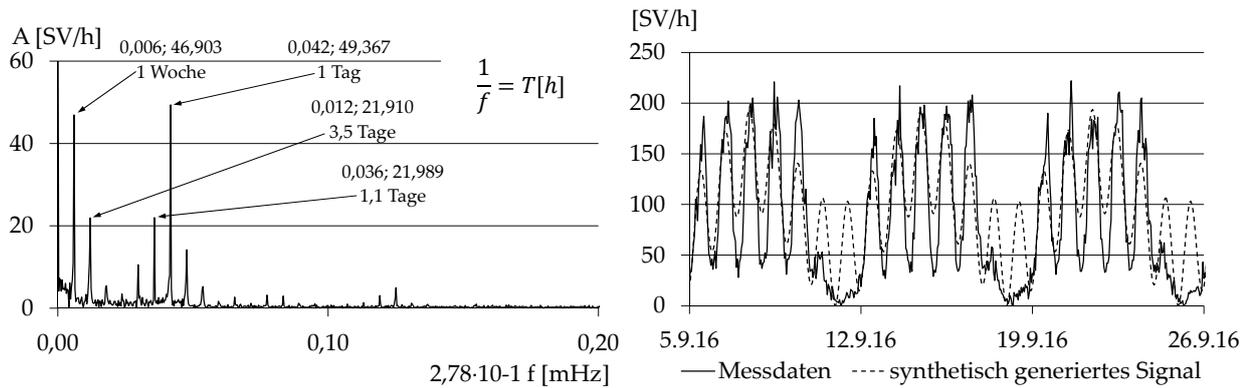


Abbildung 4.17: links: Schnelle Fourier-Transformation; englisch: fast Fourier transform (FFT) des SV unter Angabe von jeweils zwei Haupt- und Nebenfrequenzen, rechts: Vergleich der SV- Messdaten mit einem synthetisch generierten SV-Gang als harmonische Schwingung unter Verwendung der links dargestellten Frequenzen

tere Widerstände wie z.B. bei Kurvenfahrten, Lagerreibung oder um Niederschlagswasser unter dem Reifen zu verdrängen [17], die im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden. Die benötigte mechanische Leistung zur Fortbewegung eines Fahrzeuges ermittelt sich aus  $R_{Fahr}$  und der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fahr}$  nach Gleichung 4.39.

$$P_{dyn} = R_{Fahr} \cdot v_{Fahr} \quad (4.39)$$

Der Fahrwiderstand  $R_{Fahr}$  ermittelt sich unter Vernachlässigung der Trägheitseffekte, da davon ausgegangen wird, dass die Fahrzeuge während der Tunnelfahrt nicht beschleunigen nach Gleichung 4.40.

$$R_{Fahr} = (\mu + \tan\beta_{Fahr}) \cdot m \cdot g + \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho \cdot A_{Fahr} \cdot v_{Fahr}^2 \quad (4.40)$$

Hierbei sind  $\mu$  der Reibungskoeffizient, wobei hier geschwindigkeitsabhängige Anteile der Reibung vernachlässigt werden,  $\beta_{Fahr}$  der Straßenneigungswinkel,  $m$  die Fahrzeugmasse und  $c_w$  der Luftwiderstandsbeiwert. Für  $\mu$  gibt [55] ein Streuband in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit vor. Bei einer in den meisten der untersuchten Tunnel zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h liegt der Wert für  $\mu$  bei ca. 0,0125. In [55] wird für Pkws ein mittlerer  $c_w$ -Wert von 0,32 angegeben. Für Busse und Lkw liegt der  $c_w$ -Wert zwischen  $0,4 < c_w < 0,9$ , so dass im Rahmen dieser Arbeit ein mittlerer  $c_w$ -Wert für "Lkw-ähnliche" Fahrzeuge von 0,65 gewählt wird. Der Straßenneigungswinkel wird für alle untersuchten Tunnel nicht relevant, da hier Lageenergie erzeugt wird, die nicht als Wärme innerhalb des Tunnels zur Verfügung steht. Die Fahrzeugmasse  $m$  für Pkw kann auf der Basis von [49] im Mittel zu 1,5 t abgeschätzt werden. Für Lkw liefert [50] einen üblichen Wert gemittelt über die gängigsten Fahrzeugtypen von 30 t, was einer 75%-igen Ausnutzung des zulässigen Gesamtgewichtes entspricht. Dieser Wert wurde durch die Auswertung der gemessenen Achslasten an Bundesfern-

Tabelle 4.1: Erfahrungswerte für Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad von Kfz-Motoren nach [120], IDE = Nebenkammerdieselmotor, DE = Direkteinspritzer

| Motortyp                           | Spezifischer Kraftstoffverbrauch | Wirkungsgrad                    |
|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
|                                    | [g/kWh]<br>minimal               | $\eta_{Fahr}$<br>[%]<br>maximal |
| Kleinmotoren (2-Takt)              | 350                              | 24                              |
| Motorradmotoren                    | 270                              | 31                              |
| Pkw-Ottomotoren                    | 235                              | 36                              |
| Pkw-Dieselmotoren IDE              | 240                              | 35                              |
| Pkw-Dieselmotoren DE mit Aufladung | 195                              | 43                              |
| Lkw-Dieselmotoren mit Aufladung    | 185                              | 45                              |
| Größere Dieselschnellläufer        | 190                              | 44                              |
| Mittelschnellläufer                | 185                              | 45                              |
| Kreuzkopfmotoren (2-Takt-Diesel)   | 156                              | 54                              |

straßen ermittelt. Die Querschnittsfläche  $A_{Fahr}$  beschreibt die von vorne gesehene Ansichtsfläche eines Fahrzeugs. Für Pkw beträgt diese zwischen  $1,5m^2 < A_{Fahr} < 2,5m^2$ , für Lkw  $4m^2 < A_{Fahr} < 9m^2$ . Im Rahmen dieser Arbeit werden die entsprechenden Mittelwerte berücksichtigt.

Zu der mechanischen Leistung  $P_{dyn}$  ist darüber hinaus die Betriebsleistung  $P_0$  zur Versorgung von Nebenaggregaten sowie allfälliger Verluste hinzu zu addieren. Diese wird im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt.

In [120] wird eine Übersicht über Erfahrungswerte zu den Wirkungsgraden  $\eta_{Fahr}$  unterschiedlicher Motorentypen gegeben. Im Rahmen dieser Arbeiten wird für die Fahrzeugklasse „Pkw-ähnlich“ der maximale Wirkungsgrad eines Ottomotors entsprechend Tabelle 4.1, für die Fahrzeugklasse „Lkw-ähnlich“ ein Wirkungsgrad von  $\eta_{Fahr} = 0,45$  gewählt.

Unter den genannten Ansätzen ergibt sich die benötigte Leistung zur Fortbewegung eines Pkw bzw. Lkw gemäß Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2: Resultierende erforderliche Antriebsleistungen zur Fortbewegung eines Kfz

| Fahrzeugtyp | erf. Leistung<br>[kW] |
|-------------|-----------------------|
| Pkw         | 35                    |
| Lkw         | 309                   |

Die zur Fortbewegung aufgewendete Energie wird zum einen über den Roll- und Luftwiderstand zwischen dem Kfz und der Fahrfläche bzw. dem Kfz und der Tunnelluft, zum anderen als direkte Abwärme des Fahrzeug als Gesamtwärmeenergie  $\dot{Q}_{KFZ}$  in den Tunnel abgegeben. Ein Teil dieser Wärmeenergie entweicht direkt über das Tunnelportal

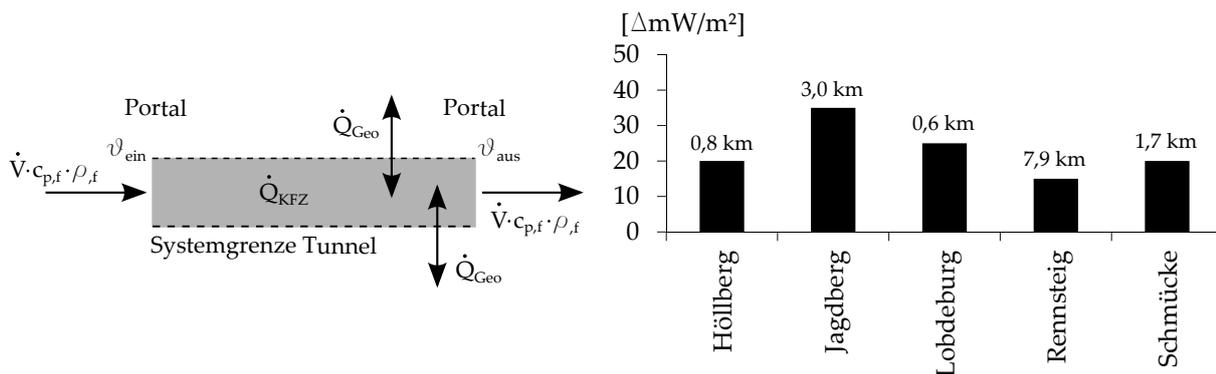


Abbildung 4.18: Wärmebilanz in Tunnellängsrichtung, links: Systemskizze, rechts: Differenzwärmestromdichten als Ergebnis der Auswertung der Wärmebilanz in Tunnellängsrichtung für 5 ausgewählte Tunnel

infolge der Luftströmung innerhalb des Tunnels, der übrige Anteil der Fahrzeugwärme steht in Interaktion mit dem den Tunnel umgebenden Untergrund. Die Abbildung 4.18 links zeigt die für diesen Fall berücksichtigte Wärmebilanz, die sich nach der Gleichung 4.41 berechnen lässt. Hierin repräsentiert  $\dot{V}$  den Luftvolumenstrom innerhalb des Tunnels, der durch die gemessene mittlere Strömungsgeschwindigkeit und den Luftraumquerschnitt des Tunnels gebildet wird.

$$\dot{V} \cdot c_{p,f} \cdot \rho_f \cdot \Delta T = \dot{Q}_{Kfz} \pm \dot{Q}_{Geo} \quad [W] \quad (4.41)$$

Zur Überprüfung der Abschätzung des durch Kfz eingetragenen Wärmestroms in den Tunnel werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Vernachlässigung des geothermischen Wärmestroms  $\dot{Q}_{Geo}$ , der in der Größenordnung von ca.  $60 mW/m^2$  liegt
- Annahme eines über den Jahresgang gemittelten quasi stationären Temperaturfeldes um den Tunnel, dass durch den Wärmeeintrag der Kfz  $\dot{Q}_{KFZ}$  nicht verändert wird

Unter diesen Annahmen muss der aus dem Fahrzeugverkehr eingetragene Wärmestrom  $\dot{Q}_{KFZ}$  in den Tunnel gleich dem aus dem Tunnel am Austrittsportal ausgetragenen Wärmestrom sein. Die Auswertung der unter den getroffenen Annahmen ermittelten Wärmestrombilanz in Tunnellängsrichtung für 5 ausgewählte Tunnel (Abb. 4.18 rechts) zeigt, dass die über den Betrachtungszeitraum gemittelten Differenzwärmestromdichten zwischen dem linken Teil der Gleichung 4.41 und dem Wärmestrom  $\dot{Q}_{KFZ}$  vernachlässigbar gering sind. Das hier gezeigte Verfahren zur Abschätzung des Wärmestroms aus dem Verkehrsaufkommen innerhalb eines Tunnels kann folglich als validiert betrachtet werden. Zur überschlägigen Abschätzung eines mittleren jahreszeitlichen Wärmestroms  $\dot{Q}_{KFZ}$  kann der Zusammenhang nach Gleichung 4.42 zur Anwendung kommen.

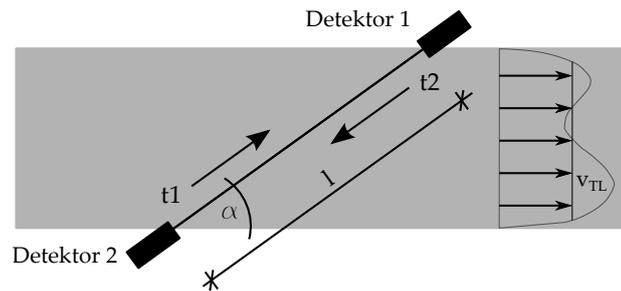


Abbildung 4.19: Prinzipdarstellung einer Laufzeit Ultraschallmessung

$$\dot{Q}_{Kfz} = \left( \underbrace{8 \cdot \frac{Pkw}{24h}}_{\dot{Q}_{Pkw}} + \underbrace{80 \cdot \frac{Lkw}{24h}}_{\dot{Q}_{Lkw}} \right) \cdot l_{TU} \quad [W] \quad (4.42)$$

Für die im Zusammenhang mit dieser Arbeit ausgewerteten Tunnel ergeben sich mittlere Wärmeeinträge durch Pkw zu  $91 \text{ W/m} < \dot{Q}_{Pkw} < 100 \text{ W/m}$  und durch Lkw zu  $150 \text{ W/m} < \dot{Q}_{Lkw} < 896 \text{ W/m}$ .

## 4.5.2 Tunnelluftströmung

Die Strömungsgeschwindigkeit der Tunnelluft trägt entschieden zum Wärmeübergang zwischen Tunnelluft und Tunnelschale bei. Aus diesem Grund kommt der Beschreibung der Strömungsgeschwindigkeit  $v_{TL}$  eine besondere Bedeutung zu. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit in einem Tunnel erfolgt zumeist über ein Ultraschall Laufzeitverfahren. Hierbei werden Schallwellen quer zur Hauptströmungsrichtung der Tunnelluftströmung ausgesendet und deren Laufzeit gemessen (vgl. Abb. 4.19).

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $v_{TL}$  der Tunnelluft ermittelt sich aus der Distanz der Detektoren sowie der gemessenen Laufzeit der ausgesendeten Schallwellen gemäß Gleichung 4.43.

$$v_{TL} = \frac{t2 - t1}{t1 \cdot t2} \cdot \frac{l}{2 \cos \alpha} \quad (4.43)$$

Gemäß den „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ (RABT) [98] aus Deutschland wie auch nach den „Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen“ (RVS) aus Österreich sind die Strömungsmessungen in Tunnelbauwerken derart auszubilden, dass eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $v_{TL}$  abgebildet wird. In diesem Zusammenhang wurden durch [107] vergleichende Strömungsmessungen der Tunnelluft in verschiedenen Tunnelquerschnitten mittels aufwendigen Messnetzen gemäß VDI/VDE Richtlinien 2640 - Blatt 1, 1991 durchgeführt, die zeigen, dass streckenmittelnde Ultraschallsensoren prinzipiell sehr gut geeignet sind, die mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $v_{TL}$  innerhalb eines Tunnel zu erfassen. Die Installation der Messinstrumente erfolgt im Tunnel gemäß [107] in einer Höhe von ca. 4,7 m über der Fahrbahn, um eine ungestörte Messung auch unter Verkehr zu gewährleisten.

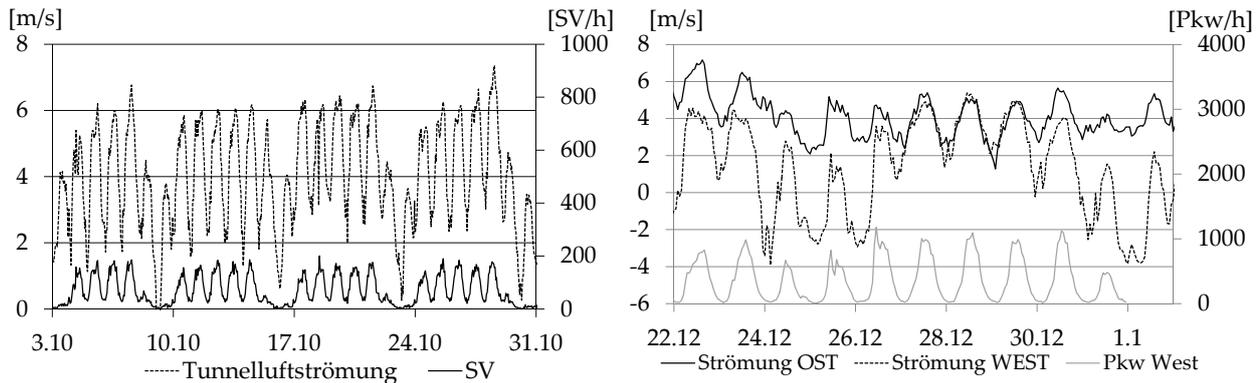


Abbildung 4.20: Tunnel Rennsteig, links: Ganglinie der Luftströmung  $v_{TL}$  und SV-Ganglinie der Oströhre über den Zeitraum von 4 Wochen im Oktober 2016, rechts: Tunnelluftströmungsganglinien der Ost- und Weströhre sowie die Ganglinie des Pkw-Aufkommens der Weströhre über den Zeitraum 22.12.2016 - 01.01.2017

**Charakteristik der Tunnelluftströmung** Die Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit  $v_{TL}$  hängt entscheidend davon ab, ob der Tunnel je Fahrtrichtung eine Tunnelröhre besitzt oder nur eine Tunnelröhre vorhanden ist, durch die beide Fahrtrichtungen abgefertigt werden. So beträgt die mittlere jährliche Strömungsgeschwindigkeit der untersuchten Tunnel mit einer Röhre je Fahrtrichtung ca.  $3,4\text{ m/s}$ , während bei Tunneln mit einer Röhre die mittlere Strömungsgeschwindigkeit nahe  $0\text{ m/s}$  liegt. Darüber hinaus zeigt sich eine direkte Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit vom Verkehrsaufkommen während keine Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit von z.B. der Tunnelröhrenlänge festgestellt werden kann. Die nachfolgenden Ausführungen zur Charakteristik der Tunnelluftströmung beziehen sich im Wesentlichen auf Tunnel mit getrennten Tunnelröhren je Fahrtrichtung.

Die Charakteristik der Tunnelluftströmung korreliert für Tunnel mit getrennten Tunnelröhren je Fahrtrichtung ab einer bestimmten Fahrzeugdichte direkt mit dem Schwerverkehrsaufkommen in einem Straßentunnel. Die Abbildung 4.20 links zeigt die Ganglinien der gemessenen Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit  $v_{TL}$  sowie die Ganglinie des SV-Aufkommens für den Zeitraum von 4 Wochen im Oktober des Jahres 2016 für die Oströhre des Tunnels Rennsteig. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Strömungsverhältnisse über die Weihnachtsfeiertage und den Jahreswechsel 2016/17 zeigt sich, dass trotz einer nahezu gleichbleibenden Pkw-Dichte, sich die Strömungsgeschwindigkeit in der Weströhre sogar umkehrt. Vor diesem Hintergrund kann zur Beschreibung der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit der Anteil des Pkw-Aufkommens vernachlässigt werden.

Darüber hinaus wird an der Abbildung 4.20 rechts deutlich, dass bei Tunneln mit zwei getrennten Fahrtrichtungsröhren mit einer für beide Röhren gleich orientierten Grundströmung  $v_{GS}$  sowie einer vom Verkehr beeinflussten Fahrzeugströmung  $v_{FS}$  zu rechnen ist. Zur Trennung dieser zwei unterschiedlichen Strömungsanteile wird sich der in Abbildung 4.21 gezeigten Modellvorstellung bedient, für die ein Ansatz entsprechend

Gleichung 4.44 angenommen wird.

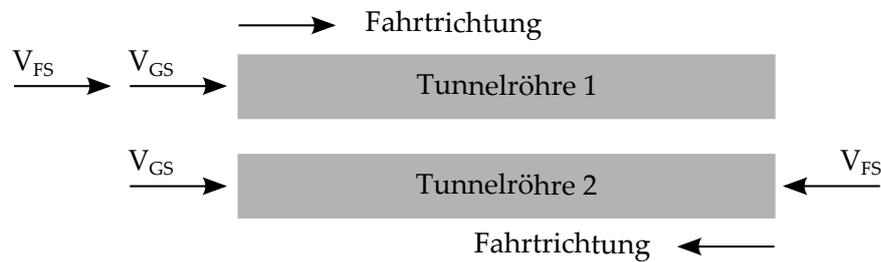


Abbildung 4.21: Modellvorstellung zur Trennung der Strömungsanteile nach  $v_{FS}$  und  $v_{GS}$ , basierend auf einem Gegenstromprinzip

$$\begin{aligned}
 v_{TL,1} &= v_{FS} + v_{GS} \\
 -v_{TL,2} &= v_{GS} - v_{FS} \\
 \rightarrow v_{FS} &= \frac{v_{TL,2} + v_{TL,1}}{2} \\
 \rightarrow v_{GS} &= \frac{v_{TL,1} - v_{TL,2}}{2}
 \end{aligned} \tag{4.44}$$

Dieser Ansatz gilt unter folgenden Voraussetzungen:

- Beide Tunnelröhren besitzen dieselben aerodynamischen Eigenschaften
- Für beide Tunnelröhren gilt die gleiche stündlich aufgelöste SV-Dichte
- Die klimatischen Bedingungen an den Tunnelportalen der beiden Tunnelröhren sind gleich

Die Auswertung der Strömungsmessdaten für die untersuchten Tunnel zeigt, dass die übers Jahr gemittelte Gesamtströmung  $v_{TL}$  ca. 1 - 10 % der fahrzeuginduzierten Strömung  $v_{FS}$  ausmacht. Die über ein Jahr gemittelte Grundströmung  $v_{GS}$  liegt in der Größenordnung von 0 - 0,6 m/s und damit im Bereich der mittleren Strömungsgeschwindigkeit von Straßentunneln mit nur einer Röhre für beide Richtungs-fahrbahnen.

**Korrelation Tunnelluftströmung/SV-Aufkommen** Mit Blick auf die Ableitung eines Modells zur Beschreibung der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit  $v_{TL}$  wird im Folgenden die quantitative Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit von der SV-Dichte untersucht. Wie bereits zuvor geschildert hängt die Strömungsgeschwindigkeit im Wesentlichen vom Verkehrsaufkommen und im Speziellen von der SV-Dichte ab. Aufgrund des Wochenend- und Feiertagsfahrverbots gemäß der Straßenverkehrsordnung ist eine Korrelation aller Messdaten inkl. der Wochenenden wenig aussagekräftig (vgl. Abb. 4.22 links).

Blendet man die Zeiten ohne SV-Verkehr aus (vgl. Abb. 4.22 rechts), zeigt sich, dass bis zu einer bestimmten SV-Dichte keine ausreichend gute lineare Abhängigkeit zwischen

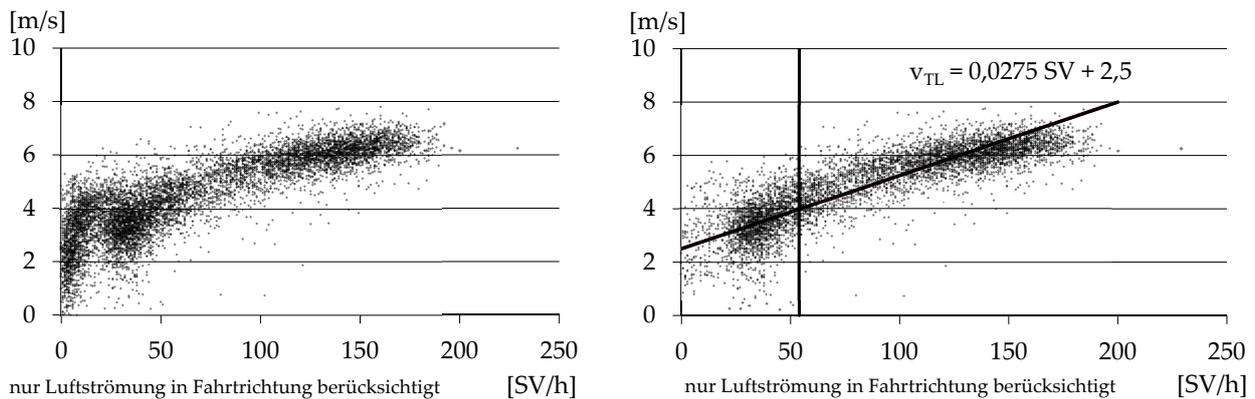


Abbildung 4.22: Tunnel Rennsteig, Korrelation Tunnelluftströmung gegen SV links: unter Einbeziehung der Messdaten an Wochenenden und Feiertagen, rechts: unter Vernachlässigung der Messdaten an Wochenenden und Feiertagen

der Tunnelluftströmung und dem Fahrzeugaufkommen besteht. Die senkrechte Linie in Abbildung 4.22 bildet hier die Grenze, ab der ein direkter Zusammenhang zwischen Fahrzeugdichte und Strömungsgeschwindigkeit erkennbar ist. Dieser Bereich liegt in einer Zusammenschau der untersuchten Tunnel zwischen 20 - 70 SV/h.

### 4.5.3 Tunnellufttemperatur

Die Tunnellufttemperatur  $T_{TL}$  ist das Resultat der Wärmeströme aus dem Gebirge, des Kfz-Aufkommens innerhalb des Tunnels und der klimatischen Verhältnisse an den Tunnelportalen. In einigen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Straßentunnel wird zwar eine Messung der Tunnellufttemperatur durchgeführt, jedoch gehen die Messwerte lediglich in den Regelkreis der Brandmeldeanlage ein und werden nicht dauerhaft gespeichert. Aus diesem Grund liegen nur für 8 der 10 Straßentunnel Messdaten der Tunnellufttemperatur  $T_{TL}$  vor. In Straßentunneln wird die Tunnellufttemperatur über das an der Tunnelfirste angeordnete Brandmeldekabel erfasst. Die Erfassung der Temperatur im Tunnel erfolgt bei den untersuchten Tunneln zum einen über Glasfaseroptik, zum anderen durch Sensorkabel mit diskretem Sensorabstand. Die vorhandenen Messdaten geben nur die Tunnellufttemperatur entlang der Firste wieder und spiegeln unter Umständen nicht die mittlere Tunnellufttemperatur über den gesamten Tunnelluftquerschnitt. Vor diesem Hintergrund wird zunächst die Temperaturverteilung im Tunnelquerschnitt untersucht.

**Temperaturverteilung im Tunnelquerschnitt** Im Bereich der Geothermieblöcke der TGTA Stuttgart-Fasanenhof (nähere Beschreibung der Anlage siehe Kapitel 5.2) wurden je Tunnelblock nahe der Tunnelwand 4 Temperaturmessstellen in unterschiedlichen Höhen angeordnet (siehe Abb. 4.23 links), die Anhaltspunkte zur Temperaturverteilung über den Jahresgang im Tunnelluftraum geben. Dargestellt in Abbildung 4.23 rechts sind

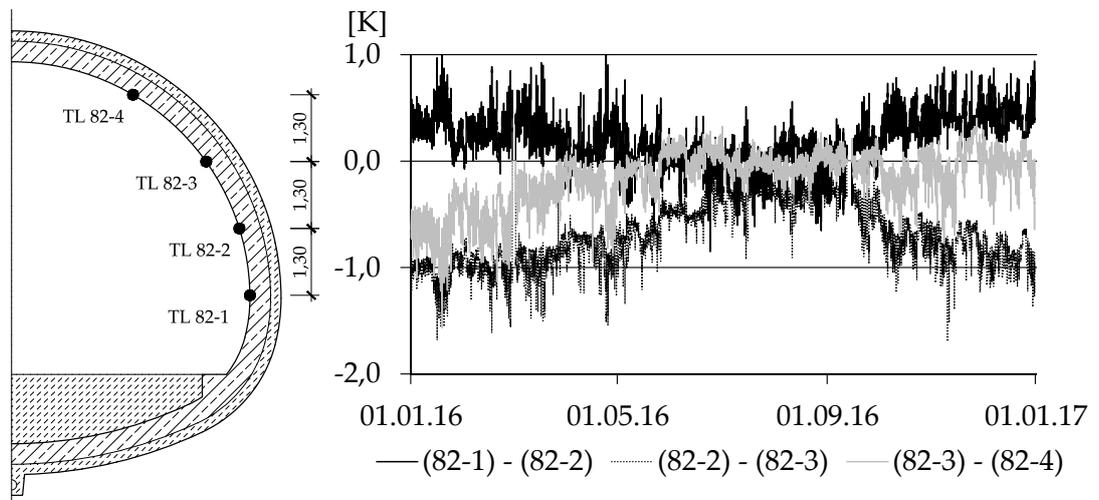


Abbildung 4.23: links: Lage der Temperaturmessstellen im Geothermieblock der TGTA Stuttgart-Fasanenhof [m], rechts: Differenzen der Messdaten der Tunnellufttemperatur im Bereich des Geothermieblocks 82 der TGTA über den Jahresgang 2016 an den Messstellen TL-82-1 bis TL-82-4

die Differenzen der jeweils benachbarten gemessenen Tunnellufttemperaturen über das Jahr 2016. Zunächst erkennt man den sinusförmigen Verlauf der Temperaturdifferenzen. Im Winterhalbjahr beträgt die Temperaturspreizung zwischen den einzelnen Gebern maximal ca. 1 K, während im Sommerhalbjahr die Temperaturspreizung auf maximal ca. 0,3 K zurückgeht. Grundsätzlich ist ein steigender Temperaturgradient vom Geber 82-1 bis zum Geber 82-4 zu erkennen, der auf eine Temperaturschichtung innerhalb des Tunnellufttraums hindeutet. Der mittlere Temperaturgradient beträgt im Mittel für das Jahr 2016 ca. 0,13 K. Es muss also davon ausgegangen werden, dass die Temperaturmessdaten die an der Tunnelfirste gemessen werden, die mittlere Tunnellufttemperatur bei üblichen Tunneldurchmessern um ca. 0,3 K übersteigen, wobei der Einfluss im Winterhalbjahr größer als im Sommerhalbjahr ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der Temperaturschichtung bzw. Temperaturunterschiede im Tunnelquerschnitt vernachlässigt und die mittels des Brandmeldekabels gemessene Temperatur der mittleren Tunnellufttemperatur gleichgesetzt.

**Charakteristik der Tunnellufttemperatur** Die Tunnellufttemperatur der betrachteten Straßentunnel folgt grundsätzlich dem jahreszeitlichem Temperaturgang der Lufttemperatur, die an den Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes in 2,0 m über GOK gemessen wird. Exemplarisch zeigt dies der Vergleich der gemessenen Tunnellufttemperatur am Nordportal des Tunnels Hornberg mit der gemessenen Lufttemperatur der naheliegenden Klimastation Wolfach (Entfernung Luftlinie ca. 9,5 km).

Die Abbildung 4.24 zeigt die Korrelation der gemessenen Lufttemperatur an der Klimastation des Deutschen Wetterdienstes Wolfach gegen die Tunnellufttemperaturen in der Nähe des Nord- bzw. Südportals (genauer Abstand der Temperaturmessstellen zum

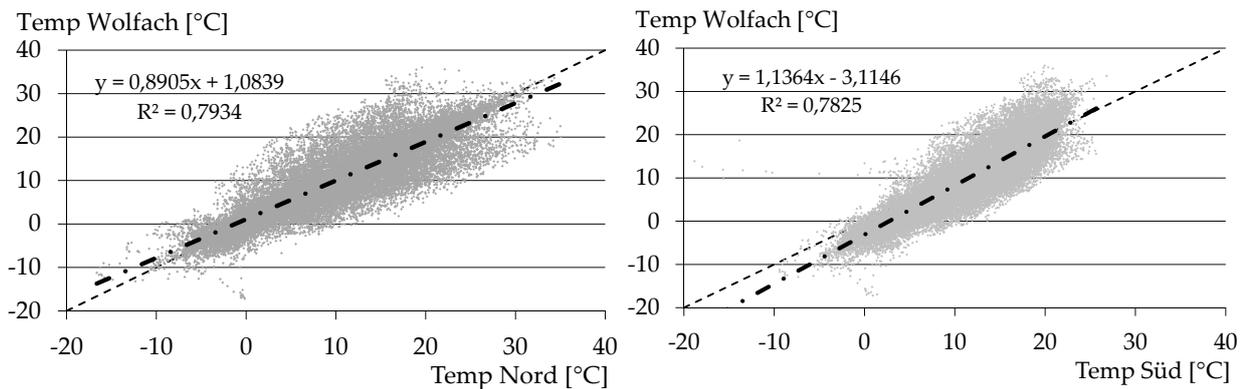


Abbildung 4.24: Tunnel Hornberg: Korrelation Lufttemperatur Wolfach gegen Tunnellufttemperatur, links: Nordportal, rechts: Südportal

Portal ist nicht bekannt) des Tunnels Hornberg. Zunächst fällt auf, dass die lineare Regression der Lufttemperaturen für das Nord- und das Südportal eine andere Charakteristik aufweist. Am Nordportal sind die Temperaturen im Winter im Tunnel geringer als die an der Klimastation, während am Südportal höhere Temperaturen gemessen werden. Im Jahresmittel zeigt sich für den Tunnel Hornberg eine Tunnelluftströmung  $v_{TL}$ , die trotz des Gegenrichtungsverkehrs innerhalb der Tunnelröhre, von Nord nach Süd orientiert ist. Dies kann als Hinweis auf eine durch den Fahrzeugverkehr hervorgerufene Temperaturerhöhung innerhalb des Tunnels gewertet werden.

Für die weiteren Tunnel, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, liegen entweder keine Tunnellufttemperaturmessdaten oder keine Klimadaten benachbarter Klimastationen vor, da diese entweder eine zu große Entfernung zum Tunnel besitzen, sich in einer anderen Höhenstufe befinden oder anderen Klimaeinflüssen (Stadt/Land) unterliegen.

Sämtliche der untersuchten Tunnel zeigen unabhängig davon, ob es sich um Tunnel mit einer Röhre je Fahrtrichtung handelt oder nicht, die zwei Hauptperioden des Temperaturgangs Jahr und Tag, was durch die Ausführungen zum Tunnel Hornberg bestätigt wird. Anders als für die Tunnelluftströmung ist die Wochenperiode in den Ganglinien der Tunnellufttemperatur nicht erkennbar.

Innerhalb der Tunnelröhren mit Richtungsverkehr stellt sich eine mit der Fahrtrichtung zunehmende Lufttemperatur ein, was so für Tunnel mit Gegenrichtungsverkehr nicht beobachtet wird. Allerdings wurden im Rahmen dieser Arbeit lediglich zwei Tunnel mit Gegenrichtungsverkehr untersucht, deren Temperaturdatengrundlage nicht eindeutig nachvollzogen werden kann. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich infolgedessen auf Tunnel mit zwei getrennten Röhren je Richtungsfahrbahn. Zur Ermittlung des Temperaturgradienten für eine Tunnelröhre werden die stündlich gemittelten Temperaturmesswerte über die Tunnellänge  $l_{TU}$  aufgetragen und durch eine lineare Regression angeglichen. Die so ermittelten Gradienten besitzen für die untersuchten Tunnel unterschiedliche Qualitäten, da die genaue Lage der Temperaturmessstellen im Tunnel nicht genau bekannt ist, oder die Anzahl der Temperaturstützstellen von Tunnel zu

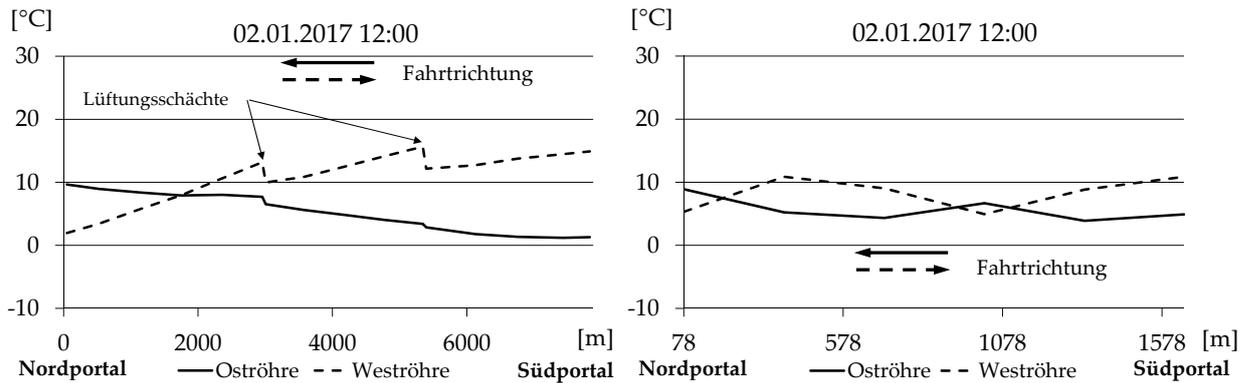


Abbildung 4.25: links: Temperaturverlauf der Ost- und Weströhre des Tunnels Rennsteig, rechts: Temperaturverlauf der Ost- und Weströhre des Tunnels Schmücke

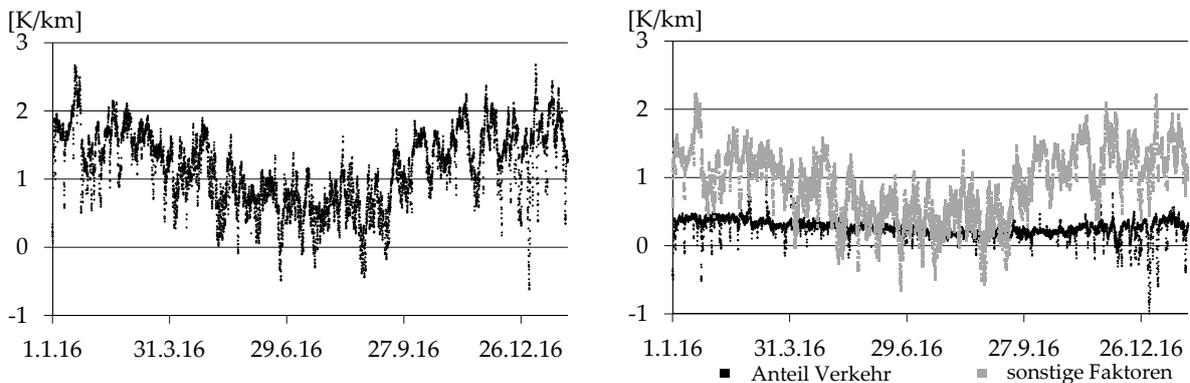


Abbildung 4.26: Tunnel Rennsteig, links: über Tunnellänge gemittelter Temperaturgradient Oströhre über den Jahresverlauf, rechts: Aufteilung des Temperaturgradienten der Oströhre nach Verkehr und sonstigen Einflussfaktoren

Tunnel stark variiert (siehe Abb. 4.25).

Während sich für den Tunnel Rennsteig deutliche Temperaturgradienten abzeichnen, lassen sich am Tunnel Schmücke nur Trends des Temperaturverlaufs über die Tunnelweite erkennen. Trägt man die mittleren Temperaturgradienten über den Jahresverlauf auf (vgl. Abb. 4.26 links), erkennt man in dem Verlauf des Temperaturgradienten den Jahresgang wieder, bei dem im Sommer mit den geringsten, im Winter mit den größten Temperaturgradienten im Tunnel zu rechnen ist. Wendet man das Gedankenmodell, das für die Tunnelluftströmung mit getrennten Röhren je Richtungs-fahrbahn entwickelt wurde (vgl. Gleichung 4.44 und Abb. 4.21) auf die Temperaturgradienten in den Tunnelröhren an, lässt sich der Anteil des Fahrzeugverkehrs von sonstigen Einflüssen wie z.B. dem geothermischen Wärmestrom in den Tunnel trennen (vgl. Abb. 4.26 rechts). Für den Tunnel Rennsteig erkennt man einen gleichbleibenden durch die Fahrzeuge induzierten Temperaturanstieg in Fahrtrichtung von ca. 0,2 K/km über den gesamten Jahresgang.

Die jährlich gemittelten Temperaturgradienten über alle betrachteten Tunnel liegen in einem Bereich zwischen  $0,64 < \frac{\Delta T}{l_{TV}} < 4,23$  und lassen keine Abhängigkeit von der SV-Dichte oder der Tunnellänge erkennen.

#### 4.5.4 Wärmeübergang zur Tunnelschale

Betrachtet man die Tunnelröhre eines Verkehrstunnels als durchströmtes Rohr, kann der Wärmeübergang zwischen Tunnelluft und Tunnelschale durch den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  beschrieben werden (vgl. Gleichung 4.6). Zur Ermittlung von  $\alpha$  ist zunächst der Strömungszustand zu beschreiben, der durch den Fahrzeugverkehr in der Tunnelröhre hervorgerufen wird. Hierzu dient die dimensionslose Kennzahl  $Re_L$ , die für durchströmte Kanäle in Abhängigkeit des hydraulischen Durchmessers  $d_{hyd}$  gemäß Gleichung 4.45 beschrieben wird.

$$d_{hyd} = \frac{4 \cdot A}{l_{hyd}} \quad (4.45)$$

Für übliche Straßentunnel mit  $7m < d_{hyd} < 10m$  ergeben sich selbst für sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten ein turbulenter Strömungszustand im Tunnelluftraum.

Die zweite dimensionslose Kennzahl in diesem Zusammenhang, die  $Pr$ -Zahl liegt für die zu erwartenden Tunnellufttemperaturen in einem Bereich von  $0,71 < Pr < 0,72$  und kann daher als Konstante in den nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt werden.

Zur Rückrechnung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  dienen im Folgenden die Messergebnisse aus dem Bereich der TGTA des Tunnels Stuttgart-Fasanenhof, Block 73, da lediglich für diesen Tunnel Informationen der Tunnelschalentemperatur vorliegen. Die Abbildung 4.27 links zeigt eine Prinzipdarstellung der in der Tunnelinnenschale der TGTA Stuttgart-Fasanenhof installierten Temperaturmessgeber sowie die entsprechende Temperaturmessstelle zur Erfassung der Tunnellufttemperatur, wobei der genaue Abstand  $a$  zur Tunnelschale nicht bekannt ist. Auf der linken Seite der Skizze befindet sich der Tunnelluftraum, auf der rechten Seite schließt das Erdreich an. Auf der Abbildung 4.27 rechts sind die maximalen Temperaturamplituden für eine Anregerfrequenz der Tunnelluft von 24 h über die Schalentiefe aufgetragen. Selbst in einem Abstand von 42 cm von der Tunnelinnenseite ist der Tagesgang des Tunnelklimas nachweisbar, was die Notwendigkeit unterstreicht, die Simulation einer TGTA stündlich aufzulösen.

Durch die Anordnung des ersten Temperaturmessgebers in der Tunnelinnenschale mit einem Abstand von 7 cm von der Tunnelinnenschale, ist eine direkte Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  über die Gleichung 4.6 nicht möglich. Aus diesem Grund werden im Folgenden analytische sowie eine numerische Untersuchung zur Ermittlung von  $\alpha$  durchgeführt, die den Abstand von 7 cm überspringen und die Wandtemperatur  $T_w$  extrapolieren.

**Analytische Untersuchungen zum Wärmeübergang** Die Basis für die analytischen Untersuchungen zum Wärmeübergang von der Tunnelluft an die Tunnelschale bildet eine Wärmestrombilanz an diesem Übergangsbereich. Auf Basis der kinetischen Kopplung ist die Wärmestromdichte  $\dot{q}_{kond}$  innerhalb der Tunnelschale gleich der Wärmestrom-

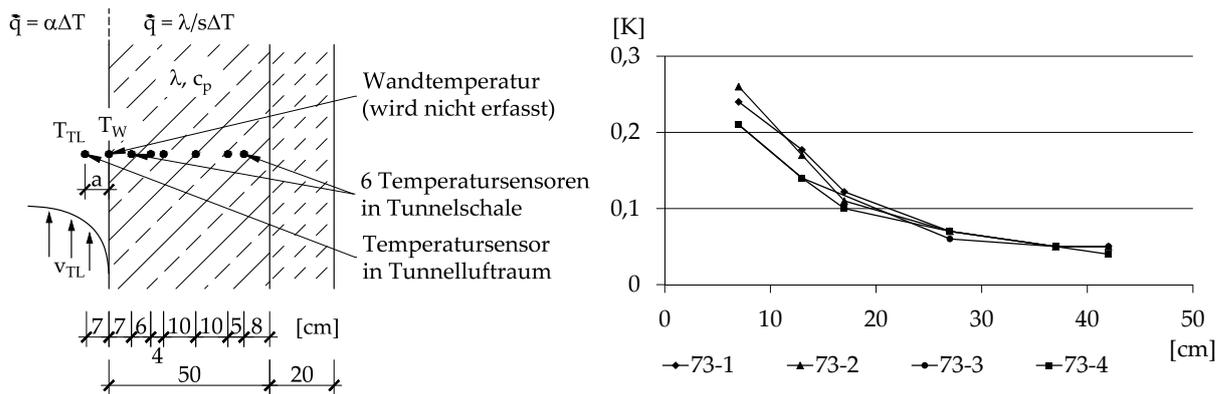


Abbildung 4.27: Tunnel Stuttgart-Fasanenhof, links: Prinzipdarstellung zum Wärmeübergang von der Tunnelluft an die Tunnelschale unter Angabe der Position der Temperatursensoren, rechts: maximale Temperaturamplituden über die Tunnelschalentiefe für 4 Messquerschnitte 73-1 bis 73-4 des Tunnelblocks 73 in Anlehnung an Abbildung 4.23

dichte  $\dot{q}_{konv}$ , die den Wärmeübergang beschreibt. Durch die in radialer Richtung mit bekanntem Abstand zueinander angeordneten Temperatursensoren und die bekannte Wärmeleitfähigkeit des Betons  $\lambda$ , lässt sich die Wärmestromdichte bestimmen. Hierzu wird vereinfacht ein quasi-stationärer Zustand für die stündlich gemittelten Messdaten zu Grunde gelegt. Mithilfe einer Regression zweiter Ordnung durch die einzelnen Temperaturmessdaten der Tunnelinnenschale erfolgt die Extrapolation der Oberflächentemperatur der Tunnelschale. Das Problem dieses Vorgehens liegt in dem Umstand, dass es sich bei der Anregung des Systems um ein stochastisches Signal (Tunnellufttemperatur) handelt, dass zusammen mit der Temperaturleitfähigkeit  $a$  mit dem gewählten Verfahren nicht abbildbar ist. Die erzielten Ergebnisse sind folglich mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet, was sich in den großen Abweichungen im resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  widerspiegelt.

Die Abbildung 4.28 links zeigt exemplarisch die Temperaturverteilung des Messquerschnitts B 73-3 Mitte Juli 2014. Dargestellt ist weiter die Regressionskurve 2. Ordnung, mit der die Oberflächentemperatur  $T_w$  der Tunnelschale extrapoliert wird. Am linken Diagrammrand ist die zugehörige Tunnellufttemperatur  $T_f$ , am rechten Rand die gemessene Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen. Die Abbildung 4.28 rechts zeigt die mit Hilfe der Gleichung 4.6 ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten über einen Zeitraum von 5 Jahren. Hierbei wurden alle berechneten Werte, bei denen die Regressionen einen kleineren Regressionsfaktor als 0,95 zeigen ausgeblendet. Die Zeiträume für die keine oder unbrauchbare Messdaten vorliegen sind durch Werte für  $\alpha$  nahe null zu erkennen. Das hier verwendete Verfahren nutzt jeweils Stundenmittelwerte der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit wie auch der Tunnelluft- und Tunnelschalentemperatur. Dennoch führen diese Daten zu sehr großen Streubreiten des Wärmeübergangskoeffizienten, die weit außerhalb möglicher Wärmeübergangskoeffizienten für überströmte ebene Platten liegen. Augenscheinlich lässt sich der Abbildung 4.28 rechts eine erhöhte Häufigkeit von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich zwischen  $5 \leq \alpha \leq 40 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

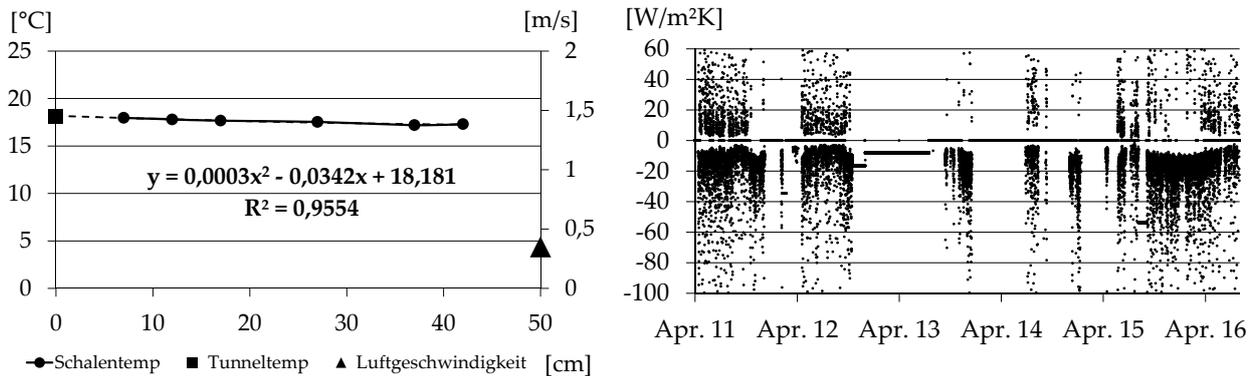


Abbildung 4.28: Tunnel Stuttgart-Fasanenhof, links: Temperatur- und Strömungsmessdaten des Querschnitts 73-3 am 22.07.2014 7:00 Uhr, rechts: analytisch ermittelte Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  über einen Zeitraum von 5 Jahren

erkennen. Eine gesicherte Prognose des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem Tunnelluftraum und der Tunnelschale ist unter Verwendung des gewählten Verfahrens nicht möglich.

**Numerische Untersuchungen zum Wärmeübergang** Die analytischen Untersuchungen zum Wärmeübergang von der Tunnelluft zur Tunnelschale haben eine große Streuung der resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  ergeben, die im Wesentlichen auf die Anordnung der Temperaturmessgeber in der Tunnelschale und die stochastische thermische Anregung des Systems zurückzuführen sind. Um diese Einflussfaktoren zu eliminieren, basieren die nachfolgenden Untersuchungen auf einem numerischen Berechnungsmodell, das die Messdaten des Tunnelklimas (Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit) sowie der Schalentemperatur über einen gesamten Jahresgang transient berücksichtigt. Die Basis der numerischen Untersuchungen zum Wärmeübergang von der Tunnelluft zur Tunnelschale bildet ein eindimensionales Berechnungsmodell, bei dem die instationäre Wärmeleitung innerhalb eines Festkörpers (Beton) gelöst wird. An einem Modellrand wird eine Randbedingung 3. Art in Form eines Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt, der den Wärmeübergang von der Tunnelluft an die Tunnelschale abbildet. Zur Beschreibung des Wärmeübergangs werden unterschiedliche, aus der Literatur bekannte Korrelationen für Rohr- und Plattenströmungen angesetzt, die nachfolgend näher beschrieben werden. Am gegenüberliegenden Modellrand wird eine Randbedingung 1. Art in Form der gemessenen Temperatur des Messgebers im Abstand von 13 cm von der Tunnelschalinnenkante angesetzt (vgl. Abb. 4.29).

Das turbulente Strömungsregime innerhalb des Tunnelluftraumes ordnet das Wärmeübergangsphänomen der erzwungenen Konvektion zu. Zur Beschreibung des Wärmeübergangskoeffizienten werden für  $\alpha$  in der Literatur konstante Werte und Korrelationen in Abhängigkeit von  $Re_L$  und  $Pr$  angegeben.

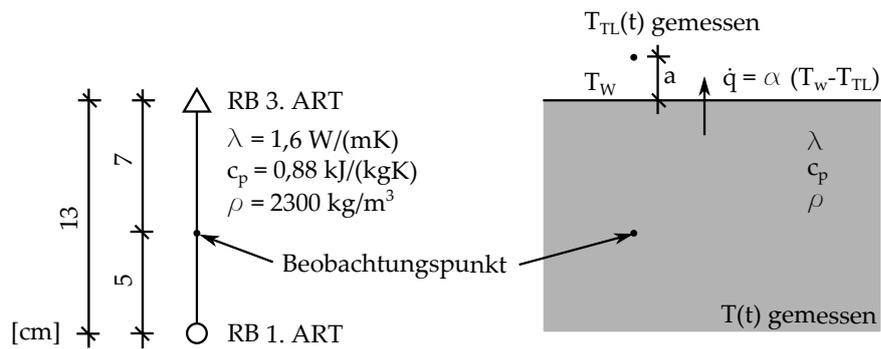


Abbildung 4.29: Berechnungsmodell zur Untersuchung des Wärmeübergangs von der Tunnelluft zur Tunnelschale, links: Skizze Berechnungsmodell, rechts: Systemskizze

Zunächst existieren aus dem Bereich bauphysikalischer Berechnungen in Standardtabellenwerken (z.B. [5]) konstante Werte für  $\alpha$  von  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , die z.B. auch in [59] zur Abschätzung des Wärmestromes zur Tunnelluft an die Tunnelschale berücksichtigt werden. Der gleiche Ansatz zur Beschreibung von  $\alpha$  wird in [90] gewählt, wobei hier ein Wert von  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  Berücksichtigung findet.

Weiter existieren  $\alpha$ -Werte alleinig in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit. So wird in [53] der Zusammenhang entsprechend Gleichung 4.46 angegeben.

$$\alpha = 6,2 + 4,2 \cdot v_{TL} \text{ für } v_{TL} < 5 \text{ m/s} \quad (4.46)$$

In [106] wird dieser einfache Ansatz unter Berücksichtigung der Lufttemperatur gemäß 4.47 verbessert.

$$\alpha = \left[ 4,13 + 0,23 \cdot \frac{T_f}{100} - 0,0077 \cdot \left( \frac{T_f}{100} \right)^2 \right] \cdot \frac{v_{TL}^{0,75}}{d_{hyd}^{0,25}} \quad (4.47)$$

Gemäß Gleichung 4.10 ist der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  in Abhängigkeit der sich mit der Temperatur ändernden Stoffparameter der Tunnelluft, ausgedrückt durch die  $Pr$ -Zahl sowie in Abhängigkeit des Strömungszustandes, ausgedrückt durch die  $Re_L$ -Zahl zu beschreiben. Hierzu liefert [51] gemäß [127] die nach dem derzeitigen Kenntnisstand beste Beziehung (siehe Gleichung 4.48) zur Beschreibung des Wärmeübergangs einer turbulenten Rohrströmung.

$$\begin{aligned}
 Nu_L &= \frac{(\xi/8) \cdot Re_L \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\xi/8} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \cdot f_1 \cdot f_2 \\
 \xi &= [1,8 \cdot \log(Re_L) - 1,5]^{-2} \\
 f_1 &= 1 + \left(\frac{d_{hyd}}{l_{TU}}\right)^{2/3} \\
 f_2 &= (Pr/Pr_w)^{0,11} \\
 \alpha &= \frac{Nu_L \cdot \lambda}{d_{hyd}}
 \end{aligned} \tag{4.48}$$

In Gleichung 4.48 beschreibt die Funktion  $f_1$  den Einfluss der Tunnellänge  $l_{TU}$ , da zu Beginn einer Rohrströmung keine thermische und hydraulische Grenzschicht existiert und der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  unendlich ist. Die Funktion  $f_2$  berücksichtigt den Einfluss der Richtung des Wärmestroms. Die Richtung des Wärmestroms ist nur für hohe Temperaturunterschiede von  $T_f$  zu  $T_w$  maßgebend und wird im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Als Referenztemperatur zur Ermittlung der Stoffparameter ist eine mittlere Temperatur  $T_m$  gemäß 4.49 zu berücksichtigen.

$$T_m = \frac{T_w + T_f}{2} \tag{4.49}$$

Die zur Ermittlung der Stoffparameter erforderliche Wandtemperatur  $T_w$  ist bei der Wahl des numerischen Berechnungsmodells unter Berücksichtigung einer Randbedingung 3. Art eine zeitabhängige unbekannte Variable der Berechnung und erhöht dadurch den Iterationsaufwand und damit die Simulationszeit.

Die vier vorgestellten Ansätze zur Beschreibung des Wärmeübergangs werden in COMSOL implementiert und für den Jahrgang 2016 simuliert. Verglichen wird anschließend der gemessene und simulierte Jahrgang am Beobachtungspunkt gemäß Abbildung 4.29.

Die Tabelle 4.3 gibt die mittleren und maximalen Temperaturabweichungen am Beobachtungspunkt wider. Die Abbildung 4.30 zeigt exemplarisch die Differenz der simulierten und gemessenen Schalentemperaturen gemäß dem Ansatz nach [51] sowie die entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten über den Jahrgang.

Grundsätzlich geht mit einer physikalisch exakteren Beschreibung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  (von )eine Reduzierung der Temperaturdifferenzen zwischen gemessener und simulierter Schalentemperatur einher. Mit Blick auf die maximalen Temperaturdifferenzen liefert allerdings auch die Formulierung von  $\alpha$  nach [51] nur eine unzureichende Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Schalentemperatur wider.

Tabelle 4.3: mittlere und maximale Temperaturabweichung am Beobachtungspunkt gemäß Abbildung 4.29 zwischen gemessener und simulierter Schalentemperatur im Zeitraum 2016

| Modell $\alpha$      | mittlere<br>Temperaturabweichung<br>$\pm\Delta T$<br>[K] | maximale<br>Temperaturabweichung<br>$ \Delta T $<br>[K] |
|----------------------|--|---|
| $\alpha$ gemäß [5]   | 0,52   | 1,17  |
| $\alpha$ gemäß [53]  | 0,44   | 1,39  |
| $\alpha$ gemäß [106] | 0,26   | 1,95  |
| $\alpha$ gemäß [51]  | 0,20   | 0,94  |

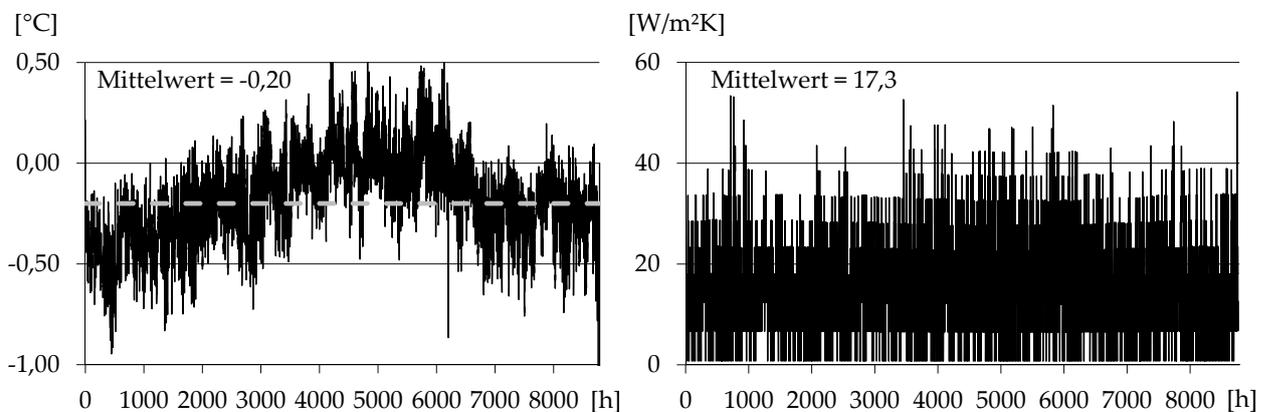


Abbildung 4.30: Tunnel Stuttgart-Fasanenhof, links: Temperaturdifferenzen zwischen gemessener und simulierter Schalentemperatur am Beobachtungspunkt, rechts: stündlich gemittelter Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  nach [51] über den Jahresgang

#### 4.5.5 Tunnelklima in Bahntunneln

Die Entwicklung eines gesicherten Modells zur Beschreibung des Tunnelklimas für Bahntunnel ist derzeit aufgrund der zur Verfügung stehenden Datengrundlage nicht möglich. In Bahntunneln erfolgt standardmäßig keine Erfassung der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit oder der Tunnellufttemperatur, so dass die zur Verfügung stehenden Daten in der zugänglichen Literatur zumeist auf konkreten Versuchsständen im Tunnel basieren. So wurden z.B. Messungen des Tunnelklimas an 30 Orten innerhalb des U-Bahn Netzes der Stadt Glasgow durchgeführt [93], die in den Wintermonaten eine mittlere Lufttemperatur von  $15^{\circ}\text{C}$  und in den Sommermonaten eine mittlere Lufttemperatur von ca.  $17^{\circ}\text{C}$  mit geringer Temperaturamplitude (Winter 2,6 K) zeigen.

Auf der Basis der im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Messdaten der TGTA Stuttgart-Fasanenhof und Jenbach wird ein Verfahren vorgestellt, das eine übersichtliche Abschätzung der Tunnellufttemperatur in Abhängigkeit der Lage des thermisch aktivierten Bereichs bezogen auf die Tunnellängsachse erlaubt. Die Grundidee zur

Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Tunnellufttemperatur basiert auf der Annahme, dass der jahreszeitliche Verlauf der Oberflächentemperatur über eine Sinusregression beschrieben werden kann und sich die Tunnellufttemperatur hierzu gedämpft und phasenverschoben darstellt. Die Abbildung 4.31 zeigt die Oberflächentemperaturen an den Tunnel Jenbach und Stuttgart-Fasanenhof als entsprechende Sinusregressionen.

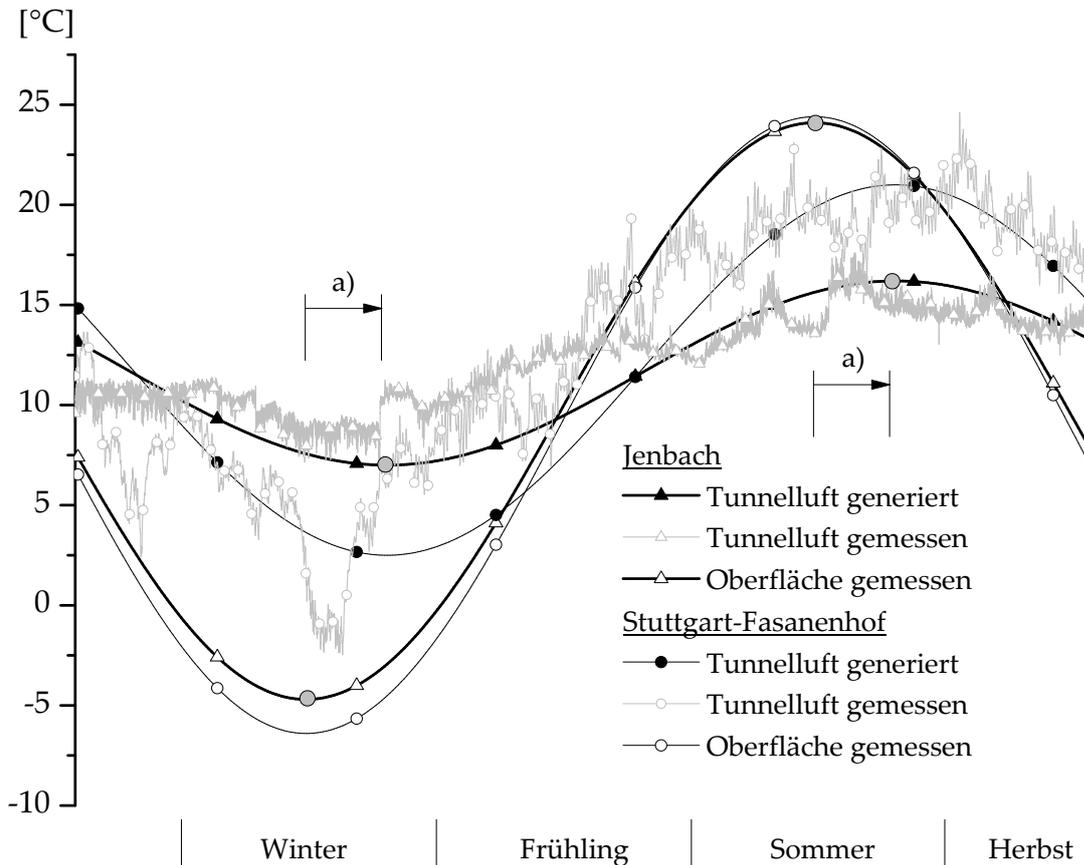


Abbildung 4.31: Temperaturmessdaten der Tunnelluft für die Tunnel Stuttgart-Fasanenhof und Jenbach, Sinusregressionen der Tunnellufttemperatur sowie der Oberflächentemperatur

Innerhalb der Tunnel wurden die Tunnellufttemperaturen im Bereich der thermisch aktivierten Tunnelabschnitte im Nahbereich der Tunnelschale erfasst. Über die genaue Anordnung und Art der Messdatenerfassung liegen keine Informationen vor. Die Qualität und Aussagefähigkeit der Messungen können aus diesem Grund nicht eindeutig bewertet werden. Die Messkurven der Tunnellufttemperaturen sind in Abbildung 4.31 in grau dargestellt. Die Sinusregressionen dieser Messdaten zeigen gegenüber dem Verlauf der Oberflächentemperatur eine Phasenverschiebung von ca. einem Monat und verlaufen in gedämpfter Form. Hierbei folgen die Kurven der Tunnellufttemperatur dem Zusammenhang nach Gleichung 4.50.

$$T(x, t) = \vartheta_{amb,max} \cdot e^{-\delta x_T / A_T} \cdot \sin 2\pi t + \vartheta_{amb,m} \quad (4.50)$$

Hierin sind  $\vartheta_{amb,max}$  und  $\vartheta_{amb,m}$  die im Jahresgang maximale und mittlere Umgebungstemperatur,  $A_T$  die Tunnelquerschnittsfläche und  $x_T$  der horizontale Abstand der Messstelle zur Erfassung der Tunnellufttemperatur zum näher gelegenen Tunnelportal. Die Kurvenanpassung erfolgt über den empirischen Wert  $\delta = 0,123$ . Diese semiempirische und vereinfachte Methode vernachlässigt die Lage des Tunnels unter der Oberfläche, die Oberflächenbeschaffenheit der Tunnelauskleidung, die Nutzung des Tunnels und die atmosphärischen Unterschiede an den Tunnelportalen. Erst die Auswertung weiterer Tunnellufttemperaturmessdaten können abschließend Aufschluss über die Anwendbarkeit dieser Methode zur Prognose der Tunnellufttemperatur in Bahntunneln geben. Basierend auf der gegebenen Gleichung ist es jedoch möglich, die Tunnellufttemperatur basierend auf der Oberflächenlufttemperatur außerhalb eines Tunnels und der Geometrie eines Tunnels zu prognostizieren.

Zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse innerhalb eines Bahntunnels existieren Versuchsstände am „Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt“ (DLR) in Göttingen [39] sowie am Birmingham Centre for Railway Research and Education [116]. Darüber hinaus existieren zahlreiche Literaturquellen, die sich mit der Simulation von Luftströmungen in Tunneln beschäftigen. In [9] wurden numerische Berechnungen auf der Basis eines Experimentes durchgeführt, bei dem die Strömungsverhältnisse in einer seitlich der Haupttröhre eines Eisenbahntunnels angeordneten Evakuierungsröhre simuliert wurden. In diesen Berechnungen wurden Strömungsfelder und Drücke ausgewertet. Die Untersuchungen in [15] konzentrieren sich auf die experimentelle Abbildung des sogenannten „Piston-Effekts“ bei der Einfahrt eines Zuges in das Tunnelportal. In [33] wurde mittels eines dreidimensionalen, kompressiblen Turbulenzmodells untersucht, welche Strömungsverhältnisse sich bei der Begegnung von 2 Zügen in einem Tunnel ergeben. In [43] wurden durch künstliche Ventilation hervorgerufene Tunnelluftströmungen in einem zweiröhrigen Tunnelbauwerk (Straßentunnel) numerisch untersucht und experimentell validiert. Hier setzten auch die Untersuchungen von [61] an, die vor allem Strömungszustände im Bereich von Entlüftungsbauwerken zeigen. Die Untersuchungen in [78] zielen im Speziellen auf die Strömungszustände im Bereich von Metrostationen ab. Hier werden Strömungsgeschwindigkeiten und Luftdrücke für alle Bereiche einer Metrostation numerisch ermittelt. In [99] wird ein analytischer Ansatz vorgestellt der es ermöglicht, die durch das Anfahren eines Zuges in einer Tunnelröhre hervorgerufenen Luftströmungen zu berechnen. Alle genannten Quellen geben Ansätze zur Beschreibung der Strömungszustände während einer Zugfahrt oder im Zuge einer künstlichen Belüftung des Tunnelquerschnitts. Zur Beurteilung des Wärmeaustausches zwischen dem Tunnelluftraum und einem in der Tunnelschale angeordneten Wärmeübertrager sind darüber hinaus aber vor allem die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten über einen längeren Betrachtungszeitraum von Bedeutung.

Für den Tunnel Stuttgart-Fasanenhof erfolgen im Bereich der thermisch aktivierten Tunnelblöcke Messungen der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit an jeweils diskreten Stellen nahe der Tunnelwand. Die hier aufgezeichnete Strömungsgeschwindigkeit repräsentieren daher nicht die über den Tunnelquerschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit. Allerdings vermitteln die Messungen einen Eindruck über das Strömungsregime innerhalb eines Stadtbahntunnels (vgl. Abb. 4.32).

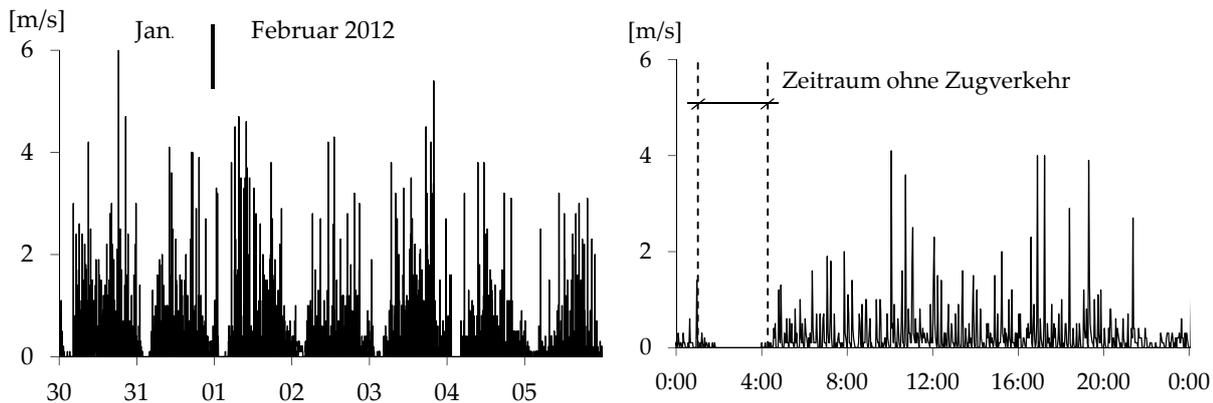


Abbildung 4.32: Strömungsmessdaten der Tunnelluft im Tunnel Stuttgart-Fasanenhof, links: Verlauf über eine Woche, rechts: Verlauf über einen Tag

Die direkte Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit von den Zugfahrten (vgl. [108]) führt bei der Durchfahrt eines Zuges zu Spitzengeschwindigkeiten von bis zu  $6\text{ m/s}$ , während bei Zeiten ohne Zugfahrt die Strömungsgeschwindigkeit bis auf  $0\text{ m/s}$  abfällt. So werden im Mittel Strömungsgeschwindigkeiten von ca.  $0,3\text{ m/s}$  (Sonn- und Feiertage) bis ca.  $0,4\text{ m/s}$  (werktags) erreicht. Da über die klimatischen Verhältnisse an den Tunnelportalen keine Informationen vorliegen, können keine Aussagen über die Grundströmung innerhalb des Tunnels Stuttgart-Fasanenhof getroffen werden.

#### 4.5.6 Schlussfolgerungen

Die im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Daten von Straßentunneln unterschiedlicher Länge, Überdeckung und Querschnittsform liefern erste Grundlagen zur Beschreibung des Tunnelklimas auf der Basis des gemessenen Fahrzeugaufkommens. Zur Vervollständigung dieser Modelle fehlen jedoch Messdaten des Klimageschehens an den entsprechenden Tunnelportalen. Dies zeigt sich besonders an den Tagen ohne den Einfluss des maßgeblichen Schwerverkehrs. Für diese Zeiten lassen sich sowohl die Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit als auch die Tunnellufttemperatur nicht eindeutig beschreiben. Die DACH-Staaten (Deutschland, Österreich, Schweiz) verfügen über ein dichtes Netz an sogenannten Glättemeldeanlagen (GMA), deren viertelstündige Messwerte Informationen zum Straßenzustand, Niederschlag, Lufttemperatur, Belagtemperatur, Luftfeuchte und Windströmung liefern. Darüber hinaus können optionale Messdaten wie Luftdruck oder die Strahlungsbilanz erfasst werden. Die Messstationen sind je nach klimatologischen und topographischen Bedingungen in Abständen von 5 bis 20 km angeordnet. Die Daten der Glättemeldeanlagen sind grundsätzlich dazu geeignet, die Modelle zur Beschreibung des Tunnelklimas fortzuschreiben, werden jedoch aktuell nicht gespeichert und stehen somit nicht für eine systematische Auswertung und Interpretation zu Verfügung. Für weitere Forschungsarbeiten mit dem Ziel der Beschreibung des Tunnelklimas in Straßentunneln wird empfohlen, einen Zugriff auf die Messdaten der Glättemeldeanlagen einzurichten und diese entsprechend zu archivieren. Auf der Basis

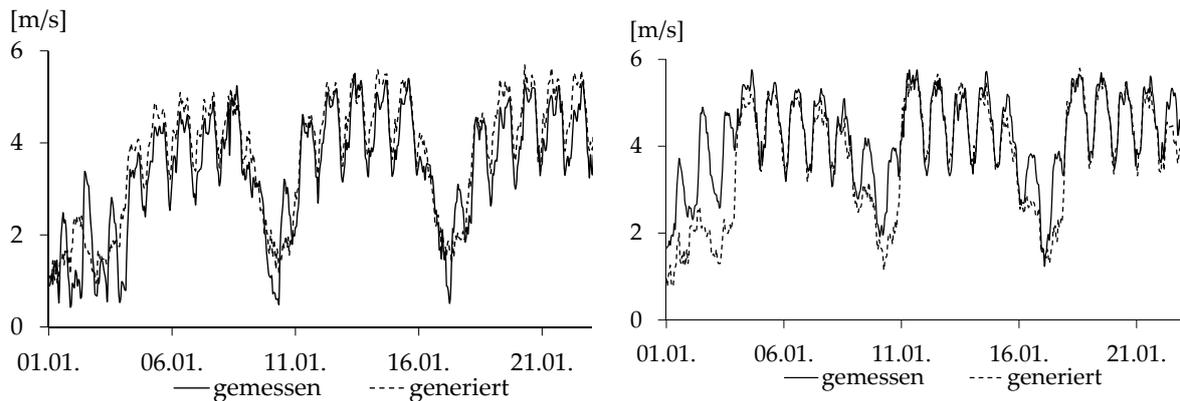


Abbildung 4.33: Strömungsmessdaten der Tunnelluft im Tunnel Jagdberg, links: Süd-  
röhre, rechts: Nordröhre

der zur Verfügung stehenden Datengrundlage kann die Strömungsgeschwindigkeit der Tunnelluft für Tunnel mit Richtungsrohren vereinfacht über eine Potenzfunktion nach Gleichung 4.51 ermittelt werden. Der Faktor  $a$  ist hierzu in den Grenzen  $0,4 < a < 0,9$  zu variieren, wobei für lange Tunnel mit großen Werten für  $a$  zu rechnen ist. Die Abbildung 4.33 zeigt exemplarisch die auf diese Weise ermittelte Strömungsgeschwindigkeit für die Tunnelröhren Jagdberg Nord und Süd im Vergleich zur gemessenen Strömungsgeschwindigkeit.

$$v_{TL} = a \cdot \left( \frac{SV}{h} \right)^{0,4} \quad (4.51)$$

Für Tunnel mit Gegenrichtungsverkehr wird der Ansatz einer über den Simulationszeitraum konstanten Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit im Bereich von  $0,2 < v_{TL} < 0,4 \text{ m/s}$  bei einem Simulationsintervall von einer Stunde empfohlen.

Zur Abbildung der Tunnellufttemperatur innerhalb eines Straßentunnels wird zunächst auf die Entwicklung des eindimensionalen Simulationsmodells gemäß Kapitel 5.3 verwiesen. Bei der Verwendung dieses Modells ist die Tunnellufttemperatur entlang der Längsachse des Tunnels das Ergebnis der Vorgabe der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit und der Temperatur am Tunnelportal sowie des Wärmeeintrags aus dem Fahrzeugverkehr. Bei der Simulation einer TGTA ohne die Nutzung dieses oder eines entsprechenden Modells kann dem Wärmeeintrag durch den Fahrzeugverkehr und des Tunnelklimas über die Berücksichtigung eines Temperaturgradienten in Tunnel längsrichtung von ca.  $1,7 \text{ K/km}$  Rechnung getragen werden. Für kurze Tunnel mit Gegenrichtungsverkehr wird auf der Basis des derzeitigen Kenntnisstandes der Ansatz einer Tunnellufttemperatur empfohlen, die der Temperatur am Tunnelportal entspricht.

Die analytische Auswertung des Temperaturgradienten in der Tunnelschale und der daraus abgeleitete Wärmeübergangskoeffizient zeigt trotz der angewendeten Methodik eine große Streubreite und lässt nur bedingt Rückschlüsse auf die Größe von  $\alpha$  zu. Mit den aus der Literatur bekannten Korrelationen zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten lässt sich der Temperaturverlauf in der Tunnelschale nur unzureichend

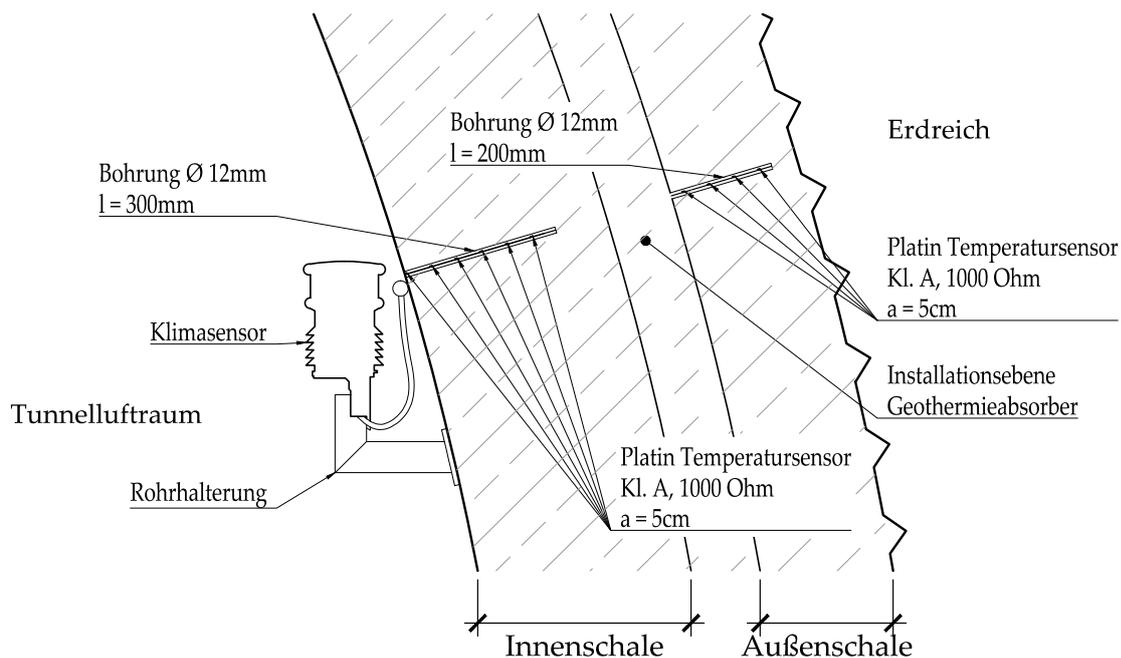


Abbildung 4.34: Prinzipskizze zur Anordnung der Messgeber zur Bestimmung des Wärmeübergangs von der Tunnelluft an die Tunnelinnenschale im Rosensteintunnel

abbilden. Unter Verwendung des Ansatzes nach [51] lässt sich zwar eine über den Jahresgang gemittelte Abweichung zwischen den gemessenen und den simulierten Werten erreichen, die in etwa in der Größenordnung der Messgenauigkeit der Temperatursensoren liegt, die maximale Abweichung übersteigt diese jedoch noch deutlich. Auf der Basis der bisherigen Datengrundlage ist die Ableitung einer verbesserten Korrelation zur Beschreibung des Wärmeübergangskoeffizienten nicht möglich, was zu einer Unter- bzw. Überschätzung des Wärmestroms zwischen dem Tunnelklima und der Tunnelinnenschale führen kann. Für den Stuttgarter Rosensteintunnel (siehe Kapitel 2) wurde ein Messaufbau entwickelt, der weitere Erkenntnisse zum Wärmeübergang von der Tunnelluft zur Tunnelinnenschale liefern wird (vgl. Abb. 4.34).

Über die Anordnung der Temperaturmessgeber in radialer Richtung ist die Bestimmung des luft- und erdseitigen Wärmestroms möglich. Über den direkt an der Oberfläche der Tunnelinnenschale angebrachten Sensor und in Verbindung mit der Temperatur- und Strömungsmessung des Klimasensors kann dann direkt auf den Wärmeübergangskoeffizienten geschlossen werden. Die dargestellte Messtechnik ist bereits im Rosensteintunnel installiert (Stand: Mai 2018), mit ersten Messergebnissen ist im Laufe des Jahres 2019 zu rechnen.

Zur Beschreibung des Tunnelklimas innerhalb von Bahntunneln wurde ein Verfahren entwickelt, das auf der Basis der Oberflächentemperatur  $\vartheta_{amb}$ , dem Tunnelquerschnitt  $A_T$  sowie der Entfernung des thermisch aktivierten Bereiches vom Tunnelportal  $x_T$  die realen Temperaturbedingungen im Tunnel stark vereinfacht nachbildet. Die Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit kann bei der Simulation einer TGTA auf der Basis von Stun-

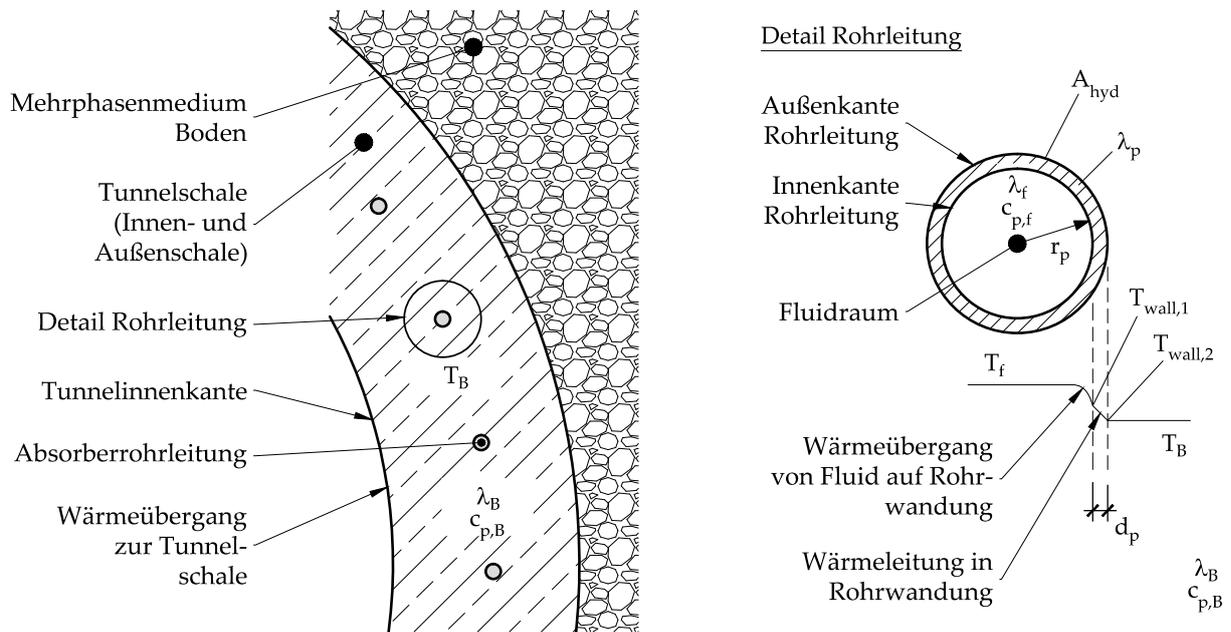


Abbildung 4.35: Übersicht zu den Wärmetransportvorgängen des Absorbersystems bestehend aus der Tunnelschale und den Absorberrohrlösungen

denmittelwerten zu ca.  $0,3 \text{ m/s}$  angenommen werden.

## 4.6 Wärmetransport im Absorbersystem

Das Absorbersystem einer TGTA wird durch die Betonschale des Tunnels sowie den im Beton angeordneten Rohrleitungen gebildet, durch die eine Absorberflüssigkeit zirkuliert. Das Absorberfluid wird üblicherweise durch ein Wasser-Frostschutzmittelgemisch gebildet, das ein Gefrieren des Fluids bei niedrigen Eintrittstemperaturen in den Absorber verhindert. Nachfolgend werden die grundlegenden Wärmetransportmechanismen in diesem Zusammenhang erläutert. Wie in Kapitel 5.3 gezeigt wird, kann die Abbildung des Absorbersystems für gewisse Fragestellungen auch als zweidimensionales Berechnungsmodell erfolgen. Die Berücksichtigung der Rohrleitungen erfolgt hierbei über eine vereinfachte Randbedingung 1. Art (Temperatur), die am Ende dieses Kapitels beschrieben wird.

**Absorberrohrlösungen in einem dreidimensionalen Berechnungsmodell** Die korrekte Abbildung der Rohrleitungen einer TGTA kann grundsätzlich nur im Zusammenhang mit einem dreidimensionalen Berechnungsmodell erfolgen. In [71] und [12] werden hierzu sogenannte Widerstands-Kapazitätsmodelle eingeführt, die zur dreidimensionalen Abbildung des Wärmetransportes die Analogie zwischen Wärmelehre und der Elektrizitätslehre nutzen, in dem die Wärmetransportmechanismen in thermische Widerstände und Kapazitäten überführt werden. Vorteilhaft an dieser Modellbildung ist die geringe Berechnungszeit durch die Möglichkeit einer groben geometrischen Diskre-

tisierung. Vor dem Hintergrund einer gesamtheitlichen Bilanzierung einer TGTA ist der Nachteil dieser Modelle, dass keine klassische Rohrströmung gelöst wird und somit keine Aussagen über auftretende Druckverluste und damit Pumpleistungen getroffen werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf ein thermisch-hydraulisches Modell zurückgegriffen, das innerhalb der Rohrleitungen einen eindimensionalen Wärmetransport löst. Die Randbedingungen sind die Strömungsgeschwindigkeit  $v_p$  sowie eine Eintrittstemperatur  $T$  am Eintritt des Fluids in die Rohrleitung. Gut gestellte Problemstellungen (well-posed Randbedingungen) sind ein wesentlicher Bestandteil in vielen Bereichen der numerischen Berechnung physikalischer Problemstellungen. Um dieses Kriterium für die Rohrströmung zu erfüllen, werden am Austritt des Fluids aus dem Rohr eine Wärmeausstromrandbedingung ( $-\vec{n} \cdot \dot{q} = 0$ ) sowie ein der Problemstellung entsprechender Druck  $p_p$  vorgegeben.

Innerhalb des strömenden Fluides beschreibt eine innere Wärmequelle  $\dot{Q}_{fric}$  die durch innere Reibung des Fluids entstehende Wärme (siehe Gleichung 4.52). Für Einphasenfluide kann zur Beschreibung von  $f_D$  der Zusammenhang nach [126] für den gesamten Strömungsbereich von laminar bis turbulent entsprechend Gleichung 4.53 angesetzt werden.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{fric} &= f_D \cdot \frac{\rho_f \cdot A_f}{2 \cdot d_{hyd}} |v_p|^3 \\ f_D &= f_D \left( Re, \frac{e}{d_{hyd}} \right) \\ Re &= \frac{\rho_f \cdot v_p \cdot d_{hyd}}{\mu}\end{aligned}\tag{4.52}$$

$$\begin{aligned}f_D &= 8 \cdot \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1,5} \right]^{1/12} \\ A &= \left[ -2,457 \cdot \ln \left( \left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 (e/d) \right) \right]^{16} \\ B &= \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16}\end{aligned}\tag{4.53}$$

Der Wärmetransport innerhalb der Rohrwandung (vgl. Abb. 4.35) wird über den Wärmestrom  $\dot{Q}_{wall}$  berücksichtigt. Hierbei wird zunächst ein Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  vom Fluid auf die innere Rohrwand berücksichtigt.

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  beschreibt den Wärmeübergang vom Fluid zur inneren Rohrwandung. Hierbei ist zwischen laminaren ( $Re < 3000$ ) und turbulenten ( $3000 < Re < 6 \cdot 10^6, 0,5 < Pr < 2000$ ) Strömungsverhältnissen zu unterscheiden. Für laminare Strömungsbedingungen wird  $Nu = 3,66$ , für einen turbulenten Strömungszustand der Zusammenhang gemäß Gleichung 4.54 in Anlehnung an [51] bei der Ermittlung von  $\alpha$  berücksichtigt.

$$Nu = \frac{(f_D/8) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot (f_D/8)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (4.54)$$

Im Anschluss erfolgt der Wärmetransport durch die Rohrwandung durch Wärmeleitung. Am Übergang von der Rohrwandung an den umgebenden Tunnelschalenbeton wird auf den Ansatz eines Kontaktwiderstandes verzichtet und  $T_{wall,2} = T_B$  gesetzt. Der Wärmestrom vom Fluid auf die Innenseite der Rohrwandung errechnet sich quasi stationär dadurch nach Gleichung 4.55.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{wall} &= \alpha \cdot A_{hyd} \cdot (T_f - T_{wall,1}) = \frac{A_{hyd} \cdot \lambda_p}{\ln((r_p + d_p)/r_p)} \cdot (T_{wall,1} - T_{wall,2}) \\ A_{hyd} &= 2 \cdot \pi \cdot r_p \end{aligned} \quad (4.55)$$

Die Temperatur der äußeren Rohrwandung  $T_{wall,2}$  entspricht der Tunnelschalentemperatur  $T_B$ , die durch das berechnete Temperaturfeld innerhalb der Tunnelschale beschrieben ist. Die Kopplung des eindimensionalen Wärmetransportmodells an die dreidimensionale Domain der Tunnelschale erfolgt durch COMSOL automatisiert. Innerhalb des Tunnelschalenbetons wird die Wärme ausschließlich durch Wärmeleitung nach Gleichung 4.2 berücksichtigt.

### 4.6.1 Betrieb der Tunnelgeothermieanlage

Das thermische Potential einer Geothermieanlage ist in hohem Maße von ihrem Betrieb abhängig. In [77] wurden auf der Basis von experimentellen Untersuchungen einer 90 m langen Erdwärmesonde sowie einem 20 m langen, thermisch aktivierten Gründungspfahl jeweils zwei Heiz- und Kühlbetriebe über 2 Jahre untersucht. Hierbei wurde die Anlage unter der Woche von 8 Uhr morgens bis 5 Uhr abends betrieben. Mit Blick auf die Effizienz der Erdwärmesonde wird in [77] eine ausgeglichene Wärmebilanz des Untergrundes genannt. Der Energiebedarf, der durch eine Geothermieanlage zu decken ist, wird häufig durch die thermischen Eigenschaften eines individuellen Gebäudes bestimmt, das im Jahres- und Tagesgang eine hohe Dynamik zeigt. [73] hat in diesem Zusammenhang eine dynamisch gekoppelte Simulation einer Erdwärmesonde mit einem Gebäudeenergiebedarf untersucht und zeigt, dass durch die Abbildung eines realitätsnahen Energiebedarfs die Auslegung einer Geothermieanlage gesteigert werden kann. Die Kopplung von Simulationsumgebungen zur Abbildung des Wärme- und Kälteenergiebedarfs eines Gebäudes mit detaillierten Modellen zur Abbildung eines Wärmeübertragers im Untergrund in Verbindung mit mathematischen Optimierungsalgorithmen [131] bietet Möglichkeiten der weiteren Optimierung einer Geothermieanlage. Im Folgenden werden zwei Ansätze zur Abbildung eines differenzierten Energiebedarfs vorgestellt, die im Zusammenhang mit einer TGTA die Prognose des geothermischen Potentials ermöglichen.

Tabelle 4.4: Systematik der Typtagkategorien nach [123]

| Jahreszeit | Werktag W |           | Sonntag S |           |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|            | Heiter H  | Bewölkt B | Heiter H  | Bewölkt B |
| Übergang Ü | ÜWH       | ÜWB       | ÜSH       | ÜSB       |
| Sommer S   | SWX       |           | SSX       |           |
| Winter W   | WWH       | WWB       | WSH       | WSB       |

**Statischer Gebäudeenergiebedarf** Unter einem statischen Gebäudeenergiebedarf wird ein thermisches Lastprofil verstanden, das einen zeitpunktbezogenen Wärmebedarf widerspiegelt, der nicht dynamisch an die Wärmetransportmechanismen einer TGTA gekoppelt ist. Thermische Lastprofile werden in Deutschland vom „Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft“ für sogenannte „unterbrechbare Verbrauchseinrichtungen“, d.h. für strombetriebene Heizsysteme wie elektrische Speicherheizungen oder Wärmepumpen entwickelt. Darüber hinaus existieren vom „Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft“ Gas-Standardlastprofile, die von [56] auf der Basis von mehr als 250 Messungen an realen Gebäuden entwickelt wurden. Diese haben sich vor allem bei Netzbetreibern zur Prognose der Gasversorgung etabliert. Zur Abschätzung des Wärmeenergiebedarfs sind diese Grundlagen jedoch ungeeignet, da sie nur den durchschnittlichen Gasbedarf, nicht aber den aktuellen Heizwärmebedarf abdecken [130]. In [123] werden repräsentative Lastprofile für Ein- und Mehrfamilienhäuser angegeben, die den Wärmeenergiebedarf zur Bereitstellung von Heizwärme und Energie zur Warmwasserbereitung wiedergeben. Die Grundlage für die entwickelten Lastprofile bilden Messungen von fünf Einfamilien- und 3 Mehrfamilienhäusern. Bei den Lastprofilen handelt es sich um normierte, real gemessene Tageslastgänge, denen verschiedenen „Typentagkategorien“ zugeordnet werden. Neben der Ableitung von Lastprofilen aus gemessenen Bedarfsgängen wird in [46] ein gekoppeltes Wärmebilanzierung-Stochastik-Modell verwendet, das neben der Energiebilanz das Nutzverhalten, das den Wärmeenergiebedarf maßgeblich mit beeinflusst, abbildet. Der Vorteil der zeitabhängigen Lastprofile besteht darin, dass Glättungseffekte berücksichtigt werden, wenn mehr als eine Wohneinheit betrachtet wird ([46]).

Im Folgenden wird das Verfahren nach [123] und die zu berücksichtigenden Eingangsparameter zusammenfassend beschrieben und die Anwendung für die TGTA vorgestellt.

In [123] repräsentiert ein sogenannter „Typentag“ den Energiebedarf eines Gebäudes an einem Tag der jeweiligen „Typentagkategorie“ (siehe Tabelle 4.4). Die Jahreszeit unterteilt sich in die Sommer- ( $> 15^{\circ}\text{C}$ ), Übergangs- ( $5^{\circ}\text{C} < T < 15^{\circ}\text{C}$ ) und Wintertage ( $< 15^{\circ}\text{C}$ ). Die Tagesmitteltemperatur bezeichnet den Mittelwert der Temperatur  $T$  über einen Zeitraum von 24 Stunden. Maßgeblich ist die Lufttemperatur in 2 m Höhe über dem Erdboden.

Der Einfluss des Gebäudestandortes wird über die Verknüpfung der Typentage mit den Klimadaten der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes vorgenommen (nähere Beschreibung zu den Daten der Testreferenzjahre siehe in Kapitel 4.1). Hierzu wird ein Typentaggang auf Basis der Lufttemperatur, des Bedeckungsgrads sowie des Wo-

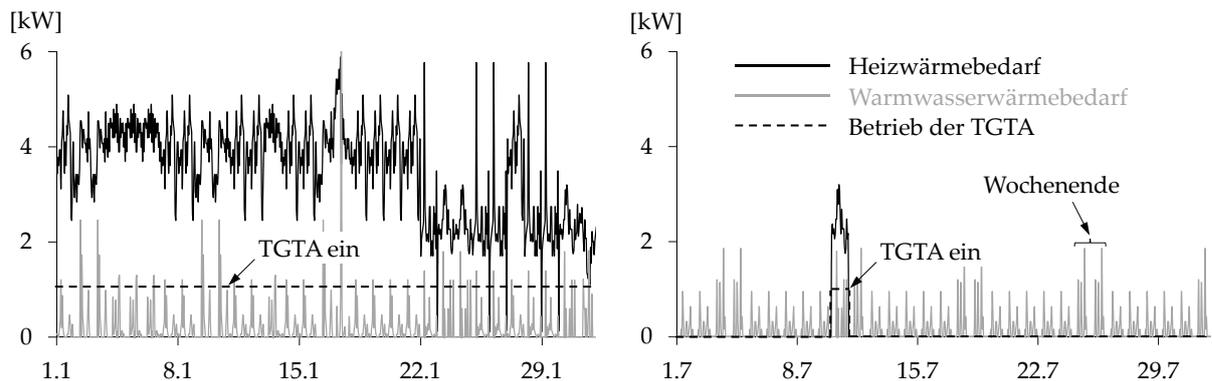


Abbildung 4.36: Statische Wärmebedarfsprofile für den Heiz- und Warmwasserwärmebedarf eines Einfamilienhauses nach [123] und [38], links: Januar, rechts: Juli

chentags generiert. Anschließend erfolgt die Erstellung des stündlich aufgelösten Wärmeenergiebedarfs durch Multiplikation des mittleren täglichen Wärmeenergiebedarfs des entsprechenden Gebäudes mit den in [123] gegebenen normierten Einheitsgangprofilen. Die Abbildung 4.36 zeigt die so generierten Wärmebedarfsprofile exemplarisch für die Monate Januar (links) und Juli (rechts).

Die Nutzung von statischen Gebäudebedarfsprofilen unter Vernachlässigung einer Rückkopplung an den Bedarf reduziert den Modellierungsaufwand und die aus komplexen Modellen resultierende längere Simulationsdauer. Die Verwendung eines konkreten Wärme- bzw. Kälteenergiebedarfs als Randbedingung 2. Art birgt allerdings die Gefahr, zulässige Temperaturen in der Tunnelschale oder im angrenzenden Boden zu über- oder unterschreiten. Dies ist besonders im Zuge einer Vordimensionierung einer TGTA der Fall, wenn die zur Deckung des Gebäudeenergiebedarfs erforderliche Absorberfläche noch nicht bekannt ist. In diesem Zusammenhang bieten sich zwei Vorgehensweisen an:

- Aufprägen des erforderlichen Wärme- bzw. Kälteenergiebedarfs  $\dot{Q}$  unter Beobachtung des Temperaturfeldes im Boden und der Tunnelschale
  - Vorteil: Die TGTA wird nur mit der wirklich erforderlichen Entzugsleistung beaufschlagt.
  - Nachteil: Die erforderliche Absorberfläche zur Deckung des Energiebedarfs ist nach der Auswertung des Temperaturfeldes und der Bewertung des zulässigen Temperaturbereiches anzupassen, bzw. die maximale Entzugsleistung ist durch einen internen Thermostat zu begrenzen.
- Aufprägen einer minimal bzw. maximal zulässigen Absorbtemperatur und Auswertung des resultierenden Wärmestroms
  - Vorteil: Das Temperaturfeld befindet sich automatisch im zulässigen Bereich und es kann direkt auf die erforderliche Absorberfläche geschlossen werden.

- Nachteil: Der TGTA wird unter Umständen mehr Energie entzogen, als es für die Deckung des Gebäudebedarfes erforderlich ist.

Im Rahmen dieser Arbeit werden statische Lastprofilen über eine interne Temperaturrandbedingung (Randbedingung 1. Art) berücksichtigt. Hierzu wird jeweils zu den Zeiten eines Heizwärme- bzw. Kälteenergiebedarfs die den Absorber repräsentierende Geometrie mit einer minimalen bzw. maximalen Temperaturrandbedingung angesteuert. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass zu den Zeiten in denen Heizwärmeenergie benötigt wird, die TGTA in Betrieb ist (vgl. gestrichelte Linie in Abb. 4.36). Die Deckung des Warmwasserenergiebedarfs erfolgt somit nicht durch die TGTA.

**Dynamische Kopplung an eine Gebäudesimulation** Bei der Nutzung eines statischen Gebäudeenergiebedarfs erfolgt keine Rückkopplung der Ergebnisse der Wärmetransportberechnung der TGTA an den Wärmepumpen- bzw. den Sekundärkreislauf. Vor dem Hintergrund, dass die spätere Regelung einer Geothermieanlage genau diese Rückkopplungseffekte nutzen kann um die Gesamteffizienz des Systems zu steigern, existieren für den Bereich klassischer Geothermieabsorber (wie z.B. Erdwärmesonden) bereits seit fast zwei Jahrzehnten Softwareschnittstellen zwischen kommerziellen Softwarepaketen zur Simulation der „Technischen Gebäudeausrüstung“ und der „Technischen Baugrundausrüstung“ [81]. Diese Schnittstellenlösungen befinden sich bis dato immer noch in der Weiterentwicklung [131] und werden an unterschiedlichen Forschungseinrichtungen fortgeschrieben. Hier setzt die Entwicklung einer Kopplung zwischen den Simulationsumgebungen COMSOL und TRaNsient SYstems Simulation (TRNSYS) an, die an den Instituten für Gebäudeenergetik und für Geotechnik der Universität Stuttgart entwickelt wurde. TRNSYS ist ein dynamisches, modular aufgebautes Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm, mit dem das Verhalten von Gebäuden und ihrer technischen Gebäudeausrüstung, wie z.B. thermoaktive Bauteile, Heizkörper, Wärmepumpen und Verglasungssysteme, sowie Regelungssysteme für Gebäude betrachtet werden können. Grundsätzlich ist die entwickelte Kopplung mit allen Gebäudesimulationsprogrammen möglich, soweit diese die Möglichkeit besitzen, nach jedem zuvor definierten Zeitintervall die auszutauschenden Systemparameter als ASCII-Code abzuspeichern und hieraus einzulesen. Die Kopplung einer TGTA mit der „Technischen Gebäudeausrüstung“ erfolgt auf der Eintrittsseite des Primärkreislaufes durch die Eintrittstemperatur  $T_{in}$  sowie die Vorgabe des Volumenstroms  $\dot{V}$  bzw. der Fließgeschwindigkeit  $v_p$ . Nach der Zirkulation des Fluids durch die Rohrleitungen ist von der TGTA die Austrittstemperatur  $T_{out}$  sowie für den Fall einer energetischen Gesamtbilanzierung der Druckverlust  $\Delta p_p$  (vgl. Abb. 2.2) zu übergeben. Die Umsetzung der Schnittstelle erfolgt innerhalb der Simulationsumgebung COMSOL über den LiveLink™ for MATLAB® (MATLAB) sowie in TRNSYS über den Type 155 (siehe Abb. 4.37).

Zunächst ruft das Programm TRNSYS über den Type 155 die Datei „TRNSYS.m“ auf (siehe Anhang D), liest die Werte der Vorlauftemperatur  $t_{VL}$  und des Volumenstroms  $v_{ABS}$  ein und führt den ersten Berechnungsschritt durch. Als maßgebliches Simulationsintervall im Bereich der Gebäudesimulation hat sich in der Ingenieurspraxis eine Stunde etabliert [56]. Im Anschluss an diesen Berechnungsschritt werden die aktuelle

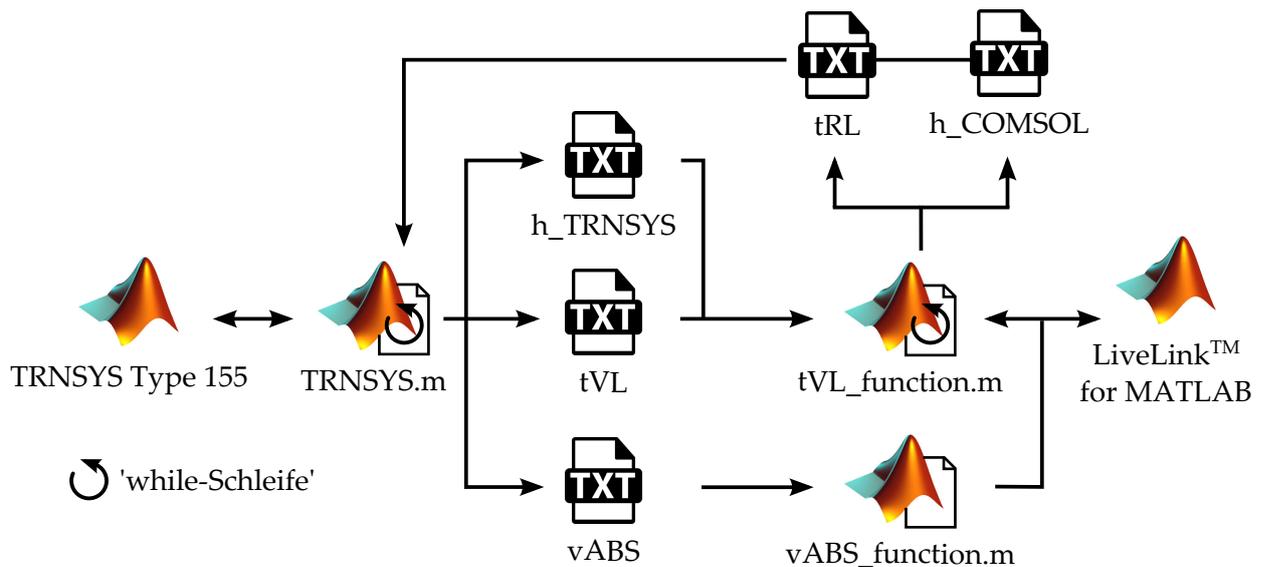


Abbildung 4.37: Schematische Darstellung der Kopplung zwischen COMSOL und TRNSYS

Simulationszeit „h\_TRNSYS“ sowie die Parameter  $t_{VL}$  und  $v_{ABS}$  an COMSOL übergeben. Hierzu werden diese Werte in die entsprechenden ASCII-Dateien geschrieben. In der Zwischenzeit wartet TRNSYS in einer „while-Schleife“, auf den nächsten Berechnungsschritt aus COMSOL. In COMSOL werden nun die Vorlaufzeit  $t_{VL}$  und der Volumenstrom  $v_{ABS}$  gelesen und ein Berechnungsschritt durchgeführt. Über die Funktion 'tVL\_function.m' schreibt COMSOL die aktuelle Berechnungszeit sowie die errechnete Rücklaufzeit in die entsprechenden ASCII-Dateien und wartet über eine in „tVL\_function.m“ implementierte „while-Schleife“ auf den nächsten Berechnungsschritt von TRNSYS. Durch den Austausch geringer Datenmengen (maximal 70 Bytes) eröffnet dies die Möglichkeit der Simulation an unterschiedlichen Standorten über den Zugriff auf ein gemeinsames virtuelles Laufwerk. Die bisherige Kopplung sieht noch keine automatisierte Kontrolle des Temperaturfeldes der Tunnelschale sowie des umgebenden Bodens vor. Die Berechnungsergebnisse sind aus diesem Grund nach der Beendigung der Berechnung im Hinblick auf die Einhaltung eventueller Temperaturgrenzwerte zu beurteilen.

## 4.6.2 Schlussfolgerungen

Die dreidimensionale Abbildung der Rohrkreisläufe innerhalb der Tunnelschale wird durch Einführung des beschriebenen Rohrströmungsmodells innerhalb der Softwareumgebung COMSOL möglich. Für gewisse Fragestellungen kann die Abbildung des Absorbersystems auch als zweidimensionales Berechnungsmodell erfolgen, Hinweise zu dieser Modellierung sind dem Kapitel 5.3 zu entnehmen. Zur Beurteilung des geothermischen Potentials einer TGTA ist der Betrieb der Anlage möglichst realitätsnah abzubilden. Hierzu können statische Gebäudeenergiebedarfsprofile auf der Basis der „Testreferenzjahre“ [38] und [123] unter Berücksichtigung ihrer Vor- und Nachteile genutzt wer-

den. Die Generierung eines entsprechend stündlich aufgelösten Energiebedarfs ist mittels des in Anhang D gezeigten Berechnungsblattes möglich. Das Kapitel 5.4.1 nutzt die statische Gebäudeenergiebedarfsprofile als Grundlage für die durchgeführten Parameterstudien. Zur Berücksichtigung einer Interaktion zwischen einer TGTA und der „Technischen Gebäudeausrüstung“ kann auf die programmierte COMSOL-TRNSYS Schnittstelle zurückgegriffen werden, die grundsätzlich auch für andere Gebäudesimulationsumgebungen angepasst werden kann. Durch die Kopplung der Simulationsmodelle „Gebäude“ und „Tunnel“ wird die Möglichkeit eröffnet, die Gesamteffizienz einer TGTA im Sinne einer JAZ zu bewerten. Das Kapitel 5.4.2 zeigt diese Vorgehensweise exemplarisch für eine, an ein Bürogebäude gekoppelte TGTA, die sowohl für die Deckung der Heiz- als auch der Kühllast zum Einsatz kommt.

# Kapitel 5

## Numerische Simulationsmodelle

### 5.1 Finite Elemente Methode und eingesetzte Programmumgebung

**Finite Elemente Methode** Physikalische Prozesse wie der Stoff- oder Wärmetransport können üblicherweise durch partielle Differentialgleichungen nach Raum und Zeit beschrieben werden (allgemein gemäß Gleichung 5.1).

$$Au = f \quad (5.1)$$

Für einfache Geometrien und stationäre Vorgänge wird zur Lösung der Differentialgleichungen auf geschlossene Formulierungen (z.B. Formfaktoren) oder Nomogramme (zeitabhängige Temperaturverläufe) zurückgegriffen. Im Bereich der Tunnelgeothermie sind zum einen zeitvariante Randbedingungen, zum anderen komplexe Geometrien zu berücksichtigen, die nicht ohne Weiteres in Problemstellungen überführt werden können, für die analytische Lösungen vorliegen. Stattdessen kann eine Annäherung der Gleichungen konstruiert werden, die typischerweise auf verschiedenen Arten von Diskretisierungen basiert. Diese Diskretisierungsmethoden approximieren die partiellen Differentialgleichungen mit numerischen Modellgleichungen, die mit numerischen Methoden gelöst werden können. Die Lösung der numerischen Modellgleichungen ist wiederum eine Annäherung an die reale Lösung der Differentialgleichung. Die FEM wird verwendet, um solche Näherungen zu berechnen. Als Pionier auf dem Gebiet der FEM gilt der Brite Zienkiewicz [137]. Der Grundgedanke der FEM besteht darin, das zu untersuchende Gebiet in eine endliche Anzahl von Teilgebieten (Finite Elemente) räumlich und zeitlich zu zerlegen (Diskretisierung).

Der Interpolation kommt bei der FEM eine zentrale Bedeutung zu. Die Basis bildet hierzu der Lagrangesche Interpolationsansatz. Gesucht wird eine Funktion  $u_h$ , die an den bekannten Stellen (Netzknotten) den Wert  $u$  annimmt (vgl. Gleichung 5.2).

$$u_h(x_i, y_i, z_i) = u_i \quad i = 1, \dots, N \quad (5.2)$$

Zwischen den bekannten Netzknotten wird für die Lösungsfunktion der Ansatz gemäß Gleichung 5.3 in Ansatz gebracht.

$$u_h(x_i, y_i, z_i) = \sum_{i=1}^N u_i \phi_i(x, y, z) \quad (5.3)$$

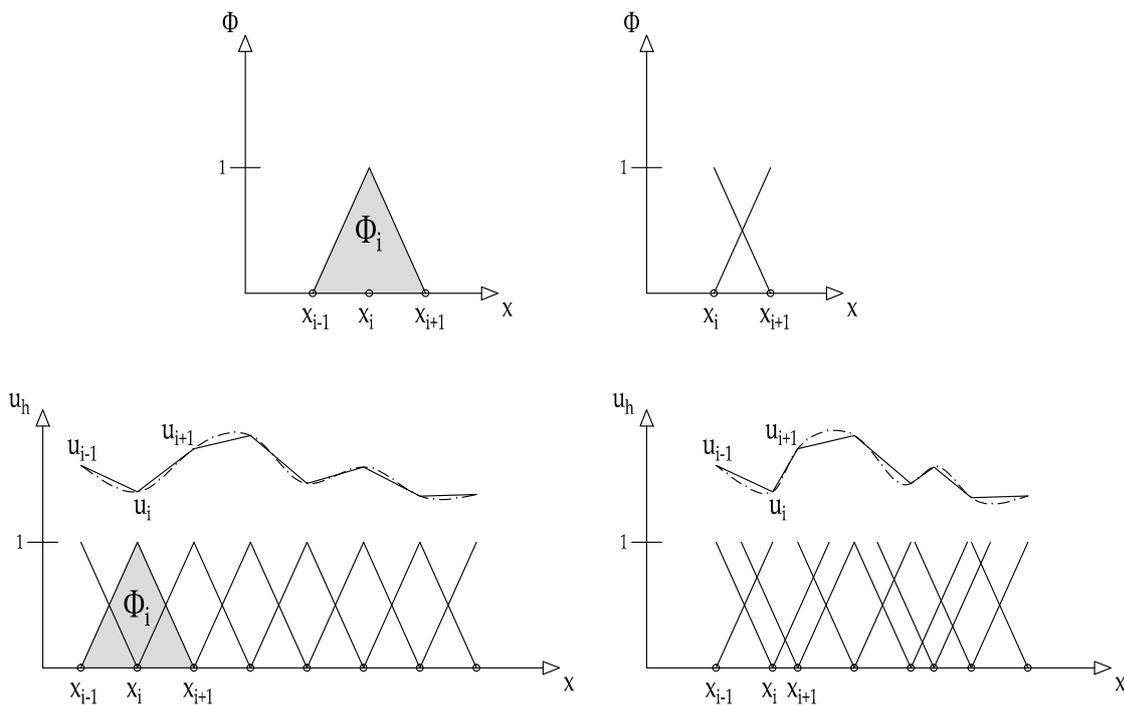


Abbildung 5.1: Lagrangesche Interpolationspolynome: oben links: lineare Ansatzfunktion  $\phi_i$  bezogen auf den Knoten  $x_i$ , oben rechts: lineare Ansatzfunktion für ein finites Element, unten links: interpolierte Funktion  $u_h$  als lineare Interpolation durch die Funktion  $\phi_i$  sowie Funktion  $u$  (Strichpunkt) für ein regelmäßiges Netz, unten rechts: wie unten links für ein unregelmäßiges Netz

Hierbei hat die sogenannte Lagrangesche Ansatzfunktion  $\phi_i$  die Bedingung zu erfüllen, dass sie am entsprechenden Knoten 1, an allen anderen Knoten 0 beträgt. Darüber hinaus muss die Summe aller Ansatzfunktionen 1 ergeben. Die Abbildung 5.1 zeigt die lineare Ansatzfunktion für ein 1D-Element.

Die Abbildung 5.1 zeigt, dass die Lagrangesche Ansatzfunktion  $\phi_i$  eine sehr begrenzte Unterstützung (nur über ein enges Intervall hinweg ungleich Null) und eine Überlappung entlang der  $x$ -Achse aufweist. Vor diesem Hintergrund sind je nach Aufgabenstellung Ansatzfunktionen höherer Ordnung, z.B. quadratische Interpolationspolynome zu verwenden. Diskretisiert man nun das kontinuierliche Problem gemäß Gleichung 5.1 mithilfe der Ansatzfunktion gemäß Gleichung 5.3 auf die entsprechenden Knoten einer Domain, erhält man den Zusammenhang gemäß Gleichung 5.4.

$$A \left( \sum_{i=1}^N u_i \phi_i(x, y, z) \right) = f \quad (5.4)$$

Es wird folglich nicht das reale Problem sondern lediglich eine Annäherung entsprechend Abbildung 5.1 gelöst. Daher kann die Lösung nicht exakt sein, sondern es wird ein mathematischer Rest bleiben, der im Bereich der FEM als Residuum  $R$  beschrieben

wird (vgl. Gleichung 5.5) und den es gilt zu minimieren.

$$R = A \left( \sum_{i=1}^N u_i \phi_i \right) - f \quad (5.5)$$

Am Beispiel des Standard-Galerkinverfahrens wird das weitere Vorgehen zur Generierung des Gleichungssystems erläutert. Mit der Gleichung 5.5 existiert eine Gleichung für N Unbekannte. Um hieraus ein algebraisches Gleichungssystem zu generieren, wird mit den Ansatzfunktionen  $\phi_j$ ,  $j = 1, \dots, N$  (auch Wichtungsfunktionen) multipliziert und über die Lösungsdomain  $\Omega$  gemäß Gleichung 5.6 integriert.

$$\sum_{i=1}^N c_i \int_{\Omega} A \phi_i \phi_j d\Omega = \int_{\Omega} f \phi_j d\Omega \quad i = 1, \dots, N \quad (5.6)$$

Es entsteht ein lineares Gleichungssystem bestehend aus einer Matrix  $\bar{A} = \int_{\Omega} A \phi_i \phi_j d\Omega$  auf der linken, sowie einem Vektor  $\vec{f} = \int_{\Omega} f \phi_j d\Omega$  auf der rechten Seite, aus denen sich eine vollständige Lösung konstruieren lässt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden thermisch-hydraulisch gekoppelte Berechnungen durchgeführt, bei denen ein besonderes Augenmerk auf die Verwendung entsprechender Ansatzfunktionen zu legen ist. Während Einzelphysik-Finite-Elemente-Probleme unabhängig von der Elementordnung zur gleichen Antwort konvergieren, kann es bei der Untersuchung von Multiphysikproblemstellungen zu Konvergenzproblemen bzw. Oszillationen kommen. Im Allgemeinen wird die Temperatur über lineare Elemente und die Geschwindigkeit, bzw. der Druck über quadratische Elemente diskretisiert.

**Differentialgleichungen** Zur Beschreibung des Temperaturfeldes innerhalb einer Berechnungsdomain werden je nach Aufgabenstellung und Raumdimension unterschiedliche Differentialgleichungen erforderlich. Für die Untersuchungen im Zusammenhang mit einer TGTA ist zwischen der Lösung des Temperaturfeldes innerhalb der Tunnelschale und dem umgebenden Boden zu unterscheiden. Für die Tunnelschale wird das instationäre Temperaturfeld durch die Gleichung 5.7 beschrieben, die für alle Raumdimensionen gültig ist.

$$\underbrace{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{\nabla(-\lambda \nabla T)}_{(2)} = + \underbrace{\dot{Q}}_{(3)} \quad (5.7)$$

Hierin beschreibt der Term (1) die zeitliche Änderung des Wärmeinhalts, der Term (2) die Wärmeleitung nach dem Fourierschen Gesetz und der Term (3) eine interne Wärmequelle. Für das Mehrphasenmedium Boden, in dem neben reiner Wärmeleitung auch der advective Wärmetransport zu berücksichtigen ist, wird das Temperaturfeld durch die Gleichung 5.8 beschrieben.

$$\underbrace{\rho c_{p,eff} \cdot v_f \cdot \nabla T}_{(4)} + \underbrace{\rho c_{p,eff} \frac{\partial T}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{\nabla (-\lambda_{eff} \nabla T)}_{(2)} = \underbrace{\dot{Q}}_{(3)} \quad (5.8)$$

Der Term (4) beschreibt den advektiven Wärmetransport, ausgedrückt über die Filtergeschwindigkeit  $v_f$ . Des Weiteren wird thermisches Gleichgewicht zwischen den Konstituenten Feststoff und Flüssigkeit vorausgesetzt (vgl. Kapitel 4.4). Hierzu werden die effektiven thermischen Materialparameter eingeführt. Das an den Wärmetransport gekoppelte Strömungsfeld wird durch das Gesetz nach Darcy beschrieben und nach Gleichung 5.9 berücksichtigt.

$$v_f = -\frac{K}{\mu} (\nabla p + \rho_f g \nabla D) \quad (5.9)$$

Hierin ist  $K$  die Permeabilität,  $\eta$  die dynamische Viskosität und  $\rho_f$  die Dichte des Fluids.  $p$  beschreibt den Fluiddruck und  $\Delta D$  gibt den Einheitsvektor, in dessen Richtung die Schwerebeschleunigung  $g$  wirkt. Alternativ kann das Strömungsfeld innerhalb der porösen Matrix auch über die hydraulische Durchlässigkeit  $k_f$  nach Gleichung 5.10 beschrieben werden.

$$v_f = -\frac{k_f}{\rho_f g} (\nabla p + \rho_f g \nabla D) \quad (5.10)$$

Die Abbildung der Absorberrohrleitungen innerhalb der Tunnelschale erfolgt durch eindimensionale Elemente, die in die dreidimensionale Berechnungsdomain der Tunnelschale eingekoppelt sind. Die Lösung des Wärmetransportes innerhalb dieser Elemente erfolgt über eine Wärmeleitungsgleichung in eindimensionaler Form gemäß Gleichung 5.11.

$$\underbrace{\rho_f \cdot c_{p,f} A_f \cdot v_p \nabla T}_{(4)} + \underbrace{\rho_f \cdot c_{p,f} \cdot A_f \cdot \frac{\partial T}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{\nabla A_f \cdot -\lambda_f \nabla T}_{(2)} = \underbrace{\dot{Q}_{fric}}_{(3a)} \pm \underbrace{\dot{Q}_{wall}}_{(3b)} \quad (5.11)$$

Die Materialparameter berücksichtigen hierbei das in den Rohrleitungen zirkulierende Absorberfluid. Der Term (3a) auf der rechten Seite der Gleichung 5.11 berücksichtigt einen internen Wärmeeintrag in das Fluid infolge Fluidreibung. Dieser Anteil kann für Absorberrohrleitungen von TGTAN im Allgemeinen vernachlässigt werden. Der Term (3b) dient der Einkoppelung des eindimensionalen Rohrströmungsmodell in die umgebende Berechnungsdomain der Tunnelschale.

Neben den Untersuchungen an den Simulationsmodellen, die eine TGTA repräsentieren, wird im Rahmen dieser Arbeit das Strömungs- und Temperaturfeld innerhalb des Versuchsreaktors (siehe Kapitel 4.4 und Anhang B) auf der Basis eines numerischen Modells untersucht. Das Temperaturfeld innerhalb des Versuchsreaktors lässt sich mathematisch über die Gleichung 5.12 beschreiben.

$$\underbrace{\rho c_P u \cdot \nabla T}_{(4)} + \underbrace{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{(1)} = \underbrace{\alpha_p T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right)}_{(5)} + \underbrace{\tau : \nabla u}_{(6)} + \underbrace{\dot{Q}}_{(3)} \quad (5.12)$$

Der Term (5) auf der rechten Seite von Gleichung 5.12 beschreibt die Arbeit, die durch Druckänderungen geleistet wird und kann für die Strömung innerhalb des Reaktors (niedrige Machzahlen) vernachlässigt werden ( $\alpha_p$  = thermischer Ausdehnungskoeffizient). Der Term (6) steht für die viskose Energiedissipation in der Flüssigkeit ( $\tau$  = viskoser Spannungstensor).

Für die Berechnung des Strömungsfeldes innerhalb des Reaktors wird ein schwach kompressibles Fluid berücksichtigt, für das die Impulserhaltung nach Gleichung 5.13 und die Massenerhaltung nach Gleichung 5.14 gelöst werden.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \cdot \nabla) = \nabla \left[ -pI + \mu \left( \nabla u + (\nabla u)^T \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla u) I \right] + \rho g \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (5.14)$$

Für schwach kompressible Strömungen gelten die gleichen Zusammenhänge wie für kompressible Strömungen mit dem Unterschied, dass die Fluidichte für einen Referenzdruck in Abhängigkeit der Temperatur berücksichtigt wird. In der Gleichung 5.13 beschreibt  $I$  den Einheitstensor. Die Untersuchungen zur Strömung innerhalb des Reaktors erfolgen auf der Basis eines rotationssymmetrischen Berechnungsmodells für die unterstellt wird, dass in tangentialer Richtung des Reaktors keine Gradienten ( $\frac{\partial}{\partial \Phi}$ ) und keine Strömungen ( $u_\Phi = 0$ ) auftreten.

**Anfangs- und Randbedingungen** Die Lösung von partiellen Differentialgleichungen erfordert die Angabe von Anfangs- und Randbedingungen. Man unterscheidet drei Typen von Randbedingungen: a) Die Dirichlet-Randbedingung (Randbedingung 1. Art) schreibt die Variable vor, nach der in der übrigen Domain gelöst werden soll. Gleichungen für solche Freiheitsgrade können somit aus dem Problem eliminiert werden. b) Die Neumann-Randbedingung (Randbedingung 2. Art) schreibt auf dem Modellrand die Ableitung der unabhängigen Variablen normal zu diesem Rand vor. c) Für eine Cauchy-Randbedingung (Randbedingung 3. Art) wird eine Linearkombination aus dem Wert und der Ableitung einer Bilanzgröße am Rand vorgegeben. Eine Übersicht möglicher Randbedingungen sowie ihre Zuordnung zu verschiedenen physikalischen Fragestellungen liefert die Tabelle 5.1.

Die Anfangsbedingungen des zu lösenden System werden für transiente Simulationen so gewählt, dass diese den realen Bedingungen (Eingangswerte aus Versuchen oder Klimamessdaten) entsprechen. So wird für das initiale Temperaturfeld innerhalb des Bodens die über den Jahresgang gemittelte Oberflächentemperatur zu Grunde gelegt. Für das Absorberfluid in den Rohrleitungen und den Tunnelschalenbeton werden als Anfangswerte entweder gemessene Temperaturen verwendet oder realistische Annahmen getroffen. Der initiale Strömungszustand innerhalb der Absorberrohrleitungen ent-

Tabelle 5.1: Numerische Randbedingungen und ihr Zusammenhang zu unterschiedlichen physikalischen Problemstellungen

| Physik               | 1. Art<br>Dirichlet | 2. Art<br>Neumann | 3. Art<br>Cauchy |
|----------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| Grundwasserhydraulik | Festpotential       | Zustrom           | Leckage          |
| Wärmetransport       | Temperatur          | Wärmestrom        | Konvektion       |
| Mechanik             | Verschiebung        | Spannung          | Feder            |

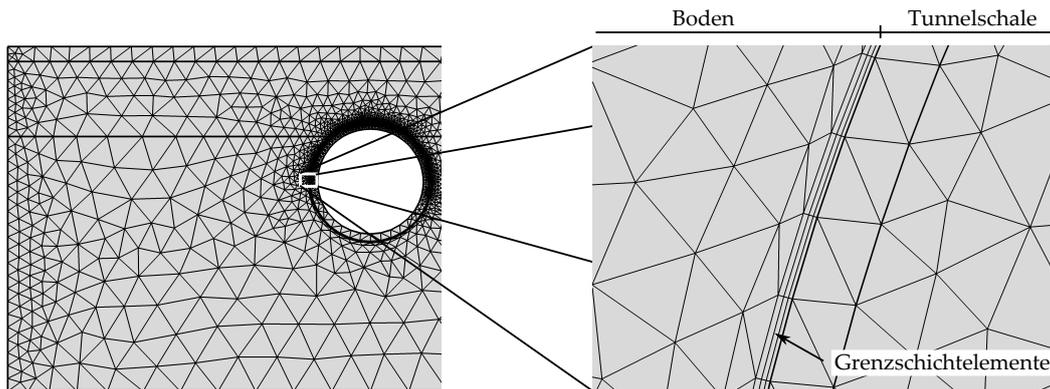


Abbildung 5.2: Exemplarische Darstellung eines zweidimensionalen Berechnungsnetzes, links: Übersicht, rechts: Detail

spricht den Vorgaben aus den nachmodellierten Versuchen oder richtet sich nach dem aufzuprägendem Lastregime.

**Räumliche Diskretisierung** Unter der räumlichen Diskretisierung einer Berechnungsdomain wird im Folgenden die Wahl der Netzstruktur sowie der Netzfeinheit verstanden, die zu eindeutigen Konvergenz des untersuchten Problems führt. Im Allgemeinen bieten Dreiecksnetze (zweidimensional) und Tetraedernetze (dreidimensional) die besten Voraussetzungen eine beliebige Geometrie zu vernetzen. Diese Netzstruktur wird von zahlreichen automatisierten Netzalgorithmen verwendet. Darüber hinaus kann die Verwendung von rechteckigen bzw. quader- oder prismenförmigen Elementen die Zahl der zu lösenden Freiheitsgrade und damit die Simulationszeit reduzieren. Interessant wird die Verwendung dieser Elemente in Kombination mit einem unstrukturierten Dreieck- oder Tetraedernetz im Bereich von großen hydraulischen oder thermischen Gradienten. Diese treten bei der Simulation von TGTA vor allem am Übergang von der Tunnelschale zum Boden und zum Tunnellufttraum auf. Die Abbildung 5.2 zeigt ein exemplarisches Berechnungsnetz für eine TGTA unter dem Einfluss advektiven Wärmetransports im Boden.

**Simulationsumgebung** Im Rahmen dieser Arbeit wird das Computerprogramm COMSOL sowohl für die Untersuchung von einzelnen Fragestellungen im Kapitel 4 als auch zur Entwicklung des Modells zur Prognose des geothermischen Potentials einer TGTA

im Kapitel 5.3 genutzt. COMSOL ist eine Anwendung, die eine Untersuchung von unterschiedlichen physikalischen und chemischen Prozessen einschließlich ihrer Abhängigkeiten und Interaktionen zulässt. Dies wird als Multiphysiksimulation bezeichnet. Innerhalb der Simulationsumgebung werden die unterschiedlichen Physiken durch einzelne Module abgebildet. Folgende Module kommen in dieser Arbeit zur Anwendung:

- Subsurface Flow Module zur Beschreibung der Grundwasserströmung und des Wärmetransportes innerhalb des Bodens
- Heat Transfer Modul zur Beschreibung der Wärmetransportvorgänge an der GOK, der Tunnelinnenschale sowie der laminaren Einphasenströmung
- Pipe Flow Module zur Beschreibung der Wärmetransportvorgänge innerhalb der Absorberrohrleitungen sowie in Tunnellängsrichtung

## 5.2 Simulation bestehender Tunnelgeothermieanlagen

Die Wärmetransportvorgänge im Zusammenhang mit einer Tunnelgeothermieanlage sind das Ergebnis komplexer Wechselwirkungen von Wärmeströmen unterschiedlicher Orientierung und Intensität. Getrieben werden diese durch die sich transient entwickelnden Temperaturfelder im porösen Medium Boden, der Tunnelschale und dem Tunnelinneren. Die Abbildung der Interaktion aus Wärmeströmen an der Geländeoberfläche, dem geothermischen Tiefenstrom, dem Wärmestrom vom Tunnelinneren zur Tunnelschale, dem Wärmetransport durch strömendes Grundwasser und dem Betrieb des Tunnelgeothermieabsorbers ist auf der Basis von analytischen Berechnungsmodellen nicht möglich. Nachfolgend werden unterschiedliche Simulationsmodelle vorgestellt, die eine Bewertung von Tunnelgeothermieanlagen und anderen röhrenförmigen Geothermieabsorbern hinsichtlich ihrer Effizienz und möglicher Wärmeentzugsleistung ermöglichen. Die thermisch-hydraulisch gekoppelten Berechnungen wurden zunächst an zwei Fallbeispielen verifiziert und anschließend in parametrisierte und anwendungsorientierte Modelle überführt.

### 5.2.1 Tunnel Stuttgart-Fasanenhof

**Beschreibung des Validierungsbeispiels** Im Zuge des Baus der Stadtbahnlinie U6 wurde im Stadtteil Stuttgart-Fasanenhof ein mit ca. 380 m kurzer, relativ seicht liegender Tunnel in „Neuer Österreichischer Tunnelbaumethode“ aufgefahnen. Der Tunnel durchfährt eine Wechsellagerung aus Festgesteinen und liegt unterhalb des Grundwassers. Den Grundwasserleiter stellt der Hauptsandstein mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von ca.  $1 \cdot 10^{-4} m/s$  dar, allerdings lassen sich um die Tunnelröhre keine gerichteten Grundwasserströmungen ausmachen. Die Firste des Tunnels befindet sich in der SSZ, während die Sohle im geosolaren Bereich angeordnet ist. Innerhalb des Tunnels wurden zwei thermisch voneinander getrennte Tunnelblöcke zu je 10 m als Wärmeübertrager ausgebildet (siehe Abbildung 5.3).

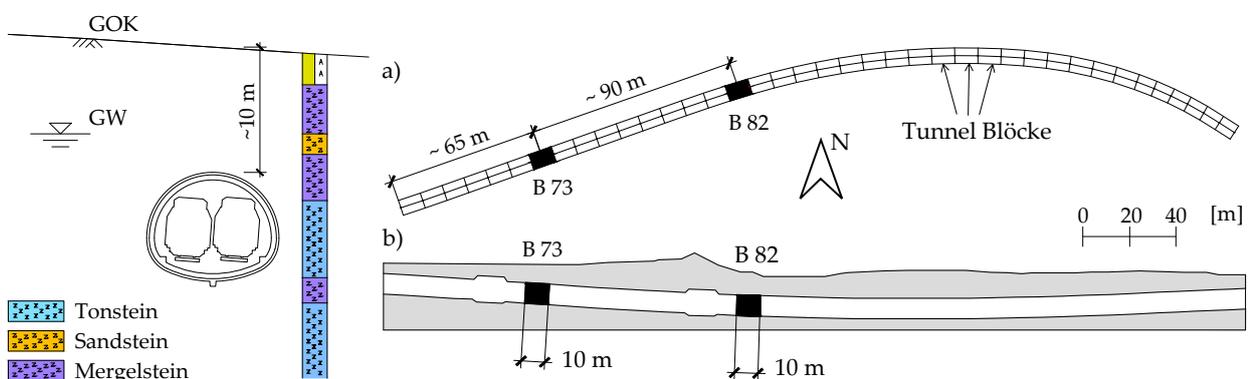


Abbildung 5.3: links: Baugrundsichtung am Block 73, rechts a): Lage der thermisch aktivierten Tunnelblöcke im Grundriss, rechts b): Lage der thermisch aktivierten Tunnelblöcke im Schnitt

Hierzu wurden auf die Innenseite der Tunnelaußenschale Rohrleitungen aus vernetztem Polyethylen über Fixierschienen befestigt, die anschließend in die Tunnelinnenschale eingebettet wurden. In Summe wird über die so verlegten Rohrleitungen eine Gesamt-tunneloberfläche von ca.  $360 \text{ m}^2$  geothermisch aktiviert. Die TGTA Stuttgart-Fasanen-hof wurde in den Jahren 2011 bis 2017 ausschließlich als Testanlage ohne einen konkreten Endverbraucher betrieben. Aus diesem Grund waren die extrahierten Energiemengen über die Klimaanlage des Tunnelbetreibers abzuführen. Die Ausbildung als Testanlage ermöglichte die Untersuchung von unterschiedlichen Lastprofilen sowohl für den Heiz- als auch den Kühlbetrieb und bietet somit die Grundlage für Untersuchungen zur energetischen Effizienz von tunnelgeothermischen Anlagen. Am Tunnel Stuttgart-Fasanen-hof erfolgte neben der Erfassung von zahlreichen Temperaturen innerhalb der Tunnel-schale auch die Messung der Untergrundtemperatur an diskreten Stellen seitlich und im Bereich der Firste des Tunnels (vgl. Abbildung 5.4).

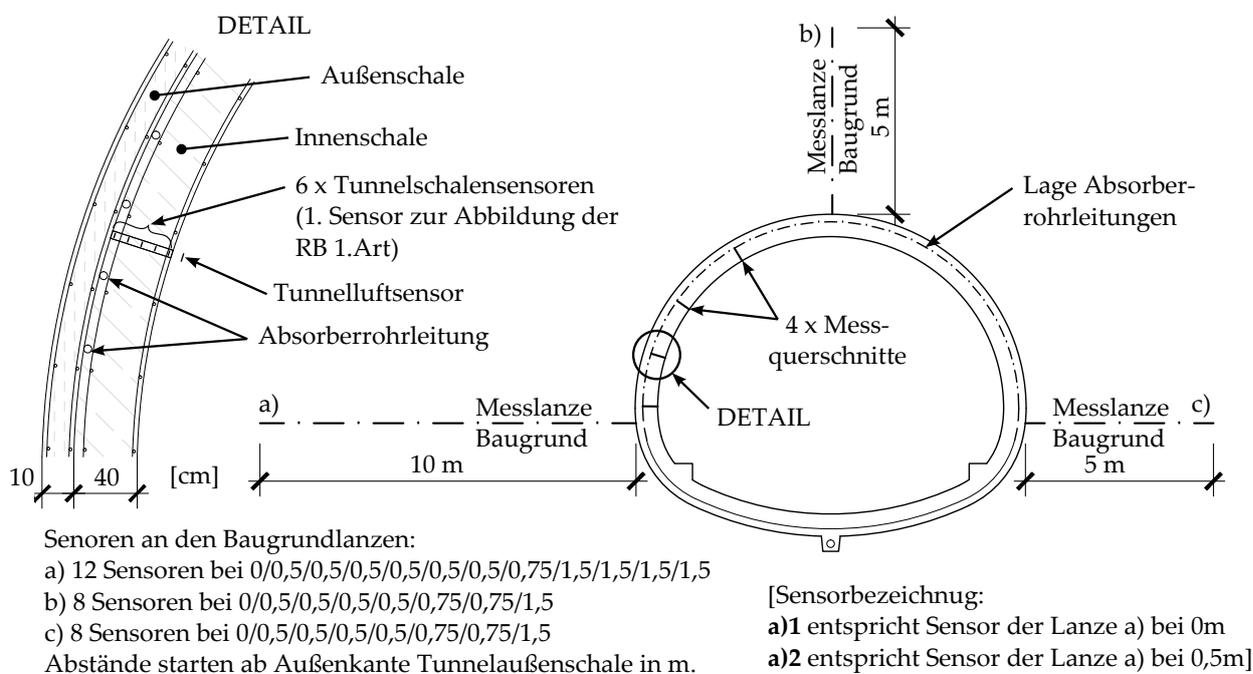


Abbildung 5.4: Messdatenerfassung je thermisch aktiviertem Tunnelblock, Übersicht und Detailausbildung, alle dargestellten Sensoren sind Temperatursensoren PT100

Darüber hinaus wurden die Anlagenparameter Vorlauf- und Rücklauf-temperatur des Primärkreislaufes sowie der aufgeprägte Volumenstrom aufgezeichnet. Über die Bilanzierung dieses Kapazitätsstroms im Zusammenspiel mit der erzielten Temperatur-erzeugung ist eine direkte Aussage über den erreichten Wärmestrom möglich. Die Abbildung 5.5 zeigt die Systemparameter Eintritts- und Austritts-temperatur ( $T_{in}$  und  $T_{out}$  gemäß Abbildung 2.2) sowie den Volumenstrom  $\dot{V}$  des Primärkreislaufes über den Gesamtuntersuchungszeitraum 2011 - 2017 für den im Folgenden betrachteten Tunnelblock B73.

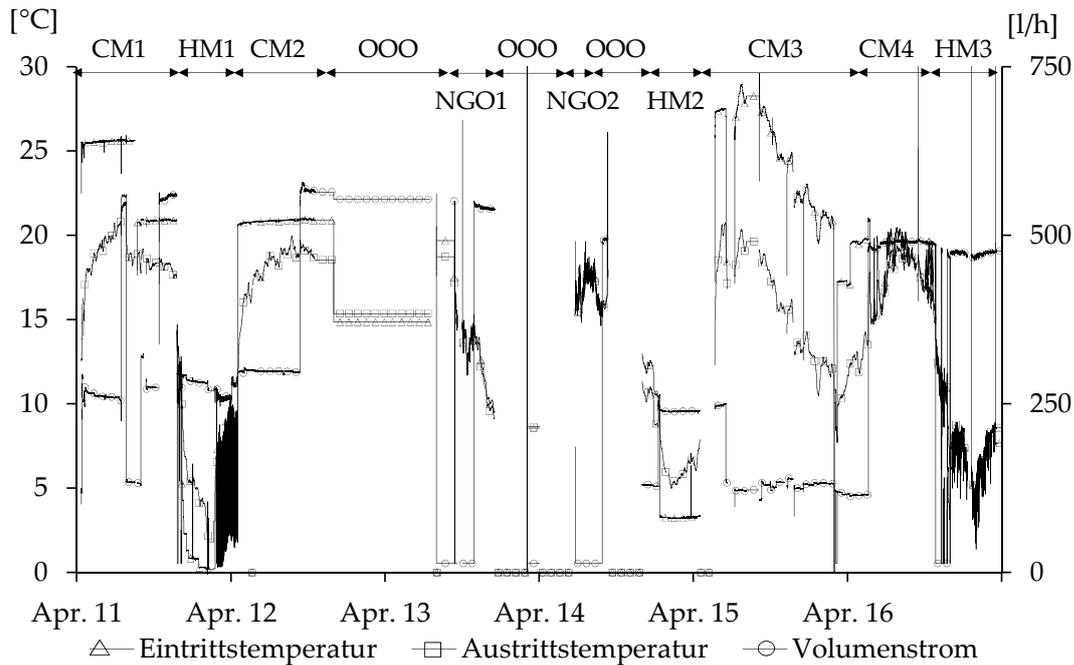


Abbildung 5.5: Eingestellte und gemessene Systemparameter am Block 73 über den Gesamtuntersuchungszeitraum 2011 - 2017 bezogen auf den Primärkreislauf, CM = Kühlbetrieb, HM = Heizbetrieb, NGO = kein Absorberbetrieb, OOO = keine Messdaten vorhanden

**Kühlbetrieb 2011 - CM1 (Abb. 5.6 links)** Zu Beginn des tunnelgeothermischen Betriebs wurde von Mitte April bis Mitte Juli 2011 zunächst ein Langzeitkühlbetrieb mit konstanter Eintrittstemperatur von ca.  $25^{\circ}\text{C}$  und einem konstanten Volumenstrom von ca.  $260\text{ l/h}$  aufgeprägt. Während dieser Phase geht die extrahierte Wärmestromdichte von anfänglich  $30\text{ W/m}^2$  auf ca.  $15\text{ W/m}^2$  zurück. Der Grund für den Rückgang der Entzugsleistung ist die steigende Tunnellufttemperatur, die zu einer Verringerung der Spreizung zwischen der Eintrittstemperatur und Austrittstemperatur führt. Durch die Verdoppelung des Volumenstroms und unter Beibehaltung der Eintrittstemperatur steigt die Wärmestromdichte auf ca.  $23\text{ W/m}^2$  und bleibt konstant. Im Anschluss daran wurde der Volumenstrom auf ca.  $130\text{ l/h}$  gedrosselt, wodurch die Wärmestromdichte auf ca.  $11\text{ W/m}^2$  sinkt und bis Mitte August konstant bleibt. Die Entzugsleistung ist wiederum durch den Verlauf der Tunnellufttemperatur zu begründen, die in dem betrachteten Zeitraum nahezu konstant bei ca.  $17^{\circ}\text{C}$  verharret. Obwohl zu Beginn des Septembers der Volumenstrom auf  $275\text{ l/h}$  erhöht wurde, bleibt die Wärmestromdichte bei einer nahezu konstanten Tunnellufttemperatur bis Mitte Oktober konstant bei ca.  $9\text{ W/m}^2$ . Dieses Verhalten der TGTA lässt sich auf der Basis der zur Verfügung stehenden Messwerte nicht erklären. Auffällig in diesem Zusammenhang ist jedoch der Verlauf der gemessenen Tunnellufttemperatur, die nicht dem erwarteten jahreszeitlichen Verlauf folgt und ab Mitte Oktober für kurze Zeit keine Messwerte liefert. Gegebenenfalls liegt hier eine fehlerhafte Messung der Tunnellufttemperatur vor und lässt keine plausible Interpreta-

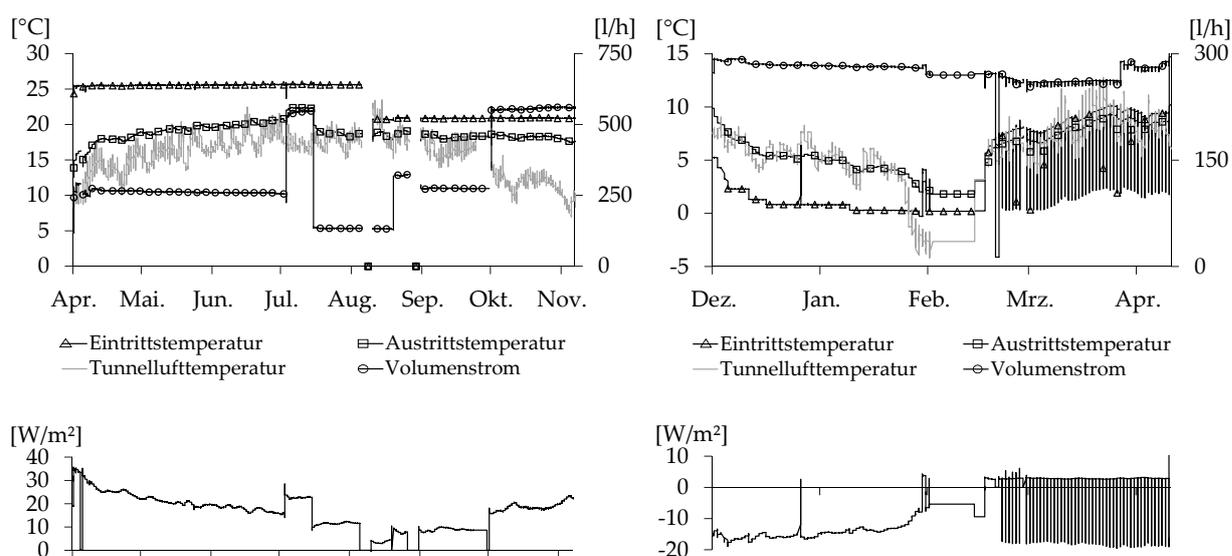


Abbildung 5.6: Messdaten des Primärkreislaufes für die Betriebsphase links: vom 13.04. bis 18.11.2011 (CM1), rechts: vom 07.12.2011 bis 16.04.2012 (HM1)

tion zu. Zum Ende des ersten Kühlbetriebs wurde der Volumenstrom auf ca. 560 l/h bei einer Eintrittstemperatur von ca. 21 °C erhöht, wodurch die Wärmestromdichte auf ca. 17 W/m<sup>2</sup> steigt. Im Anschluss folgt diese dem Gang der Tunnellufttemperatur.

**Intervallbetrieb 2012 - HM1 (Abb. 5.6 rechts)** Im Winter der Jahre 2011/2012 wurde die TGTA Stuttgart-Fasanenhof für zweieinhalb Monate zunächst in einem Heizbetrieb bei einem konstanten Volumenstrom von ca. 280 l/h und einer Eintrittstemperatur von ca. 0 °C gefahren. Zu Beginn des Betriebs beträgt die extrahierte Wärmestromdichte ca. 17 W/m<sup>2</sup> und sinkt dann langsam, der Tunnellufttemperatur folgend auf ca. 8 W/m<sup>2</sup>. Im Anschluss an diesen Langzeitbetrieb wurde mit der TGTA ein Intervallbetrieb unter einem konstanten Volumenstrom von ca. 260 l/h untersucht. Hierzu wurde die Eintrittstemperatur zwischen 8:00 Uhr und 18:00 Uhr auf ca. 0,3 °C geregelt. Hierdurch wird in den Zeiten des Heizbetriebs trotz steigender Tunnellufttemperatur eine konstante Wärmestromdichte von ca. 18 W/m<sup>2</sup> erzielt. Hierbei handelt es sich um die jeweils höchste Wärmestromdichte am Tag. Der Verlauf der Wärmestromdichte zeigt für jeden Tag ein klassisches Sägezahnprofil, das auf die Kapazität des Tunnelschalenbetons zurück geführt werden kann.

**Kühlbetrieb 2012 - CM2 (Abb. 5.7 links)** Der Kühlbetrieb im Jahr 2012 wurde von Mitte April bis Ende November mit einer gleichbleibenden Eintrittstemperatur von ca. 20,5 °C gefahren. Während der ersten 5 Monate wurde der Volumenstrom auf ca. 300 l/h eingestellt, für den übrigen Testzeitraum auf ca. 565 l/h. Beginnend mit einer Wärmestromdichte von ca. 35 W/m<sup>2</sup> sinkt diese mit steigender Tunnellufttemperatur auf ca. 4 W/m<sup>2</sup>. Die Erhöhung des Volumenstroms auf 550 l/h zeichnet sich in einem geringen

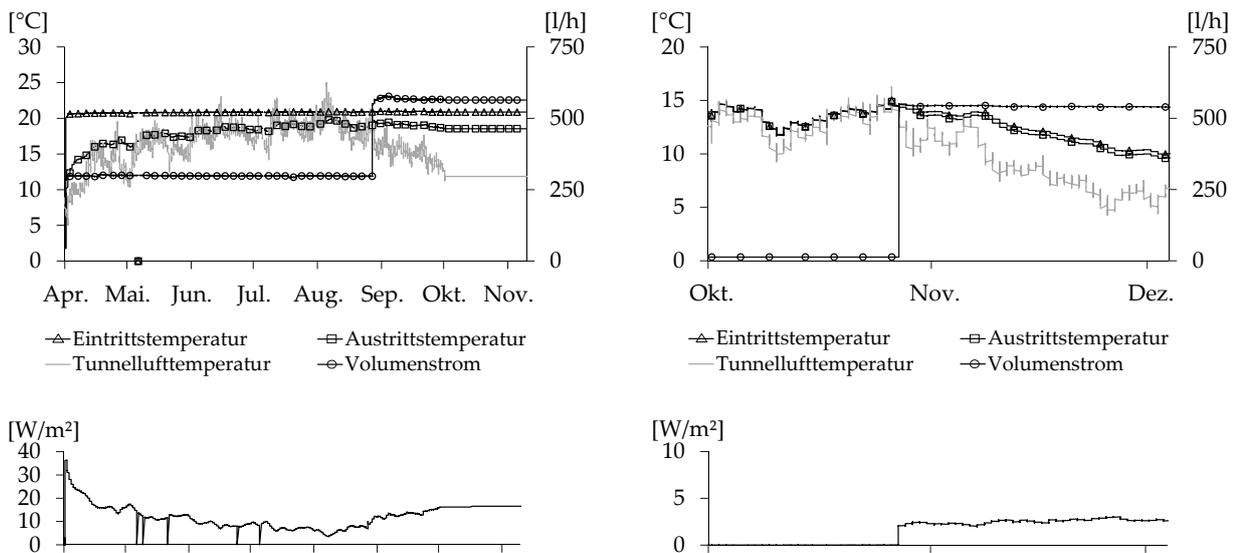


Abbildung 5.7: links: Messdaten des Primärkreislaufes für die Betriebsphase vom 16.04. bis 24.11.2012 (CM2), rechts: Messdaten des Primärkreislaufes für die Phase vom 03.10. bis 05.12.2013 (NGO1)

Sprung der Wärmestromdichte von ca.  $4 \text{ W/m}^2$  ab. Warum der Zuwachs in der Wärmestromdichte bei der Volumenstromänderung so gering ausfällt, kann auf der Basis der vorliegenden Messdaten nicht geklärt werden. Im Anschluss steigt die geothermische Entzugsleistung mit sinkender Tunnellufttemperatur auf ca.  $16 \text{ W/m}^2$ .

**Kein geothermischer Betrieb - NGO1 (Abb. 5.7 rechts)** Im Herbst 2013 wurde die TGTA für den Zeitraum von ca. 2 Monaten nicht aktiv betrieben. Der Volumenstrom wurde lediglich einmalig von 0 auf 540 l/h eingestellt. Die Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf wurde nicht vorgegeben. Das Fluid in den Absorberrohren zirkulierte während dieser Zeit sowohl im Bereich der Tunnelschalen als auch durch die Hauptverbindungsleitungen auf der Tunnelsohle und dem angeschlossenen Tunnelbetriebsraum. Ohne die Zirkulation des Absorberfluids liegt die Temperatur der Rohrleitungen etwas oberhalb der gemessenen Tunnellufttemperatur. Diese Phase lässt sich nicht eindeutig interpretieren, da nicht abgeschätzt werden kann, inwieweit freie Konvektion in den Rohrleitungen eine Strömung induziert und damit zu einem Wärmetransport in den Rohrleitungen beiträgt. Durch das Einschalten der Strömung innerhalb der Rohrleitungen wird ein über die Dauer von ca. eineinhalb Monaten eine konstante Wärmestromdichte von ca.  $2,5 \text{ W/m}^2$  extrahiert. Hierbei folgen sowohl die Ein- als auch die Austrittstemperatur aus dem Primärkreislauf der Tunnellufttemperatur in gedämpfter Form. Die Temperaturspreizung des Primärkreislaufes ist mit ca. 0,2 K so gering, dass vor dem Hintergrund der zu erwartenden Messgenauigkeiten nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine relevante Wärmestromdichte in dieser Phase abgegeben wurde. Der gegenüber der Tunnellufttemperatur gedämpfte Temperaturverlauf des Primärkreislaufes lässt sich durch die Kapazität des Tunnelschalenbetons erklären.

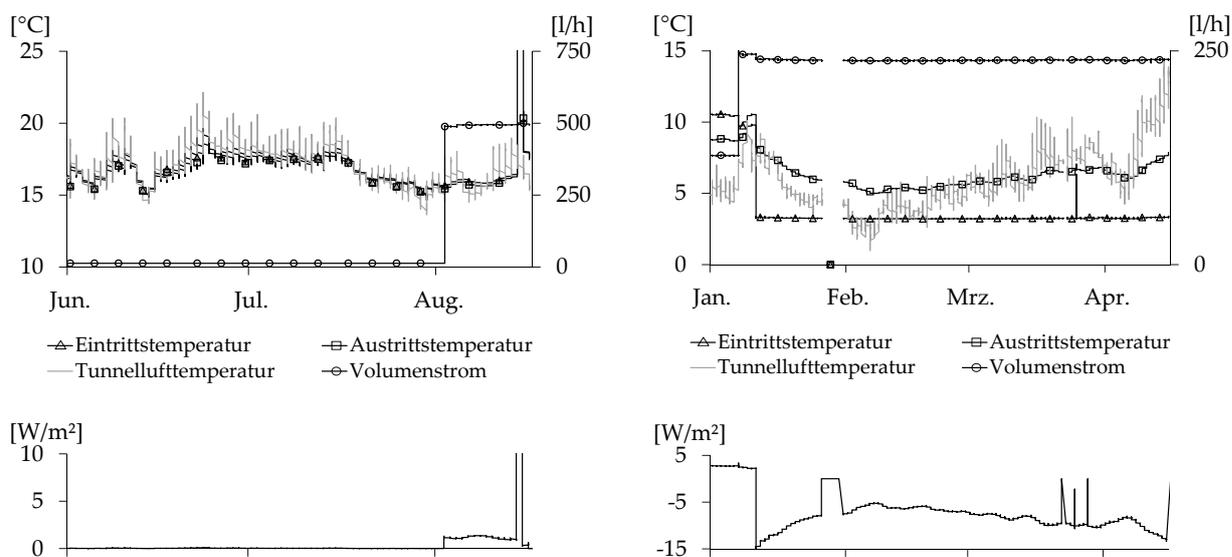


Abbildung 5.8: links: Messdaten des Primärkreislaufes für die Phase vom 27.06. bis 11.09.2014 (NGO2), rechts: Messdaten des Primärkreislaufes für die Betriebsphase vom 02.01. bis 16.04.2015 (HM2)

**Kein geothermischer Betrieb - NGO2 (Abb. 5.8 links)** Für den Zeitraum 27.06. bis 11.09.2014 liegen für die TGTA Stuttgart-Fasanenhof Messdaten ohne geothermischen Betrieb vor. Die gemessenen Absorberrtemperatures folgen der Tunnellufttemperatur nahezu ungedämpft. Mit dem Einschalten eines Volumenstroms Ende August 2014 lässt sich für die Wärmestromdichte der gleiche Effekt wie bereits für NGO1 beschrieben feststellen. Allerdings folgen die Temperaturen des Primärkreislaufes weiterhin direkt der Tunnellufttemperatur und driften nicht wie für NGO1 beschrieben auseinander. Erklärt werden kann dies durch die jeweils unterschiedliche Jahreszeit von NGO1 zu NGO2. Während NGO1 im Winter liegt, befindet sich NGO2 am Übergang vom Sommer in den Winter. Die jahreszeitliche Temperaturschwingung der Tunnellufttemperatur befindet sich somit im Bereich des Wendepunkts und die Temperaturdifferenzen zwischen Tunnelschale und Tunnelluft sind im Jahresgang am geringsten.

**Heizbetrieb 2015 - HM2 (Abb. 5.8 rechts)** Im Winter 2015 wurde die TGTA Stuttgart-Fasanenhof in einem klassischen Heizbetrieb gefahren. Hierzu wurde ein konstanter Volumenstrom von  $240 \text{ l/h}$  sowie eine Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf von  $3,3^{\circ}\text{C}$  eingestellt. Mit sinkender Tunnellufttemperatur nimmt die Wärmestromdichte von ca.  $15 \text{ W/m}^2$  auf  $5 \text{ W/m}^2$  ab. Mit steigender Tunnellufttemperatur nimmt die Wärmestromdichte wieder zu und erreicht einen Wert von ca.  $10,5 \text{ W/m}^2$ . Hierbei folgt sie der Tunnellufttemperatur in gedämpfter Form. Eine deutliche Zunahme der Wärmestromdichte erfolgt zum Ende der Heizphase auf  $15 \text{ W/m}^2$  durch die stark ansteigende Tunnellufttemperatur.

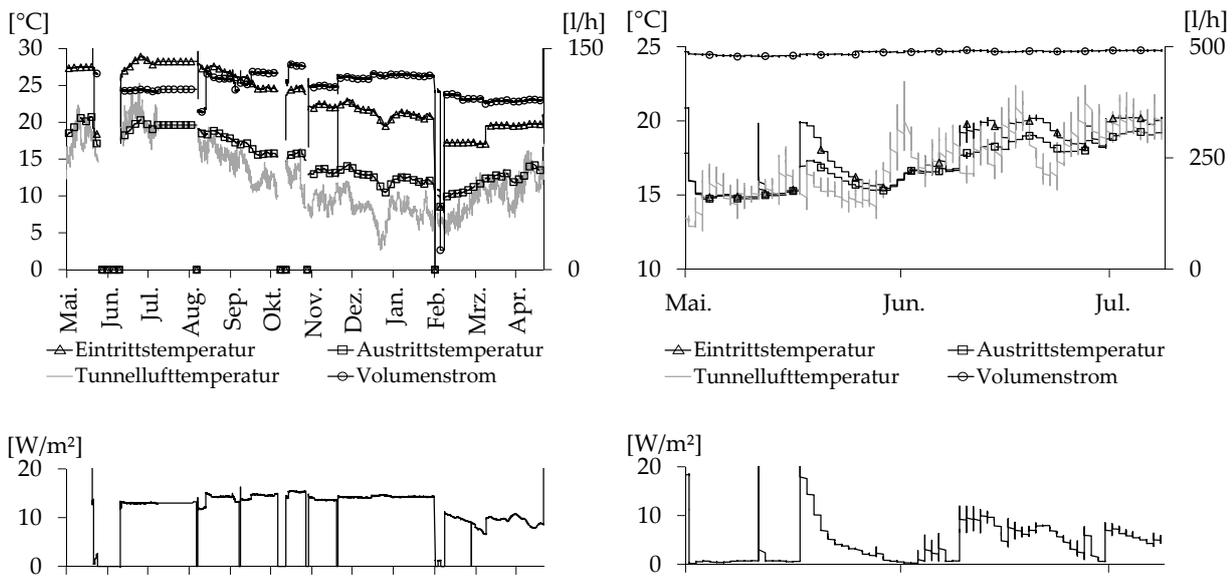


Abbildung 5.9: links: Messdaten des Primärkreislaufes für die Betriebsphase vom 29.05.2015. bis 20.05.2016 (CM3), rechts: Messdaten des Primärkreislaufes für die Betriebsphase vom 08.06. bis 23.10.2016 (CM4)

**Konstantbetrieb 2015 - CM3 (Abb. 5.9 links)** Im Zeitraum Mai 2015 bis Mai 2016 wurden den Primärkreisläufen der TGTA Stuttgart-Fasanenhof ein konstantes Wärmestromdichteprofil aufgeprägt, bei dem die Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf jeweils der gemessenen Austrittstemperatur des Primärkreislaufes so angepasst wurde, dass sich eine konstante Temperaturspreizung einstellen konnte. Unter einem über die gesamte Zeit nahezu konstanten Volumenstrom von 1301/h stellte sich eine Wärmestromdichte von ca.  $15 \text{ W/m}^2$  ein. Geringe Variationen des Volumenstroms ( $120 < \dot{V} < 140 \text{ l/h}$ ) haben nur einen geringen Einfluss auf die extrahierbare Entzugsleistung. Leider liegen für diesen Testbetrieb keine Daten über die aufgenommene elektrische Leistung vor, so dass keine Aussage über die erreichte JAZ getroffen werden kann.

**Kühlbetrieb 2016 - CM4 (Abb. 5.9 rechts)** Von Juni bis Oktober 2016 wurden die Primärkreisläufe an eine synthetische Realnutzung in Form eines simulierten Gebäudemodells gekoppelt. Hierzu wurde aus technischen Gründen ein konstanter Volumenstrom von 4901/h über die gesamte Dauer des Testbetriebs von ca. 4,5 Monaten eingestellt. Die Festlegung der Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf erfolgte auf der Basis des simulierten Kühlenergiebedarfs für ein Bürogebäude, das in Kapitel 5.4.2 beschrieben wird. Der Testbetrieb gliederte sich in 5 Phasen, in denen jeweils unterschiedliche Bürogrundflächen berücksichtigt wurden (vgl. Tabelle 5.2).

Zwischen der Gebäudeseite und dem Primärkreislauf der TGTA befindet sich ein simulierter Schichtspeicher mit einem Volumen von  $250 \text{ m}^3$ . Zur Deckung der aktuellen Kühllast wird dem Schichtspeicher Kälteenergie entnommen und in die Kühldecken der Büroräume geführt. Die Kühlung des Schichtspeichers erfolgt zeitversetzt durch den

Tabelle 5.2: Kühllasten während des Kühlbetriebs CM4

| Phase | Zeitraum       | Bürofläche       | Kühllast [kW] |
|-------|----------------|------------------|---------------|
| 1     | 08.06-23.06.16 | 10m <sup>2</sup> | 5,7           |
| 2     | 23.06-30.06.16 | 30m <sup>2</sup> | 16,2          |
| 3     | 30.06-09.08.16 | 70m <sup>2</sup> | 57,4          |
| 4     | 09.08-15.09.16 | 50m <sup>2</sup> | 39,4          |
| 5     | 15.09-23.10.16 | 70m <sup>2</sup> | 40,7          |

Primärkreislauf der TGTA. Reicht das energetische Potential der TGTA zur Deckung des Kühllast nicht aus, wird ein externes Klimagerät zugeschaltet. Während der ersten Phase verfügt die TGTA über ausreichend Potential, die Kühllast eines Büros (10 m<sup>2</sup>) vollständig zu decken. Die mittlere Wärmestromdichte für diesen Zeitraum beträgt ca. 7 W/m<sup>2</sup>. Während der 2. Phase ist die zu deckende Kühllast trotz der Verdreifachung der zu kühlenden Bürofläche gering, so dass für die Phase 3 die zu kühlende Bürofläche auf 70 m<sup>2</sup> erhöht wird. In dieser Phase überlagert sich die zu deckende Kühllast von max. 57,4 kW<sub>th</sub> mit einer hohen Tunnellufttemperatur, so dass die vorgegebenen Temperaturgrenzwerte des Schichtspeichers durch die TGTA nicht mehr erreicht werden. Die maximale Wärmestromdichte für diesen Zeitraum liegt bei ca. 16 W/m<sup>2</sup>. Die Deckung der Kühllast erfolgt durch das externe Klimagerät. In der Phase 4 wird die zu kühlende Bürofläche auf 50 m<sup>2</sup> reduziert, wodurch eine Deckung der Kühllast alleinig durch die TGTA möglich ist. In der letzten Phase des Testbetriebs erfolgt eine erneute Steigerung der Kühllast für eine Bürofläche von 70 m<sup>2</sup>, jedoch bei einer sinkenden Tunnellufttemperatur, so dass die Kühllast zu Gänze durch die TGTA gedeckt wird. Die maximale Wärmestromdichte für diesen Zeitraum liegt bei ca. 20 W/m<sup>2</sup>.

**Heizbetrieb 2016 - HM3 (Abb. 5.10)** Zum Ende des Testbetriebs der TGTA Stuttgart-Fasanenhof wurde aufbauend auf dem Kühlbetrieb CM4 ein Heizbetrieb in Form einer synthetischen Realnutzung untersucht. Hierzu wurden 2 Büroräume von jeweils 10 m<sup>2</sup> simuliert und mit der TGTA gekoppelt. Die mittlere Heizlast für den untersuchten Zeitraum beträgt ca. 2 kW<sub>th</sub>, als Spitzenlast sind ca. 18 kW<sub>th</sub> zu decken. Neben einem Pufferspeicher verfügt die simulierte Haustechnikanlage über einen externen Erwärmer, der zur Abdeckung dieser Heizlastspitzen zum Einsatz kommt.

Über den gesamten Untersuchungszeitraum zirkuliert das Absorberfluid konstant unter einem Volumenstrom von ca. 500 l/h durch die Absorberrohrleitungen. Die Abbildung 5.10 links zeigt die Messergebnisse über den betrachteten Testzeitraum von Anfang Dezember 2016 bis Mitte März 2017. Die Abbildung 5.10 rechts zeigt die akkumulierte Energieversorgung der Büroräume getrennt nach den Anteilen TGTA, Wärmepumpe und externem Erwärmer. Bezogen auf den Gesamtbetrachtungszeitraum von ca. 3 Monaten werden 71% der benötigten Heizenergie durch die Tunnelabsorber, 25% durch die Wärmepumpe und 4% durch den externen Erwärmer zur Verfügung gestellt. Hieraus resultiert eine mittlere JAZ von 3,5 gemäß Gleichung 5.17. Die mittlere Wärmestromdichte für den betrachteten Zeitraum beträgt ca. 16 W/m<sup>2</sup>.

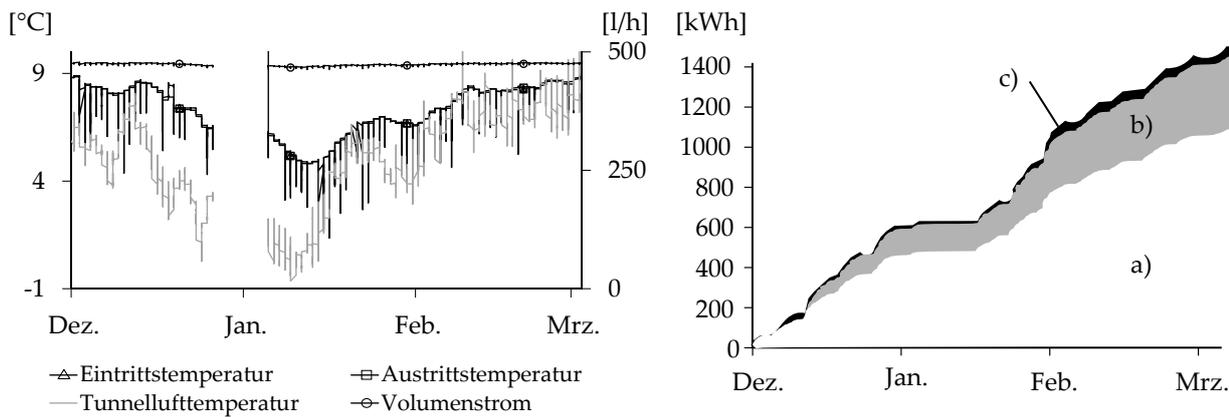


Abbildung 5.10: links: Messdaten des Primärkreislaufes für die Betriebsphase vom 15.12.2016 bis 16.03.2017 (HM3), rechts: Akkumulierte Energieversorgung a) TGTA, b) Wärmepumpe, c) Erwärmer

Tabelle 5.3: Thermische Baugrund- und Betonparameter in Anlehnung an [108] und ergänzt durch [125]

| Berechnungsgebiet             | $\lambda_{eff}$<br>$W/mK$ | $\rho$<br>$kg/m^3$ | $c_p$<br>$J/kgK$ |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------|------------------|
| Tunnelschale (Beton)          | 1,8                       | 2300               | 880              |
| S1 und S3<br>(Tonmergelstein) | 1,9                       | 2450               | 1120             |
| S 2 (Hauptsandstein)          | 5,0                       | 2450               | 1570             |
| S4 (Kalkstein)                | 2,8                       | 2550               | 1090             |

**Modellbeschreibung** Die Messdaten des Primärkreislaufes sowie der Baugrundtemperatur der Betriebsphasen CM1, HM1 sowie CM2 des Blocks B73 bilden die Basis für die nachfolgend beschriebene Validierung des Simulationsmodells „Stuttgart-Fasanenhof“. Die Abbildung 5.11 zeigt das dreidimensionale Berechnungsgebiet, das die Tunnelschalen sowie den maßgeblichen Baugrundbereich um den Tunnel abbildet. Die dreidimensionale Berechnungsdomain wird durch 4 Baugrundsichten (S1 bis S4), die Tunnelinnen- und außenschale, sowie die zwei Absorberkreisläufe gebildet.

Die Modellbreite  $b$  wurde basierend auf den Messergebnissen zur Entwicklung der Temperaturkorona um den Tunnel (vgl. Abbildung 2.3) zu 30,0 m festgelegt, die Modelltiefe entspricht der gesamten untersuchten Blockbreite von 10 m. Der untere Modellrand hat einen Abstand von ca. 7,5 m ab Außenkante Tunnelaußenschale und liegt somit außerhalb des vom Tunnel thermisch beeinflussten Bereiches. Die zwei Absorberkreisläufe 1 und 2 wurden entsprechend den Ausführungsplänen zur TGTA Stuttgart-Fasanenhof zwischen der Innen- und der Außenschale angeordnet. Innerhalb der Gebiete, die den Boden sowie die Tunnelschale abbilden, wird der Wärmetransport infolge Wärmeleitung im Boden unter Berücksichtigung der in Tabelle 5.3 aufgeführten Boden- und Betonparameter gelöst.

Innerhalb der Absorberrohrleitungen erfolgt die Lösung des eindimensionalen Wär-

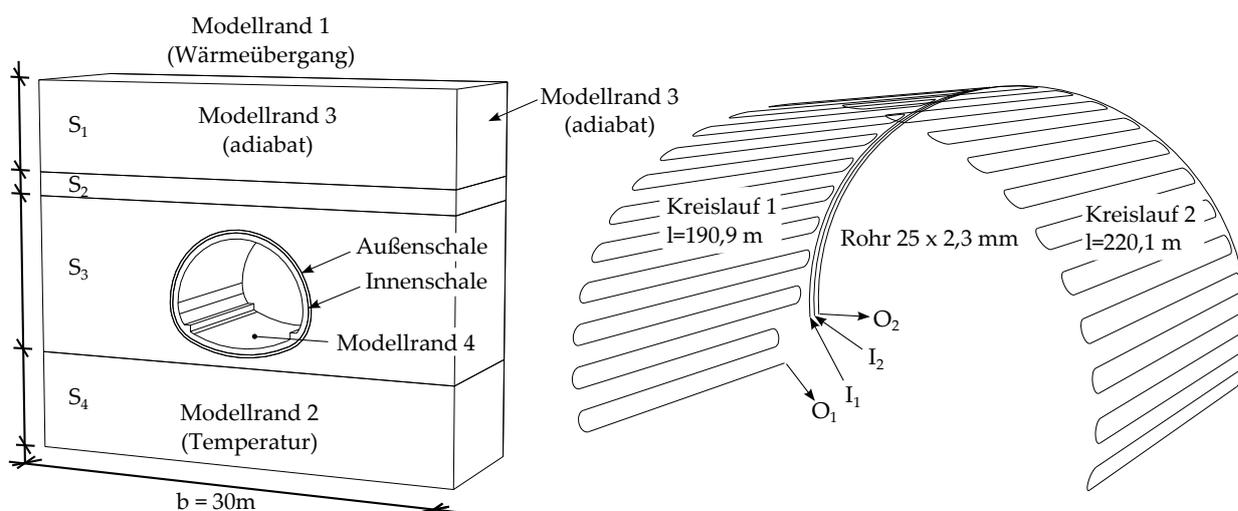


Abbildung 5.11: links: Dreidimensionales Berechnungsgebiet bestehend aus vier Baugrundsichten sowie der Tunnelinnen- und außenschale, rechts: Absorberkreisläufe 1 und 2

metransports, für den an den Eintrittsstellen in die Rohrkreisläufe (I1 und I2 gemäß Abb. 5.11) der Volumenstrom sowie die Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf entsprechend den Betriebsphasen CM1, HM1 sowie CM2 des Blocks B73 aufgeprägt wurden. Das Fluid in den Rohrleitungen besteht aus einem Wasser-Glykolgemisch ( $\rho_f = 1039 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,f} = 3840 \text{ J/kgK}$ ,  $\lambda_f = 0,36 \text{ W/mK}$ ). Am Austritt der Rohrleitungen wurde eine hydraulische Druck-Randbedingung sowie eine thermische Randbedingung 2. Art in Form eines Wärmeausstroms berücksichtigt. Am Modellrand 1 wirkt eine Randbedingung 3. Art zur Abbildung der Wärmetransportvorgänge an der GOK (Klimastation Leinfelden-Echterdingen vgl. Anhang A), am Modellrand 2 wirkt eine Temperaturrandbedingung in der Höhe der mittleren Temperatur 2 m über GOK von  $11,7^\circ\text{C}$ . Die seitlichen Modellränder (Modellrand 3) sind über eine Randbedingung 3. Art adiabat abgebildet. Für den Boden sowie die Tunnelschale wurde zu Beginn der Simulation eine Initialtemperatur von  $11,7^\circ\text{C}$ , für die Absorberrohrleitungen von  $20,9^\circ\text{C}$  gesetzt. Auf dem Modellrand 4 wurde eine Randbedingung 1. Art in Form der gemessenen Tunnelschalentemperatur aufgeprägt. Hierzu wurde das arithmetische Mittel der nahe des Tunnellufttraums liegenden Temperatursensoren der vier Messquerschnitte gebildet (vgl. Abb. 5.4). Mit dem hier vorgestellten Berechnungsmodell werden folglich lediglich der Wärmetransportvorgänge in den Rohrleitungen, der Tunnelschale und dem Boden validiert, nicht jedoch die Abbildung des Tunnelklimas oder die Beschreibung des Wärmeübergangs von der Tunnelluft zur Tunnelschale. Die Simulation erfolgte transient für einen Gesamtzeitraum von 14359 h (ca. 1,6 Jahre). Um eine durchgehende und konvergierende Simulation zu erreichen, mussten fehlende oder offensichtlich fehlerbehaftete Messdaten vor Beginn der Simulation korrigiert und ggf. ergänzt werden.

**Validierung der Berechnungsergebnisse** Die Validierung des numerischen Simulationsmodells „Stuttgart-Fasanenhof“ erfolgt zunächst auf dem Vergleich der gemessenen

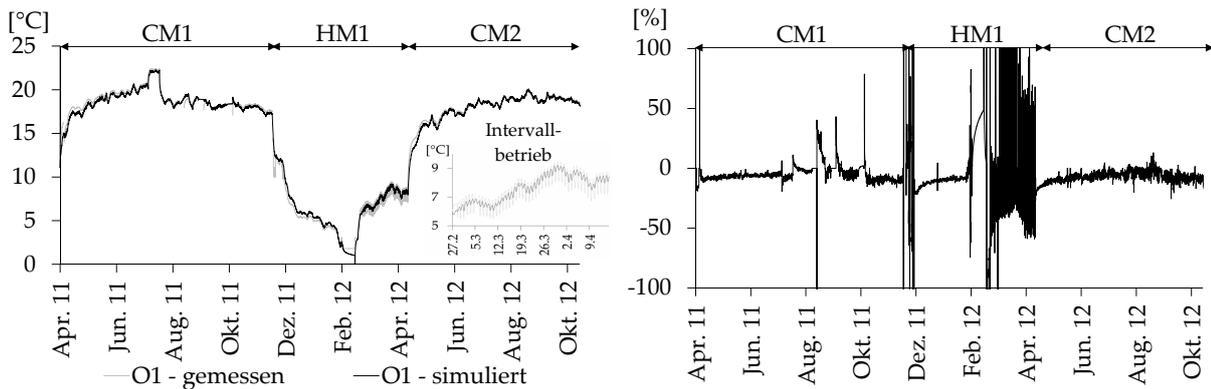


Abbildung 5.12: links: Vergleich der gemessenen und simulierten Austrittstemperatur  $T_{out}$  des Kreislaufes 1, rechts: Prozentuale Abweichung zwischen gemessenem und simuliertem Wärmestrom aus Kreislauf 1 in %

und simulierten Austrittstemperatur  $T_{out}$  aus dem Kreislauf 1 (O1 gemäß Abb. 5.11), die zusammen mit  $\dot{V}$  einen direkten Vergleich der extrahierten Wärmeenergie zulässt (vgl. z.B. Gleichung 2.1).

Der Vergleich der gemessenen und simulierten Austrittstemperatur  $T_{out}$  aus dem Kreislauf 1 zeigt eine gute Übereinstimmung (vgl. Abb. 5.12). Die mittlere Temperaturabweichung bezogen auf den gesamten Betrachtungszeitraum beträgt für den Kreislauf 1 ca. 0,32 K. Auffällig ist der Intervallbetrieb (siehe Beschreibung zu HM1), bei dem sich im Zuge der Simulation ein gegenüber der Messung gedämpfter Verlauf der Austrittstemperatur zeigt (siehe Abb. 5.12 Detail). Der Temperaturunterschied zwischen der gemessenen und simulierten Austrittstemperatur aus dem Absorber zeigt sich vor allem in den Zeiten des Energieentzugs (ca. 0,5 K), während in den Zeiten ohne geothermischen Betrieb lediglich Temperaturunterschiede von ca. 0,3 K zu beobachten sind. Eine mögliche Ursache für die höheren Temperaturunterschiede während des Intervallbetriebs wird in der zeitlichen Diskretisierung von 1h vermutet. Eine verbesserte Validierung der Simulationsergebnisse lässt der Vergleich der Ableitung des Temperaturregimes, der aus den Absorberkreisen extrahierte Wärmestrom  $\dot{Q}$  zu (vgl. Abb. 5.12 rechts). Die großen Fluktuationen im Bereich des HM1 sind auf den direkten stündlichen Vergleich zwischen Simulation und Messung zurückzuführen, der auf der Basis der stündlichen Auflösung in den Zeiten des Ein- und Ausschaltens des geothermischen Betriebs entsprechende Unschärfen mit sich bringt. Unter Einbeziehung des gesamten Simulationszeitraumes ergibt sich eine mittlere Abweichung zwischen simulierten und gemessenen stündlich gemittelten Wärmestrom  $\dot{Q}$  von ca. 11%. Der Vergleich der gemessenen und simulierten Austrittstemperatur des Primärkreislaufes  $T_{out}$  zeigt bereits zu Beginn der Simulation eine gute Übereinstimmung, die keine Einschwingeffekte des Temperaturfeldes erkennen lässt. Dies ist durch die Lage der Absorberrohrleitungen nahe der Randbedingung „Tunnelschalentemperatur“ und das Zusammenspiel aus Temperaturleitfähigkeit des Tunnelschalenbetons und der Temperaturanregung begründet. Anders verhält sich dies für den Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturen im Mehrphasenmedium Boden.

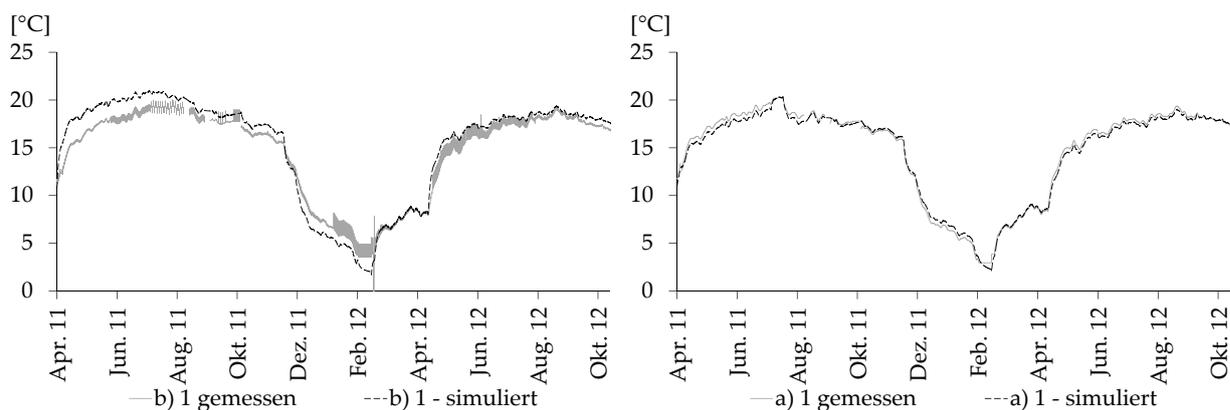


Abbildung 5.13: Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturen im Boden links: Temperaturverlauf am Messgeber Lanze b) 1, rechts: Temperaturverlauf am Messgeber Lanze a) 1

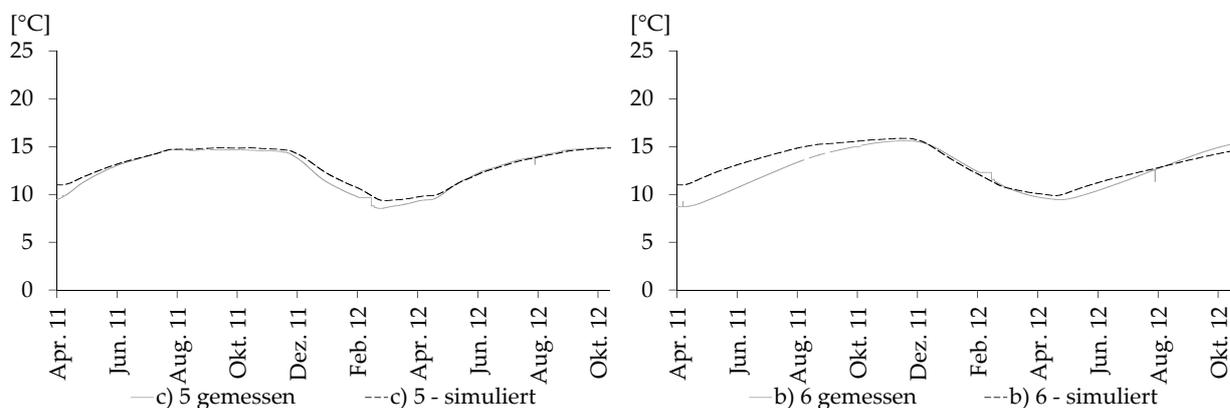


Abbildung 5.14: Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturen im Boden links: Temperaturverlauf am Messgeber Lanze c) 5, rechts: Temperaturverlauf am Messgeber Lanze b) 6

Die Abbildung 5.13 rechts zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten Tunnelchalentemperaturen im Abstand von 15 cm von der Außenkante Tunnelinnenschale. Dies entspricht einer Betondeckung gegenüber dem Erdreich von ca. 15-28 cm, wobei bei einem Vortrieb nach der „Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode“ die genaue Außenschalendicke stark variieren kann und die genaue Betondeckung nicht bekannt ist. Es kann jedoch mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die jeweils ersten Messgeber der Baugrundlanzen gemäß Abbildung 5.4 im Tunnelchalentbeton liegen. Der Verlauf des Sensors b) 1 zeigt deutlich größere Oszillationen als der vergleichende Sensor a) 1. Besonders deutlich wird das während des Intervallbetriebs, bei dem die Simulation einen Verlauf mit deutlich weniger Ausschlägen zeigt. Der Grund für den Verlauf der Messung wird in einer unbeabsichtigten thermischen Ankopplung des Messensors an die Absorberrohrleitungen vermutet, da die Messungen des Sensors a) 1 diesen Verlauf nicht widerspiegeln.

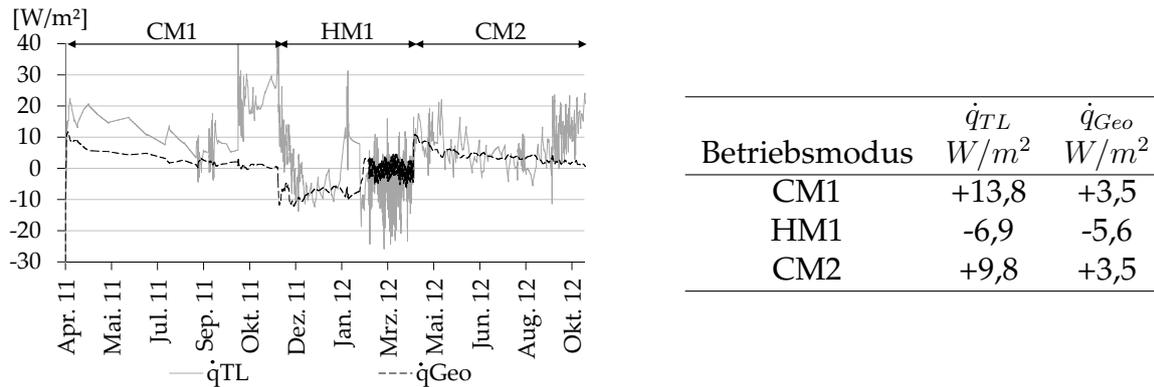


Abbildung 5.15: Mittlere Wärmestromdichten  $\dot{q}_{TL}$  und  $\dot{q}_{Geo}$ , links: Verlauf der Wärmestromdichten über die betrachteten Betriebsmodi, rechts: zeitlich und räumlich gemittelte Wärmestromdichten getrennt nach  $\dot{q}_{TL}$  und  $\dot{q}_{Geo}$  je Betriebsmodus

Der Verlauf des Messgebers c) 5 (vgl. Abb. 5.14) zeigt den Temperaturgang im Boden in einem horizontalen Abstand von ca. 2 m von der Außenkante der Tunnelschale. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Bodentemperaturen bereits zu Beginn der Simulation. Der Grund hierfür ist durch die Tiefenlage des Sensors unterhalb der GOK begründet (ca. 15 m), der eine eindeutige Prognose der ungestörten Bodentemperatur zulässt. Anders verhält es sich mit dem Messgeber b) 6, der sich ca. 2,75 m oberhalb der Tunnelfirste im Bereich der SSZ befindet. Durch die Wärmestrombedingungen an der GOK benötigt das Simulationsmodell eine gewisse Einschwingzeit (hier ca. 4 Monate) bis auch für den Messgeber b) 6 eine gute Überstimmung zwischen gemessenen und simulierten Werten erreicht wird.

Numerische Simulationen von komplexen Wärmeübertragungsmechanismen bieten die Möglichkeit, nachlaufend Messergebnisse einer TGTA besser interpretieren zu können. Beispielhaft zeigt die Abbildung 5.15 links die über die Oberfläche der Tunnelinnenschale  $\dot{q}_{TL}$  und Tunnelaußenschale  $\dot{q}_{Geo}$  gemittelten Wärmestromdichten als Ergebnis einer entsprechenden Auswertung der numerischen Simulation. Hierbei sind jeweils positive Wärmestromdichten vom Absorber weg, negative Wärmestromdichten zum Absorber hin orientiert.

Der Verlauf des Wärmestroms aus dem Tunnelinnenraum  $\dot{q}_{TL}$  zeigt eine hohe Instationarität, während der Wärmestrom aus dem Boden  $\dot{q}_{Geo}$  über den gesamten Simulationszeitraum wenig Fluktuationen aufzeigt. Besonders zur Zeit des Intervallbetriebs während der Heizperiode HM1 ist der Unterschied zwischen dem „geothermischen“  $\dot{q}_{Geo}$  und dem „tunnelthermischen“  $\dot{q}_{TL}$  Wärmestrom deutlich zu erkennen. Über die gesamte Simulationszeit beträgt die mittlere Wärmestromdichte ca.  $14,6 W/m^2$ , von der ca. 73% aus dem Tunnelinnenraum und lediglich 27% aus dem Erdreich extrahiert werden. Betrachtet man die unterschiedlichen Betriebsmodi getrennt voneinander, ergibt sich eine Aufteilung der Wärmestromdichten gemäß Abbildung 5.15 rechts. Während für die Kühlbetriebe (CM1 und CM2) der Wärmestrom aus dem Tunnelinnenraum dominiert, ist das Wärmestromverhältnis während des Heizbetriebs (HM1) zwischen  $\dot{q}_{TL}$  und  $\dot{q}_{Geo}$

nahezu ausgeglichen.

In einer Zusammenschau der Validierung ist festzustellen, dass sowohl die berücksichtigten Wärmetransportmechanismen im Boden und den Absorberrohrleitungen als auch die berücksichtigten Randbedingungen, das gewählte initiale Temperaturfeld sowie die geometrische und zeitliche Diskretisierung die gemessenen Temperaturfelder der Betriebsmodi CM1, HM1 und CM2 ausreichend genau widerspiegeln. Der Einsatz von numerischen Berechnungsmodellen ist dazu geeignet, vertiefte Erkenntnisse über die Wärmetransportmechanismen einer TGTA zu erhalten.

### 5.2.2 Tunnel Jenbach

Der Tunnel Jenbach ist Teil der transeuropäischen Achse TEN1 Berlin-Palermo und bildet das Baulos H8 im Rahmen der Zulaufstrecke Nord. Der Hauptteil des Bauloses ist ein ca. 3,5 km langer zweigleisiger Tunnel, der aufgrund der anstehenden Geologie und Hydrologie als maschineller Vortrieb mittels Hydroschild aufgeföhren wurde. Innerhalb des Schildtunnels wurde ein zusammenhängender Abschnitt von 54 m geothermisch aktiviert (siehe Abb. 5.16).

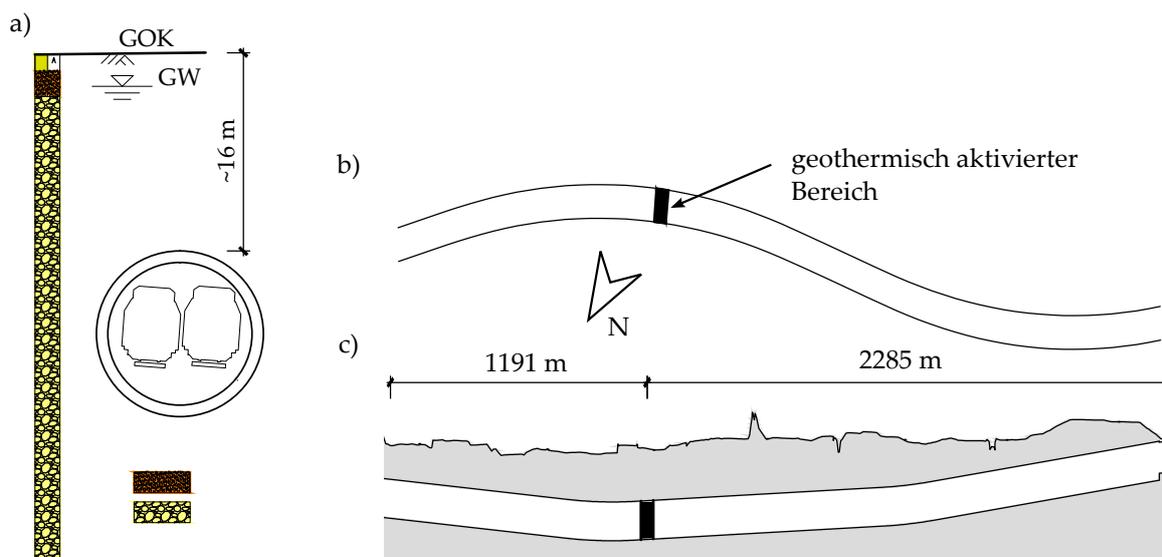


Abbildung 5.16: a): Baugrundsichtung, b): Lage des thermisch aktivierten Tunnelbereiches im Grundriss, c): Lage der thermisch aktivierten Tunnelblöcke im Schnitt

Der Tunnel liegt in den sogenannten Innschotterkiesen bzw. dem Verzahnungsbereich der Innschotterkiese mit dem anstehenden Schwemmfächer. Die Innschotterkiese werden durch zumeist feinkornarme, teils steinige Kiese mit einer hohen Wasserdurchlässigkeit gebildet. Besonders im Verzahnungsbereich kommen vermehrt Blöcke oder einkörnige Rollkieslagen vor. Die Kiese sind mitteldicht bis dicht gelagert. Der tunnelgeothermisch aktivierte Bereich befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Fluss Inn (vgl. Abb. 4.9

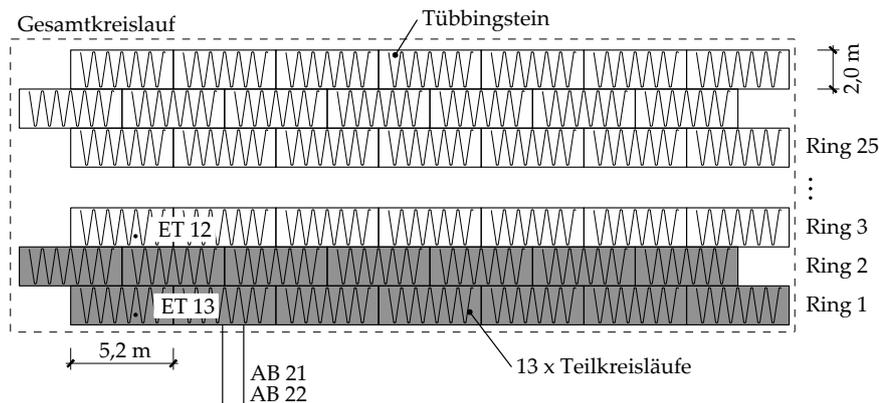


Abbildung 5.17: Abwicklung Absorberkreisläufe in den Tunneltübbingungen, Prinzipdarstellung

auf S. 46), wodurch die hydrologischen Verhältnisse im Bereich der TGTA durch sich ändernde Grundwasserfließrichtungen und lokal unterschiedliche Anströmwinkel an den Tunnel maßgeblich beeinflusst werden (vgl. Kapitel 4.4.2). Die Tunnelgeothermieanlage des Tunnels Jenbach basiert auf dem durch die Firmen Ed. Züblin AG und Rehau AG + Co entwickelten Energietübbing<sup>®</sup>, bei dem die hydraulisch durchströmten Absorberrohrleitungen im Zuge der Tübbingherstellung an die erdseitige Bewehrung befestigt werden [48]. Je Tübbingstein sind ca. 25 m Rohrleitungen aus vernetztem Polyethylen mit einem Außendurchmesser von 20 mm angeordnet und mit einem Abstand von 25-30 cm verlegt. Ein Tübbingring besteht aus 7 Tübbingsteinen und einem Schlussstein mit einer Ringbreite von 2,0 m. Hieraus ergibt sich eine Wärmeübertragungsfläche bezogen auf die Innenseite der Tunneltübbingung von ca.  $73 \text{ m}^2$  pro Tunnelring. Insgesamt wurden 27 Tübbingringe geothermisch aktiviert, was die Gesamtlänge der Geothermieanlage von 54 m ergibt. Jeweils zwei bzw. einmal drei Tübbingringe wurden zu einem Kreislauf zusammengeschlossen, was zu einer gesamten Rohrleitungslänge je hydraulischem Kreislauf von 350 bzw. 525 m führt. Die 13 Einzelkreisläufe sind über Sammelleitungen mit einer Wärmepumpe an der Geländeoberfläche verbunden. Den Abnehmer der geothermischen Energie bildet ein Gebäude der österreichischen Gemeinde Jenbach, das einen maximalen Heizwärmebedarf von 80 kW bezogen auf eine Außentemperatur von  $-16 \text{ }^\circ\text{C}$  hat. Die Geothermieanlage des Tunnels Jenbach ist mit Messtechnik zur Erfassung des Volumenstroms  $\dot{V}$  in den Rohrleitungen sowie der Absorberfluidtemperaturen, Tunnellufttemperaturen sowie der Tübbingtemperaturen ausgerüstet. Es werden die Vorlauftemperaturen (AB21) und Rücklauftemperaturen (AB22) der Sammelleitungen nach der Zusammenführung der 13 Einzelkreisläufe über Widerstandssensoren PT100 direkt im Fluidstrom gemessen. Eine Aussage über die Ein- bzw. Austrittstemperaturen je Teilkreislauf liegt nicht vor. Am Tübbingring drei (vgl. Abb. 5.17) werden an zwei Stellen ca. 10 cm vor der Tunnelinnenschale die Tunnellufttemperaturen (TU1 und TU2) erfasst.

In den Tübbingringen 1,3,5 sowie 11,13,15 wurden in Summe 8 Messfühler PT100 (ET) verbaut, von denen allerdings lediglich 5 Messgeber zuverlässige Messdaten liefern. Diese Messgeber wurden wie die Absorberleitungen an der erdseitigen Bewehrung der Tübbingung befestigt und liefern somit eine Temperatur im direkten Nahbereich der Ab-

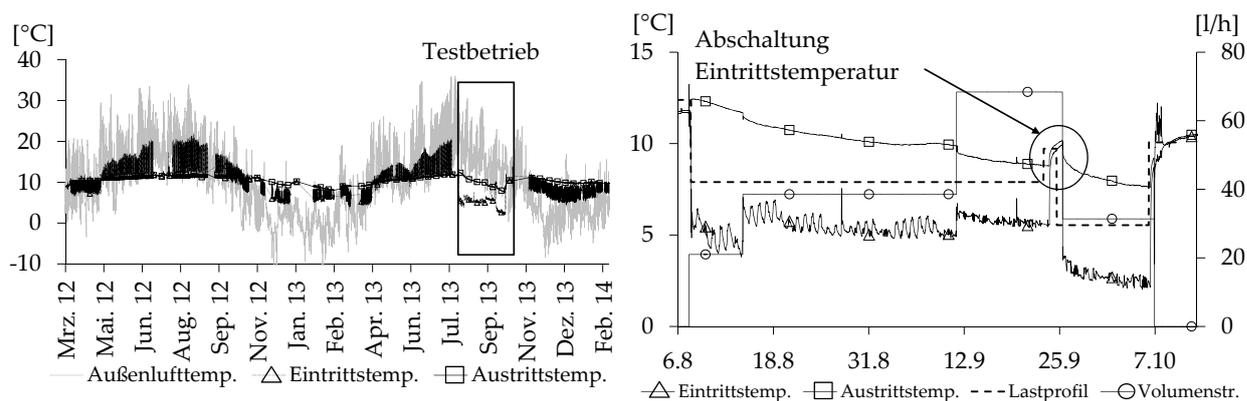


Abbildung 5.18: links: Eingestellte und gemessene Systemparameter über den Gesamtuntersuchungszeitraum 2012 - 2014 bezogen auf den Primärkreislauf, rechts: Ausschnitt der Systemparameter für den Zeitraum des Testbetriebs, Darstellung des generierten Temperaturlastprofils

sorberrohrleitungen. Über den Verlauf der Rohrleitungen verändert sich die Temperatur des Absorberfluids vom Eintritt zum Austritt unter dem Einfluss der Wärmeströme vom und zur Tunnelschale. Darüber hinaus erfolgt eine gegenseitige Beeinflussung der Absorberrohrleitungen untereinander. Da die Lage dieser Temperaturfühler nicht exakt bekannt ist, lassen sich die Messdaten dieser Sensoren aus diesem Grund nicht eindeutig interpretieren und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Die Abbildung 5.18 links zeigt die Systemparameter Eintritts- und Austrittstemperatur (AB21 und AB22 gemäß Abb. 5.17) sowie die gemessene Außenlufttemperatur über den Gesamtuntersuchungszeitraum 2012 - 2014.

Der Verlauf der Eintrittstemperatur in die Absorberkreisläufe zeigt bis auf den Testbetrieb im Jahr 2013 eine starke Abhängigkeit von der gemessenen Außenlufttemperatur. Der Grund hierfür liegt in der oberflächennahen Lage der Anbindeleitungen der TGTA (ca. 50 cm unter GOK) zum nahegelegenen Bauhof. Für die in diesem Bereich anstehenden Auffüllungen muss davon ausgegangen werden, dass sich nicht nur der jahreszeitliche Temperatureinfluss der Außenluft sondern auch der tägliche Temperatureingang in den Messdaten der Eintrittstemperatur und der Austrittstemperatur des Primärkreislaufes widerspiegelt. Ein Teil der an der Wärmepumpe im Bauhof zur Verfügung stehenden Wärmeenergie wird folglich direkt durch die erdverlegten Rohrleitungen im Sinne eines horizontalen Erdwärmekollektors zur Verfügung gestellt. Um diesen Einfluss auszuschalten und das geothermische Potential der TGTA exakt bestimmen zu können, wurde im Herbst 2013 ein Testbetrieb der TGTA eingerichtet (vgl. Abb. 5.18 rechts). Hierzu wurden die Vor- und Rücklaufleitungen direkt an der TGTA unterbrochen und ein separates Klimagerät in den Primärkreislauf eingekoppelt. Während des Testbetriebs wurden zunächst 11 von 13 Einzelkreisläufen, im Anschluss daran lediglich 5 Teilkreisläufe betrieben. Hieraus ergeben sich Wärmeübertragungsflächen bezogen auf die Lage der Rohrleitungen im Beton von  $1840 \text{ m}^2$  bzw.  $800 \text{ m}^2$  und maximale Wärmestromdichten von  $10 - 20 \text{ W/m}^2$ . In einer Zusammenschau der Messergebnisse zeigt sich,

dass zu einer lückenlosen Interpretation der Messdaten weitere Informationen über die wirkenden Wärmeströme im Bereich des Anschlusses der Rohrleitungen an die Wärmepumpe fehlen. Des Weiteren liefern die Messdaten der Temperatursensoren innerhalb der Betonschale keinen wesentlichen Erkenntnisgewinn und können für die eigentliche Auswertung nicht herangezogen werden. Eine Quantifizierung der Wärmeströme zwischen Absorber und Tunnelklima, sowie Absorber und umgebendem Boden ist auf Basis der Messergebnisse nicht möglich. Der Testbetrieb der TGTA aus dem Jahr 2013 dokumentiert den Betrieb der Anlage ausreichend genau, um diesen Zeitraum im Zuge der numerischen Simulationen im Sinne einer Validierungsberechnung zu untersuchen.

**Modellbeschreibung** Für die Nachrechnung der TGTA Jenbach wird ein zweidimensionales Berechnungsmodell genutzt, mit dem die Berücksichtigung einer schrägen GW-Strömung des Tunnels nicht direkt möglich ist. Aus diesem Grund wird das im Kapitel 4.4.2 vorgestellte Berechnungskonzept zur Berücksichtigung einer Schräganströmung auf die TGTA Jenbach angewendet. Hierzu wird das Modell gemäß Abbildung 4.10 entsprechend der Randbedingung für die TGTA Jenbach angepasst und für folgende Anströmverhältnisse ausgewertet.

- Tunneldurchmesser:  $d = 12,6m$
- Thermisch aktivierte Länge:  $l_{th} = 54,0m$
- Anströmgeschwindigkeit West:  $v_f = 3,5m/d$
- Anströmwinkel West:  $70^\circ$
- Anströmgeschwindigkeit Ost:  $v_f = 1,2m/d$
- Anströmwinkel West:  $20^\circ$

Auf Basis der Berechnungsergebnisse wird der Gesamtwärmestrom über den thermisch aktivierten Bereich aufintegriert und jeweils mit dem Gesamtwärmestrom einer Anströmung des Tunnels und einem Anströmwinkel von  $90^\circ$  ins Verhältnis gesetzt (siehe Tabelle 5.4). Der so ermittelte Faktor wird zur Korrektur des vom Aquifer auf den Tunnel wirkenden Wärmestroms verwendet. Hierbei wird vorausgesetzt, dass der vom Tunnelinneren auf den Absorber wirkende Wärmestrom durch ein geändertes Temperaturfeld außerhalb des Tunnels nicht beeinflusst wird.

Tabelle 5.4: Integrale Wärmeströme aus dem Aquifer auf den Tunnel Jenbach für unterschiedliche Anströmwinkel und Filtergeschwindigkeiten

| Ort  | $90^\circ$<br>[kW] | $70^\circ/20^\circ$<br>[kW] | Faktor<br>[-] |
|------|--------------------|-----------------------------|---------------|
| West | 102                | 98                          | 0,96          |
| Ost  | 58                 | 36                          | 0,62          |

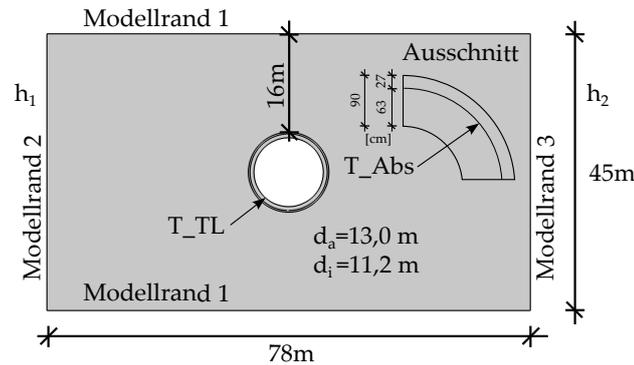


Abbildung 5.19: Zweidimensionales Berechnungsmodell der TGTA Jenbach

Die Tabelle 5.4 veranschaulicht den Einfluss der Filtergeschwindigkeit sowie des Anströmwinkels auf den Gesamtwärmestrom der aus dem Aquifer auf die Tunnelgeothermieanlage wirkt. Eine dreifach höhere Filtergeschwindigkeit führt zu einer Verdoppelung des extrahierbaren Wärmestroms, ein steiler Anströmwinkel von  $70^\circ > 60^\circ$  beeinflusst den Wärmestrom nur unwesentlich während ein flacher Anströmwinkel von  $20^\circ$  den Wärmestrom signifikant reduziert.

Die Abbildung 5.19 zeigt das zweidimensionale Berechnungsmodell der TGTA Jenbach.

An den Modellrändern 2 und 3 wird über die hydraulischen Druckhöhen  $h_1$  und  $h_2$  das hydraulische Gefälle entsprechend der erforderlichen Filtergeschwindigkeit festgelegt. Die Modellränder 1 und 2 sind hydraulisch impermeabel, so dass die Stromlinien hier parallel zum Modellrand verlaufen ( $-n \cdot u = 0$ ). Um den Tunnel erfolgt eine Umlenkung der Strömung durch den Verdrängungseffekt des Tunnels und führt zu einer Verdoppelung der Filtergeschwindigkeit an der Firste sowie der Sohle des Tunnels. Die thermische Randbedingung am Modellrand 2 bildet eine konstante Temperaturrandbedingung mit einem Wert von  $9,5^\circ\text{C}$  zur Abbildung eines mit einer konstanten Temperatur eintretenden Grundwassers. Am Modellrand 3 wird eine Randbedingung 3. Art gesetzt, die einen freien Wärmeausstrom aus dem Modellgebiet zulässt. Der Modellrand 1 wird als adiabat in der Berechnung berücksichtigt. Sämtliche Wärmeströme aus der Oberfläche (solare Wärme, latente Wärme usw.) sowie ein geothermischer Tiefenstrom werden folglich zur Gänze vernachlässigt. Die den Absorber beschreibende Randbedingung  $T_{Abs}$  wird als transiente Randbedingung 1. Art entlang eines die Absorberrohre repräsentierenden Kreisbogens berücksichtigt und über das in Abbildung 5.18 rechts gezeigte Lastprofil gesteuert. Die Randbedingung an der Innenseite des Tunnels  $T_{TL}$  wird zu Vergleichszwecken auf zwei unterschiedliche Arten modelliert. Zunächst erfolgt der Ansatz einer Randbedingung 1. Art, bei der die gemessene Tunnellufttemperatur direkt an der Oberfläche des Tunnels wirkt. Diese Randbedingung kann durch Wärmetransportprozesse innerhalb der Tunnelschale nicht geändert werden. Dieser Ansatz wurde in ähnlichen Untersuchungen (vgl. [108]) bereits in dieser Form gewählt. Ergänzend wird im Rahmen dieser Arbeit an der Oberfläche der Tunnelwandung eine Randbedingung 3. Art unter Berücksichtigung eines Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  gesetzt (vgl. Ka-

pitel 4.5). Die in der Simulation berücksichtigten Stoffparameter sind der Tabelle 5.5 zu entnehmen.

Tabelle 5.5: Thermische Baugrund- und Betonparameter aus [64] und ergänzt durch [125]

| Berechnungsgebiet    | $\lambda_{eff}$<br>$W/mK$ | $\rho$<br>$kg/m^3$ | $c_p$<br>$J/kgK$ |
|----------------------|---------------------------|--------------------|------------------|
| Boden (Kies)         | 2,1                       | 2000               | 1200             |
| Tunnelschale (Beton) | 1,8                       | 2300               | 880              |

**Validierung der Berechnungsergebnisse** Zunächst zeigt die Abbildung 5.20 links die auf den Absorber der TGTA wirkenden Wärmestromdichten getrennt nach den Anteilen Tunnelinnenraum  $\dot{q}_{TL}$  und Boden  $\dot{q}_{Geo}$  für die Zeit des Testbetriebs. Während der Wärmestrom aus dem Boden nach einer Einlaufphase von ca. 200 h konstant bei ca.  $5,2 W/m^2$  bleibt, folgt der Wärmestrom aus dem Tunnelinneren  $\dot{q}_{TL}$  direkt der Tunnellufttemperatur, die für diese Simulation als Randbedingung 1. Art berücksichtigt wurde. Nach der Reduzierung der Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf von ca.  $5,5^\circ C$  auf ca.  $2,5^\circ C$  steigt die Wärmestromdichte aus dem Boden auf  $12,9 W/m^2$  an. Über den gesamten Testzeitraum wurde eine mittlere Wärmestromdichte von ca.  $23 W/m^2$  prognostiziert, von der  $7 W/m^2$  (30%) auf  $\dot{q}_{Geo}$  und  $16 W/m^2$  (70%) auf  $\dot{q}_{TL}$  entfallen.

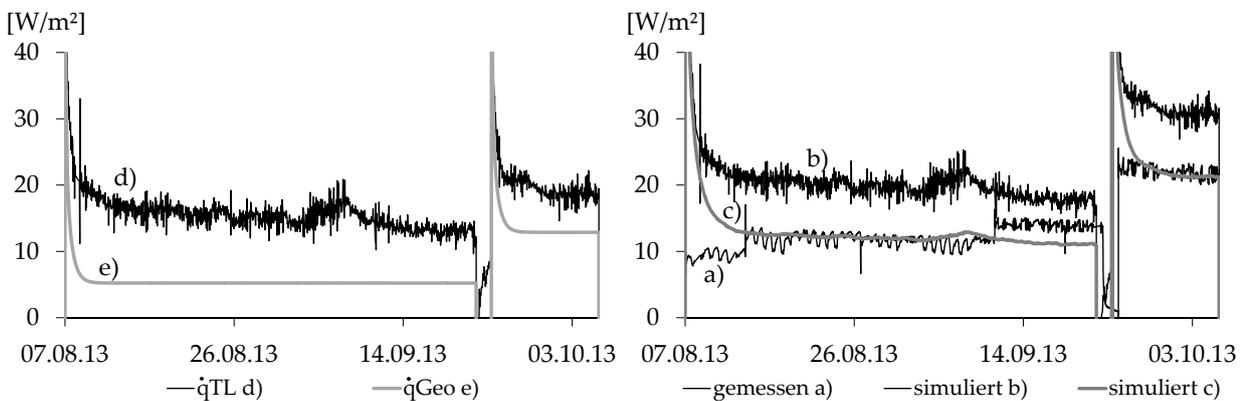


Abbildung 5.20: links: Simulierte Wärmestromdichten  $\dot{q}_{TL}$  und  $\dot{q}_{Geo}$  für die Zeit des Testbetriebs, rechts: Vergleich der gemessenen a) und simulierten b) = Randbedingung 1. Art, c) = Randbedingung 1. Art) Wärmestromdichte  $\dot{q}$  bezogen auf die Lage der Absorberkreise

Die Abbildung 5.20 rechts zeigt den Vergleich der gemessenen und auf zwei unterschiedliche Arten prognostizierten Wärmestromdichte  $\dot{q}$ . Unter dem Ansatz einer Randbedingung 1. Art an der Tunnelinnenseite (b) wird eine größere mittlere Wärmestromdichte prognostiziert als in Realität gemessen wurde (Überschätzung ca. 70%). Unter

dem Ansatz einer Randbedingung 3. Art (c) wird die tatsächlich extrahierte Wärmestromdichte gut erreicht (Überschätzung ca. 10%), verläuft im Vergleich zur tatsächlichen Energieextraktion jedoch deutlich geglätteter und kann die über den Tagesverlauf zeitvariante Wärmestromdichte nicht abbilden. Die Gründe für die unzureichenden Validierungsergebnisse sind folgenden Problembereichen zuzuordnen:

- Hydrogeologische Verhältnisse
  - Weder die absolute Filtergeschwindigkeit  $v_f$  noch der zeitlich variierende Anströmwinkel sind für die TGTA in ausreichender Genauigkeit bekannt.
  - Zur Beschreibung des Wärmeübergangs von der Tunnelschale zum Boden existiert derzeit kein Modell, das die Grenzschichteffekte und veränderten lokalen Baugrundeigenschaften im Bereich der vom Tunnelvortrieb beeinflussten Zone berücksichtigt.
- Tunnelklima
  - Die Beschreibung eines exakten Wärmeübergangs von der Tunnelluft zur Tunnelschale ist aufgrund der fehlenden Strömungsmessdaten nicht möglich, darüber hinaus existiert noch keine abgesicherte Korrelation zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten.
  - Die genaue Lage und Genauigkeit der Tunnellufttemperaturmessung sind nicht bekannt.
- Datengrundlage Feldversuch
  - Die exakte Lage der Tunnelschalensensoren ist nicht bekannt, sodass diese Messdaten nicht verwendet werden können.
  - Es liegt ausschließlich eine Wärmebilanz für den gesamten thermisch aktiven Bereich von 54 m vor, so dass eine zonierte Auswertung z.B. im Bereich nahe der Tunnellufttemperaturmessung nicht möglich ist.

## 5.3 Entwicklung eines Prognosemodells

Die Idee zur Entwicklung eines parametrisierten Modells zur Prognose des tunnelgeothermischen Potentials fußt auf der Tatsache, dass geschlossene Absorbersysteme im Tunnelbau derzeit fast ausschließlich zu Testzwecken eingesetzt werden und bis auf die Anlagen Nanori-Toge Tunnel in Japan [65], den Tunnel Jenbach in Österreich [48] und in naher Zukunft den Crossrail Tunnel in Großbritannien [90] keine Realnutzungen existieren. Die Modellierung und Simulation einer TGTA erfordert zum derzeitigen Stand noch vertiefte Kenntnisse über die Prozesse des instationären Wärmetransportes sowie eine intensive Einarbeitung in eine entsprechende Simulationsumgebung. Oft ist hierfür gerade im Zuge einer frühen Planungsphase nicht ausreichend Planungszeit gegeben oder die Kosten zur Durchführung einer Machbarkeitsstudie werden seitens der Bauherren gescheut. Folgende Ziele werden mit der Entwicklung des Prognosemodells verfolgt:

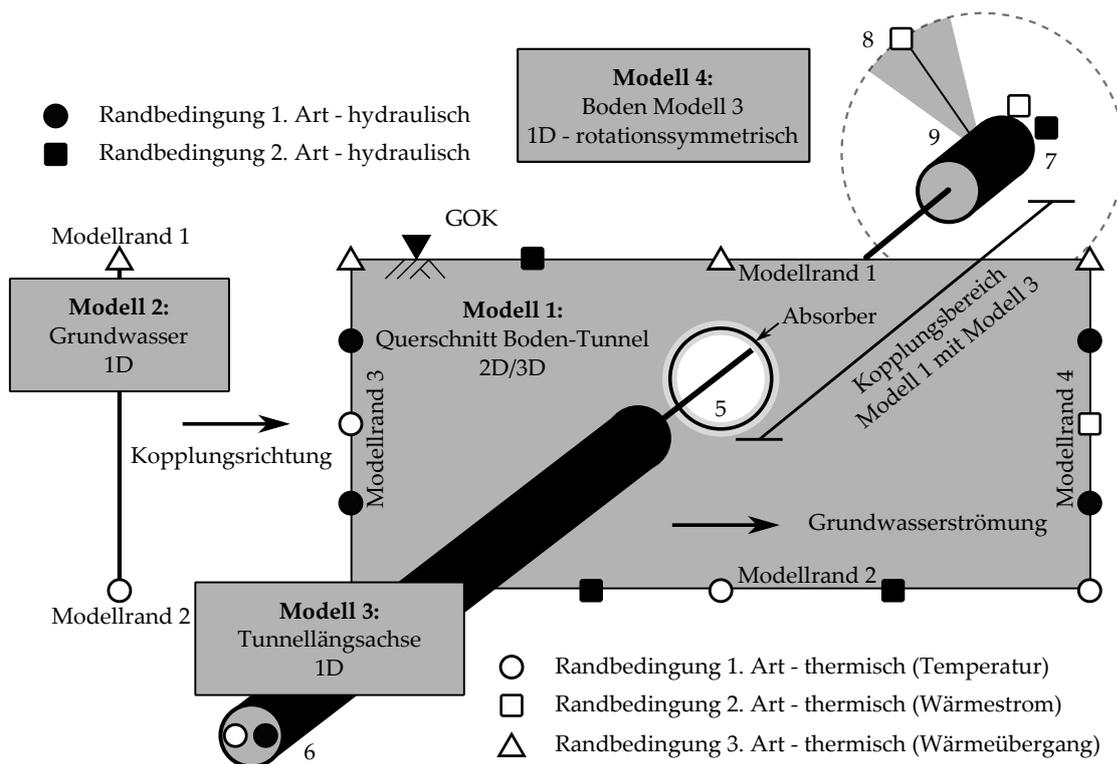


Abbildung 5.21: Schematische Darstellung der Komponenten des Modells zur Prognose des geothermischen Potentials einer TGTA, Modellränder 6 - 9 werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben

- Überführung sämtlicher Wärmetransportvorgänge (vgl. Kapitel 4) in eine geschlossene Simulationsumgebung
- Berücksichtigung abgesicherter und validierter Randbedingungen und Initialzustände
- Eröffnung der Möglichkeit zur Durchführung von automatisierten Parameterstudien im Zuge einer Machbarkeitsuntersuchung
- Eröffnung der Möglichkeit zur Nutzung des Prognosemodells von einem breiten Nutzerkreis und damit langfristig die Stärkung der tunnelgeothermischen Anwendungen in der Praxis

Das Prognosemodell setzt sich aus 4 Teilmodellen zusammen (vgl. Abb. 5.21). Die Basis bildet ein zweidimensionales Berechnungsgebiet (Modell 1), das für einfache Problemstellungen wie z.B. rein konduktiven Wärmetransport im Mehrphasenmedium Boden bereits wesentliche Fragestellungen in der Planungsphase einer TGTA beantworten kann. Zur korrekten Abbildung eines advektiven Wärmetransportes im Boden wird an den seitlichen Modellrand ein eindimensionales Untermodell (Modell 2) gekoppelt. Um den Wärmetransport in Tunnellängsrichtung und die Interaktion der TGTA mit dem

Tunnelluftraum abzubilden, werden zusätzlich die Modelle 3 und 4 zu einem Gesamtprognosemodell gekoppelt.

### 5.3.1 Beschreibung Grundmodell - Modell 1

Das Grundmodell wird durch ein zweidimensionales Berechnungsgebiet gebildet, das die Wärmetransportmechanismen im Mehrphasenmedium Boden sowie der Tunnelschale abbildet. An dem die GOK repräsentierenden Modellrand 1 wird eine Randbedingung 3. Art berücksichtigt, deren Eingangswerte wie die Lufttemperatur in 2 m über der GOK sowie die Luftströmungsgeschwindigkeit z.B. den Rasterdaten der Testreferenzjahre [38] zu entnehmen sind. Am unteren Modellrand 2 wird unter Angabe einer jahreszeitlich gemittelten Oberflächentemperatur  $\bar{\vartheta}_{amb}$ , der solaren Speicherzone  $z_{SSZ}$  und des geothermischen Gradienten  $\Lambda$  die ungestörte Bodentemperatur entsprechend Gleichung 4.20 festgelegt. Hierzu wird die Lage des unteren Modellrandes im Verhältnis zur Tunnelaußenkante unter Berücksichtigung eines festen Vorgabewertes bestimmt. Für den Fall eines rein konduktiven Wärmetransportes im Boden werden die seitlichen Modellränder mit einer Randbedingung 3. Art thermisch isoliert berücksichtigt. Hierzu ist der Modellrand in ausreichendem Abstand zur Wärmequelle bzw. Wärmesenke anzuordnen. In der aktuellen Modellumgebung wird ein Abstand von Außenkante der Tunnelschale zu den Modellrändern 3 und 4 von  $12 \cdot d_{Tunnel}$  berücksichtigt. Für den Fall einer Grundwasserströmung im Boden wird der oberstromige Modellrand (hier Modellrand 3) durch eine Randbedingung 1. Art gebildet, deren Werte vom Modell 2 an diesen Modellrand gekoppelt werden. Den unterstromigen Modellrand 4 bildet eine Wärmeausstromrandbedingung. Die Interaktion der TGTA mit dem Tunnelklima erfolgt über die Angabe einer Randbedingung 3. Art am Modellrand 5. Für einfache Fragestellungen können die Eingangswerte der Tunnellufttemperatur  $T_{TL}$ , der Tunnelluftströmung  $v_{TL}$  sowie der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  für den Bereich der TGTA auf Basis der Empfehlungen in Kapitel 4.5 festgelegt werden. Zur Berücksichtigung der Interaktion der TGTA mit dem Tunnelklima erfolgt die Kopplung des Modells 1 an das Untermodell 3 im Bereich der thermischen Aktivierung. Die Simulation des geothermischen Betriebs erfolgt im zweidimensionalen Berechnungsmodell über die Steuerung der Temperatur (Randbedingung 1. Art) im Bereich der Geometrie, welche die Lage der Absorberrohrleitungen in der Tunnelschale repräsentiert.

### 5.3.2 Modellrandbedingung Grundwasser - Modell 2

In Kapitel 4.4.2 wird der Verlauf der Temperatur im Boden infolge einer Grundwasserströmung beschrieben. Die Abbildung 5.22 zeigt den theoretischen jahreszeitlichen Temperaturbereich infolge einer über die gesamte Modelltiefe konstanten Temperaturrandbedingung am Modellrand 3 sowie advektiven Wärmetransport im Boden an einem horizontalen Schnitt.

Abhängig von der Filtergeschwindigkeit, der Tiefenlage unter GOK, der Wärmekapazität des Bodens, dem Wärmestrom an der GOK sowie der oberstromigen Temperaturrandbedingung ist bis zum Erreichen eines ungestörten Temperaturfeldes ein entspre-

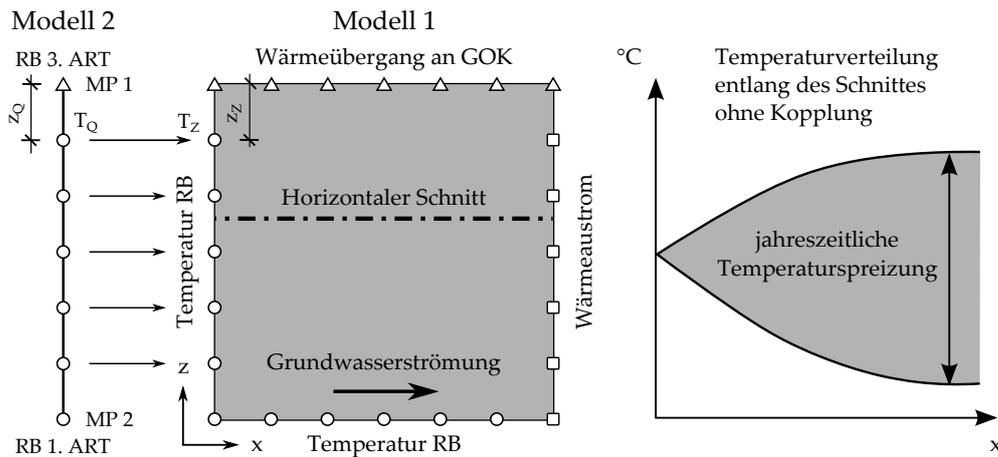


Abbildung 5.22: links: Schematische Darstellung des Berechnungskonzeptes zur Abbildung einer Temperaturrandbedingung am Modellrand des Modells 1, rechts: Einhüllender Temperaturverlauf unter Berücksichtigung einer konstanten Temperaturrandbedingung am Modellrand 3 des Modells 1 - Randeffekt

chender Randeffekt zu berücksichtigen, der zum einen nur durch aufwändige Voruntersuchungen abzuschätzen ist und darüber hinaus das Berechnungsgebiet vergrößert und damit die Berechnungszeit erhöht. Das Modell 2 ist ein eindimensionales Berechnungsmodell, in dem an den Modellrändern dieselben Randbedingungen wie an den entsprechenden Modellrändern des Modells 1 angesetzt werden. Die Ausdehnung des Modells 2 entspricht der Modelltiefe des Modells 1. Innerhalb des Modells 1 wird ausschließlich Wärmeleitung innerhalb eines Bodens gelöst, so dass sich über die Modelltiefe ein klassisches Bodentemperaturprofil (vgl. Abb. 4.2) einstellt. Um die Modelle 1 und 2 miteinander zu koppeln, sind die Temperaturen des Modells 2  $T_Q$  (Quelle) auf den Modellrand des Modells 1  $T_Z$  (Ziel) zu übergeben. Der hierzu verwendete lineare Operator basiert auf der Idee, dass eine affine Transformation zwischen zwei Linien definiert werden kann, wenn zwei entsprechende Punktepaare ( $z_Q$  und  $z_Z$ ) auf den Linien bekannt sind. Wenn die Transformation einer ausreichenden Anzahl von Basispunkten bekannt ist, kann jeder Punkt durch lineare Überlagerung entsprechend Gleichung 5.15 transformiert werden, wobei B ein Operator zur Koordinatentransformation ist.

$$T_Z(z_Z) = f(T_Q(B(z_Q))) \quad (5.15)$$

Unter Nutzung des Modells 2 wird ein in vertikaler Richtung eindimensionales Temperaturfeld in der zweidimensionalen Domain des Modells 1 erzeugt, so dass die beschriebenen und in Abbildung 5.22 gezeigten Randeffekte ausgeschaltet werden.

### 5.3.3 Modellrandbedingung Tunnelklima - Modell 3 und 4

In Kapitel 4.5 wird gezeigt, dass einer realitätsnahen Abbildung der Wärmetransportvorgänge in Tunnellängsrichtung eine entscheidende Bedeutung bei der Prognose des

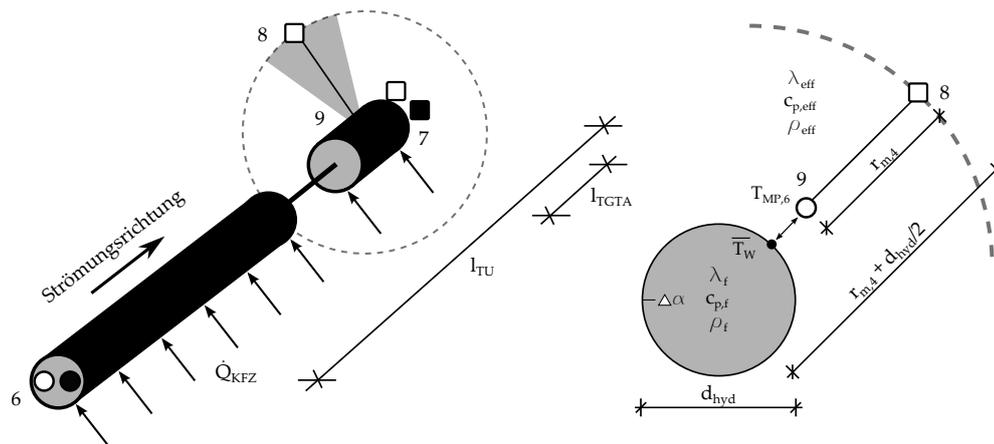


Abbildung 5.23: Schematische Darstellung der Modelle 3 (Tunnellängsrichtung) und 4 (Boden)

geothermischen Potentials einer TGTA zukommt. Zur Abbildung der Strömungszustände innerhalb eines Infrastrukturtunnels kommen sowohl eindimensionale, stationäre Modelle wie auch komplexe Computational Fluid Dynamic (CFD) - Simulationen zur Anwendung. In [7] wird beschrieben, dass eindimensionale Modelle Einflüsse der Tunnelgeometrie, aus dem Verkehr, der Lüftung u.a. nur unzureichend abbilden können. Simulationen mittels der CFD haben dagegen den Nachteil, dass die Abbildung gesamter Tunnelstrecken aufgrund der großen Simulationszeiten bis dato noch nicht möglich ist. Zur Entwicklung und Validierung von physikalischen Modellen zur Beschreibung der Tunnelluftströmung und der Tunnellufttemperatur wird daher immer noch auf Untersuchungen an Modelltunneln [27][115][9] zurückgegriffen. Im Folgenden wird zur Abbildung der Wärmetransportvorgänge in Tunnellängsrichtung trotz der genannten Einschränkungen auf ein eindimensionales Rohrströmungsmodell zurückgegriffen, das mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Tunnelklimamessdaten (vgl. Kapitel 4.5) entwickelt und kalibriert wird.

**Modellbeschreibung** Die Grundlage für das Modell zur Abbildung der Wärmetransportvorgänge in Tunnellängsrichtung bildet das Rohrströmungsmodell gemäß Kapitel 4.6. Die Entwicklung des Modells erfolgt auf der Basis der Kenntnisse zu Straßentunneln mit Richtungsröhren, ist grundsätzlich jedoch auf andere Tunnel übertragbar. Die Modelllänge entspricht der zu modellierenden Tunnellänge  $l_{TU}$  von Portal zu Portal (vgl. Abb. 5.23).

Am Modellrand 6 werden als Randbedingung 1. Art die Umgebungstemperatur  $\vartheta_{amb}$  sowie die Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit  $v_{TL}$  aufgeprägt. Entlang der Tunnelachse wirkt ein über die Tunnellänge  $l_{TU}$  konstanter transienter Wärmestrom  $\dot{Q}_{KFZ}$ , der zu einem steigenden Temperaturgradienten entlang der Tunnellängsachse führt. Am Austritt des Tunnels (Modellrand 7) wird als strömungstechnische Randbedingung über den atmosphärischen Druck repräsentiert. Zusätzlich wirkt am Modellrand 7 eine Wärmeausstromrandbedingung. Der eindimensionale Wärmetransport innerhalb des Tunnelluftraumes berücksichtigt einen äquivalenten Tunneldurchmesser  $d_{hyd}$  entsprechend

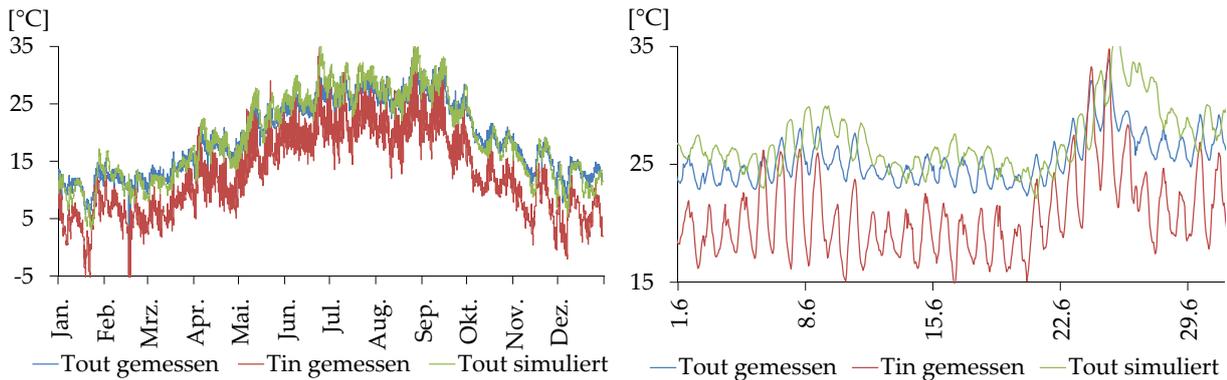


Abbildung 5.24: Jahresgang der gemessenen Tunnellufttemperaturen am Ein- und Austritt des Tunnels Jagdberg, Thüringen, simulierte Austrittstemperatur, links: Temperaturverlauf über den Jahresverlauf, rechts: Temperaturverlauf im Juni 2016

Gleichung 4.45 sowie die Fluidparameter der Tunnelluft (Index  $f$ ). Am Übergang vom Tunnelluftraum an die Tunnelwandung berücksichtigt eine Randbedingung 3. Art den Wärmeübergang von der Tunnelluft an die Betonschale entsprechend Gleichung 4.48. Die Wandtemperatur  $T_w$  wird bidirektional an die Randbedingung 1. Art des Modells 4 ( $T_6$ ) gekoppelt.  $T_w$  ist hierbei die mittlere Wandtemperatur entlang der Tunnellängsrichtung. Das Modell 4 beschreibt als eindimensionales, rotationssymmetrisches Modell das radialsymmetrische Temperaturfeld um die Tunnellängsachse. Hierbei hat es den Drehpunkt um den Mittelpunkt des Modells 3, so dass der Modellrand 8 in einer Entfernung  $r_4 + d_{hyd}/2$  liegt und das Modell eine Tiefenausdehnung von  $r_4$  besitzt. Hierzu ist  $r_4$  entsprechend den Ausführungen zur der Festlegung des Modellrandes außerhalb des vom Tunnel beeinflussten Bereiches festzulegen. Zur Sicherstellung eines gut gestellten Problems wird am Modellrand 8 eine Randbedingung 2. Art in Form des geothermischen Tiefenstroms  $\dot{Q}_{Geo}$  gesetzt. Die Einkopplung des thermisch aktivierten Tunnelbereiches erfolgt in der bereits beschriebenen Weise, nur dass die Wandtemperatur  $T_w$  nicht an den Modellrand 5 sondern an den Modellrand 9 entsprechend Abbildung 5.21 übergeben wird.

**Validierung** Die Validierung der Modelle 3 und 4 erfolgt auf der Datengrundlage des Tunnels Jagdberg in Thüringen. Der Tunnel Jagdberg besitzt zwei Richtungsröhren mit einer Länge  $l_{TV}$  von ca. 3070 m je Tunnelröhre und einem Luftraumquerschnitt von  $84 \text{ m}^2$ . Am Eintritt in den Tunnel werden als Randbedingung die gemessene Tunnellufttemperatur sowie die gemessene Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit berücksichtigt. Es findet folglich keine Überprüfung der Korrelation zwischen der Fahrzeugdichte und der Strömungsgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 4.5) statt.

Die Abbildung 5.24 links zeigt den Jahresgang der gemessenen Tunnellufttemperaturen am Ein- und Austritt des Tunnels und stellt diese der simulierten Austrittstemperatur  $T_{out}$  gegenüber. Die rechte Abbildung zeigt die identischen Kurven, allerdings ausschließlich für den Monat Juni 2016. Neben einer grundsätzlich guten Übereinstimmung

des Temperaturverlaufes, zeigt der simulierte Temperaturgang meist höhere Temperaturen als die gemessene Austrittstemperatur  $T_{out}$  am Tunnel. Dieses Verhalten kehrt sich im Winter um, so dass das jahreszeitliche Mittel der simulierten Austrittstemperatur der gemessenen Austrittstemperatur entspricht. Die gute Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Tunnellufttemperatur am Austritt des Tunnels wurde durch eine iterative Anpassung der Wärmekapazität des umgebenden Bodens erreicht. Dieses Vorgehen konnte auf der Basis der zur Verfügung stehenden Messdaten noch nicht abschließend physikalisch begründet werden, so dass die Entwicklung der Modelle 3 und 4 weiterer Untersuchungen bedarf.

### 5.3.4 Erweiterung 2D zu 3D

Das im Kapitel 5.3 beschriebene zweidimensionale Berechnungsmodell 1 bildet einen ebenen Schnitt durch den Boden sowie die Tunnelschale ab und ermöglicht die Prognose des tunnelgeothermischen Potentials für einfache Problemstellungen. Aussagen über die Effizienz einer TGTA sind erst unter Berücksichtigung der Wärmeübertragungsmechanismen der Absorberrohrleitungen möglich, da der sich einstellende Druckverlust in den Leitungen bei der Gesamtbilanzierung berücksichtigt werden kann. Mit der dreidimensionalen Abbildung einer TGTA geht gegenüber einer zweidimensionalen Berechnung eine Zunahme der Simulationszeit einher, die bei der Abbildung eines vollständigen Tunnels und dem umgebenden Boden unter Nutzung üblicher Desktoprechner keine realistische Projektbearbeitung ermöglicht. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden eine Modellgeometrie gewählt, für die der Begriff der 3. Dimension irreführend ist, da diese streng genommen nur für Wärmetransportmechanismen des Tunnelgeothermieabsorbers bestehend aus Tunnelschale und Absorberleitungen gilt, jedoch nicht für den Boden. Hier liegt aufgrund der begrenzten Modelltiefe in Längsrichtung des Tunnels (Blocklänge, Tübbingbreite) weiterhin ein annähernd zweidimensionales Temperaturfeld vor. Um auch im Boden dreidimensionale Effekte berücksichtigen zu können wird an dieser Stelle auf die Ausführungen in Kapitel 4.4.2 verwiesen. Zur Berücksichtigung der Absorberrohrleitungen innerhalb eines zweidimensionalen Berechnungsgebietes wird eine Randbedingung 1. Art über die Vorgabe einer konstanten Temperatur über den gesamten Absorberbereich zu Grunde gelegt. Bei der Abbildung der Rohrleitungen innerhalb der Tunnelschale stellt sich je nach Anordnung der Rohrleitungen in der Tunnelschale (Prinzip Gegenstrom oder Gleichstrom) in den Rohrleitungen ein logarithmischer Temperaturverlauf ein, der von der in einem zweidimensionalen Berechnungsgebiet angesetzten Randbedingung abweicht. Zur Bewertung der Gleichwertigkeit zwischen der Abbildung einer Randbedingung 1. Art in einem zweidimensionalen Modell und der Berücksichtigung der gekoppelten Wärmetransportvorgänge zwischen Absorberleitungen und Tunnelschalenbeton wurden transiente Vergleichsberechnungen durchgeführt. Hierzu wurden zwei Simulationsmodelle erstellt und unter der Berücksichtigung des gleichen Lastprofils instationär über ein Referenzjahr simuliert. Das zweidimensionale Modell repräsentiert einen ebenen vertikalen Schnitt durch das in Abbildung 5.25 dargestellte dreidimensionale Berechnungsmodell.

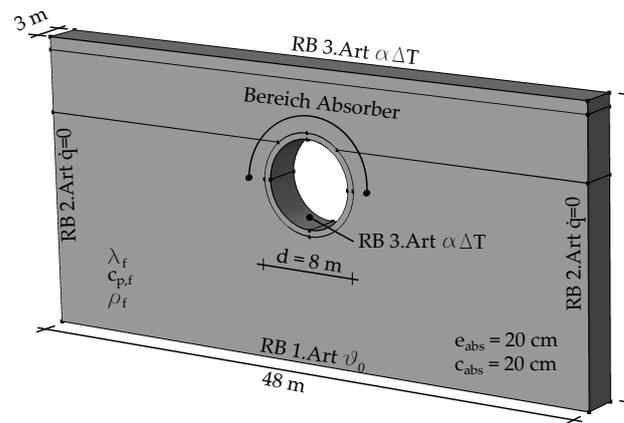


Abbildung 5.25: Isometrische Darstellung des Berechnungsmodells zum Vergleich der Absorberabbildung 2D/3D

Die Absorberrohrleitungen befinden sich ausschließlich in der oberen Hälfte des Tunnels und werden durch zwei separate Kreisläufe gebildet. Der Schenkelabstand  $e_{abs}$  der Rohrleitungen zueinander sowie die erdseitige Betondeckung  $e_{abs}$  betragen jeweils 20 cm. Als Wert der Randbedingung 1. Art wurde für beide Fälle  $0^\circ\text{C}$ , im zweidimensionalen Modell am Bogen der den Absorber repräsentiert, im dreidimensionalen Modell am Rohreintritt, zu Grunde gelegt. Der Strömungszustand in den Rohrleitungen wurde von laminar bis turbulent variiert. Im Ergebnis lässt sich zeigen, dass unter den gewählten Modellparametern bis zum Erreichen eines turbulenten Strömungszustandes in den Rohrleitungen der extrahierte Wärmestrom unterhalb des Wärmestroms aus dem zweidimensionalen Berechnungsmodell liegt. Wird ein turbulenter Strömungszustand erreicht, liegt der Wärmestrom aus dem dreidimensionalen Berechnungsmodell leicht über dem des zweidimensionalen Berechnungsmodells, allerdings steigt der Wärmestrom mit zunehmender  $Re_L$ -Zahl nicht nennenswert weiter an. Der Grund für die leicht erhöhte Entzugsleistung gegenüber dem zweidimensionalen Berechnungsmodell ist auf den Randeinfluss in Längsrichtung des Tunnels bei der Abbildung der dreidimensionalen Geometrie zurück zu führen. Die detaillierten Berechnungsergebnisse werden im Zuge der Parameterstudie in Kapitel 5.4.1 gezeigt. Die Untersuchung unter den berücksichtigten Randbedingungen und Parametern zeigt, dass die Abbildung der Absorberrohrleitungen in Form einer Randbedingung 1. Art in einem zweidimensionalen Berechnungsmodell zu sinnvollen Ergebnisses führt, solange in den Absorberrohrleitungen ein Strömungszustand am Übergang vom laminaren zum turbulenten Bereich eingestellt wird und die Geometrie der Absorberrohrleitungen entsprechend ausgebildet ist. Weitere Untersuchungen im Zusammenhang mit Machbarkeitsstudien aus dem Bereich der Tunnelgeothermie am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart zeigen, dass eine zweidimensionale Berechnung im Allgemeinen zu einer Überschätzung des extrahierbaren Wärmestroms von ca. 5-10 % führt.



## 5.4 Variantenuntersuchungen

### 5.4.1 Parameterstudie

Das geothermische Potential bzw. die Effizienz einer TGTA ist von zahlreichen Parametern abhängig, die sich entsprechend der beteiligten Wärmetransportmechanismen gliedern lassen (vgl. Abb. 5.40 auf S. 131). Eine Eingrenzung auf die wesentlichen Einflussparameter, die das thermische Verhalten einer TGTA beeinflussen, wird auf der Basis einer Parameterstudie durchgeführt, bei der für jede Parametervariation ein Simulationsmodell für einen repräsentativen Jahresgang berechnet wird. Hierbei wird ein Energiebedarfsprofil für den Heizwärmebedarf eines Einfamilienhauses gemäß Kapitel 4.6 und Anhang D berücksichtigt. Innerhalb des Tunnelluftraumes wirkt das stündlich aufgelöste Tunnelklima des Tunnels Stuttgart-Fasanenhof, das über eine Wärmeübergangsrandbedingung (RB 3. Art) eingekoppelt wird. Diese Parameterstudie gilt folglich im Wesentlichen für Bahntunnel im Gegenrichtungsbetrieb, und ist in ihren Kernaussagen auf sämtliche TGTAs übertragbar. Die Abbildung 5.27 links zeigt exemplarisch den simulierten Wärmeentzug einer TGTA für ein vollständiges Simulationsjahr. Am unteren Diagrammrand sind in grauer Schattierung die Zeiten markiert, in denen die TGTA in Betrieb ist. Zu erkennen ist ein konstanter Wärmeentzug für die Monate Januar bis Mitte April und Mitte Oktober bis Dezember. In der verbleibenden Jahreshälfte findet kein kontinuierlicher Betrieb der Anlage statt, da von Mitte Juli bis Ende August keine Heizwärmeenergie benötigt wird.

Je nach radialer Anordnung der Absorberleitungen in der Tunnelschale tendiert das thermische Verhalten einer TGTA entweder in Richtung eines klassischen geothermischen Wärmeübertragers oder in Richtung eines Systems im Sinne einer Luftwärmepumpe. Während der Wärmestrom aus dem Boden  $\dot{q}_{Geo}$  unter einem kontinuierlichen Wärmeentzug immer weiter abnimmt, folgt der Wärmestrom aus dem Tunnelluftraum  $\dot{q}_{TL}$  dem Jahresgang der Tunnellufttemperatur. Dieser Umstand und die Beaufschlagung des Systems mit einem realen Lastprofil führen dazu, dass bereits nach ca. 2 Monaten Simulationszeit vom initialen Temperaturfeld unverfälschte Berechnungsergebnisse erzielt werden. Die Abbildung 5.27 rechts zeigt ergänzend hierzu das Ergebnis eines sommerlichen Kühlbetriebs einer TGTA über drei Simulationsjahre. Dargestellt sind jeweils die maximalen Wärmestromdichten im Laufe eines Jahres, die im Verlauf der ersten 3 Simulationsjahre von  $35,9 \text{ W/m}^2$  auf  $34,2 \text{ W/m}^2$  abnehmen. Auch für diese Berechnung ist erkennbar, dass aufgrund des hohen Anteils des tunnelluftseitigen Wärmestroms Einschwingzeiten der numerischen Simulationen, wie dies z.B. bei der Untersuchung von Erdwärmesonden der Fall ist, nur einen untergeordneten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt zum Zeitpunkt des über den Jahresverlauf minimalen Wärmeentzugs (vgl. Abb. 5.27 links). Zeiten mit höheren Wärmestromdichten bleiben folglich außer Betracht. Nachfolgend werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen der Parameterstudie vorgestellt und diskutiert. Eine Systemskizze fasst jeweils die wesentlichen Modellrandbedingungen, Modellgeometrien und Materialeigenschaften zusammen und beschreibt den variierten Modellparameter.

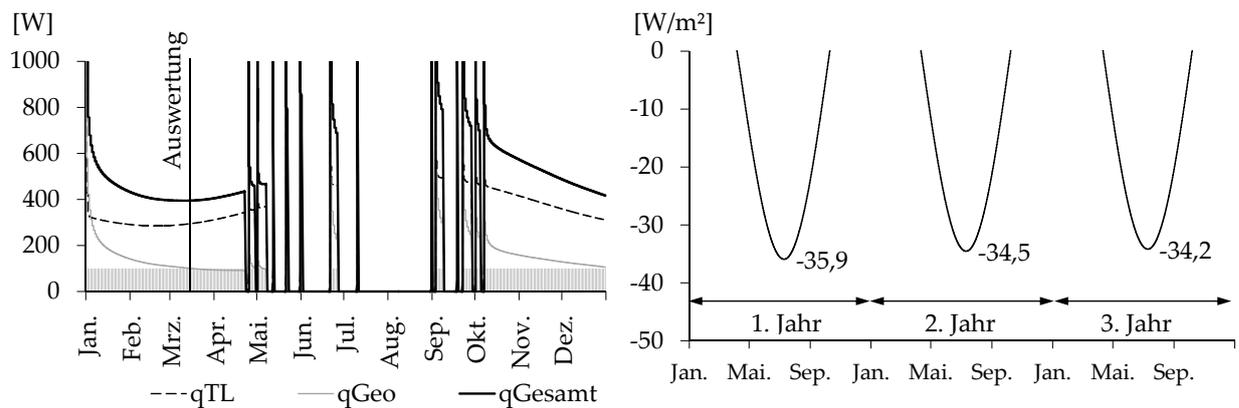


Abbildung 5.27: Jahresgang der gemessenen Tunnellufttemperaturen am Ein- und Austritt des Tunnels, simulierte Austrittstemperatur, links: Temperaturverlauf über den Jahresverlauf, rechts: Temperaturverlauf im Juni 2016

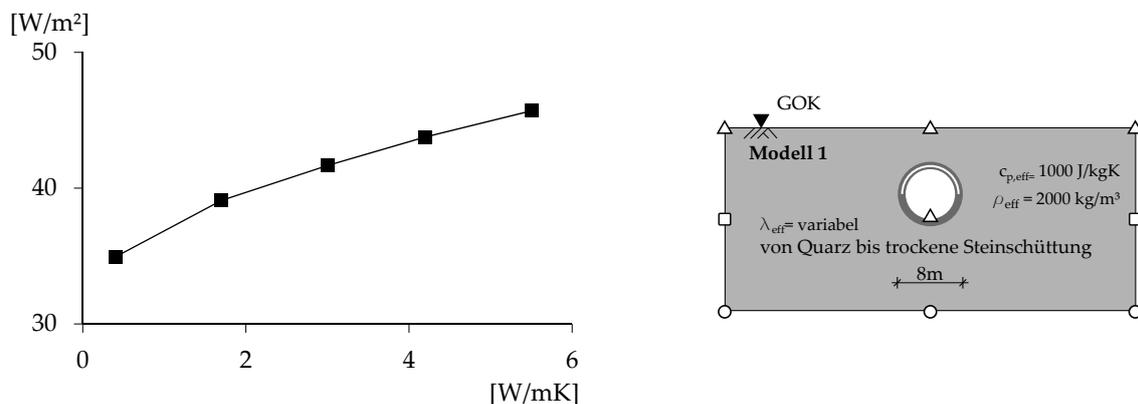


Abbildung 5.28: Änderung der mittleren Wärmestromdichte im Bereich des Absorbers unter Variation der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eff}$

### Wärmetransport im Mehrphasenmedium Boden

**Geologie** Zur Untersuchung des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eff}$  wurde diese im Bereich möglicher Wärmeleitfähigkeiten für Böden variiert. So beschreibt  $\lambda_{eff} = 0,4 \text{ W/mK}$  die Wärmeleitfähigkeit eines Kornhaufens aus trockenen Kiesen oder Steinen, der in der Natur in dieser Form allerdings eher selten anzutreffen sein wird. Der Maximalwert der Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{eff} = 5,5 \text{ W/mK}$  entspricht einem reinen Quarzit.

Die Abbildung 5.28 zeigt einen schwach nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der extrahierbaren Wärmestromdichte. Innerhalb der möglichen Spanne der Wärmeleitfähigkeit beträgt deren Einfluss bezogen auf die extrahierbare Wärmestromdichte ca. 30%. Untersuchungen zur Wärmekapazität des Untergrundes wurden für einen Bereich von  $550 - 1500 \text{ J/kgK}$  durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass die daraus resultierenden Unterschiede in der extrahierbaren Wärmestromdichte gering

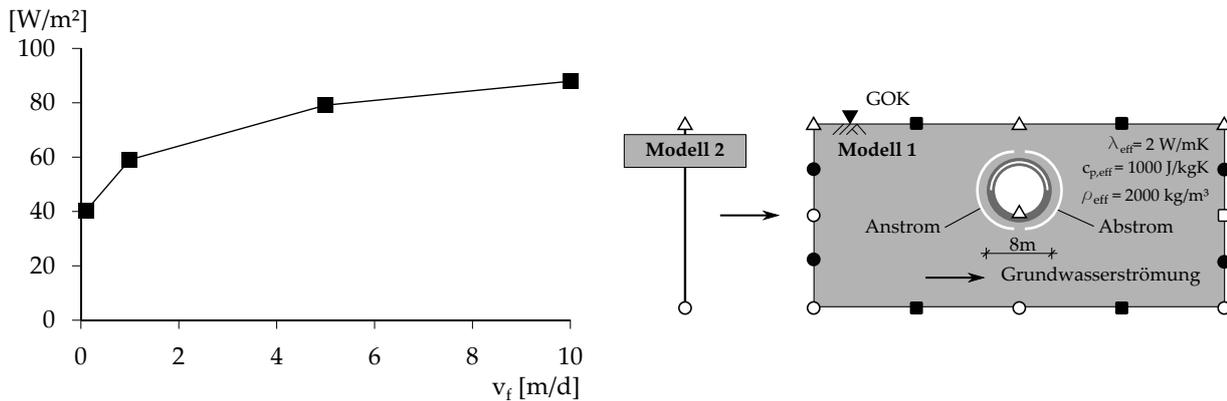


Abbildung 5.29: Änderung der mittleren Wärmestromdichte im Bereich des Absorbers mit zunehmender Filtergeschwindigkeit

sind und bei der Bewertung des thermischen Potentials einer TGTA vernachlässigt werden können.

**Grundwasser** Der konvektive Wärmetransport im Mehrphasenmedium Boden hat einen bedeutenden Einfluss auf die mögliche Entzugsleistung eines geothermischen Absorbers. Die Abbildung 5.29 zeigt einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Wärmestromdichte und der Filtergeschwindigkeit. Im Bereich kleiner Filtergeschwindigkeiten ( $v_f < 1,0 \text{ m/d}$ ) wirken sich kleine Änderungen der Filtergeschwindigkeit besonders stark auf die thermische Entzugsleistung aus. Vor dem Hintergrund von sich ändernden Strömungsverhältnissen in durchlässigen Böden im Nahbereich von Gewässern (vgl. Kapitel 4.4.2) ist bei der Planung einer TGTA hierauf ein besonderes Augenmerk zu richten. Die durchgeführte Parameterstudie zeigt, dass bei hohen Filtergeschwindigkeiten mit einer Verdoppelung der möglichen Entzugsleistung gerechnet werden kann.

Im Zusammenhang mit der Untersuchung der Filtergeschwindigkeit wurde auch die Lage des Absorbers bezogen auf die Anströmrichtung untersucht. Sowohl bei geringen als auch bei hohen Filtergeschwindigkeiten beeinflusst die Orientierung des Absorbers (vgl. Abb. 5.29) die Wärmeentzugsleistung nicht wesentlich. Hierbei spielt es aufgrund der symmetrischen Darcy-Geschwindigkeit um den Tunnel keine Rolle, ob der Absorber auf der An- oder der Abstromseite angeordnet wird. Lediglich eine Anordnung in der Firste führt bei hohen Filtergeschwindigkeiten zu einer um ca. 10% reduzierten Wärmestromdichte.

Infrastrukturunnel werden oftmals als Richtungstunnel mit zwei Röhren ausgeführt, bei denen es zu einer gegenseitigen thermischen Beeinflussung kommen kann. Dieser Einfluss wurde für einen Tunnel unter dem Einfluss von advektivem Wärmetransport im Boden für Filtergeschwindigkeiten von  $0,1 \text{ m/d} < v_f < 10 \text{ m/d}$  untersucht. Der Abstand der Tunnelachsen beträgt bei diesen Untersuchungen  $2 \cdot d$ . Die Simulationsergebnisse zeigen, dass dieser Abstand im Fall eines reinen konduktiven Wärmetransportes im Boden zu keiner gegenseitigen Beeinflussung führt.

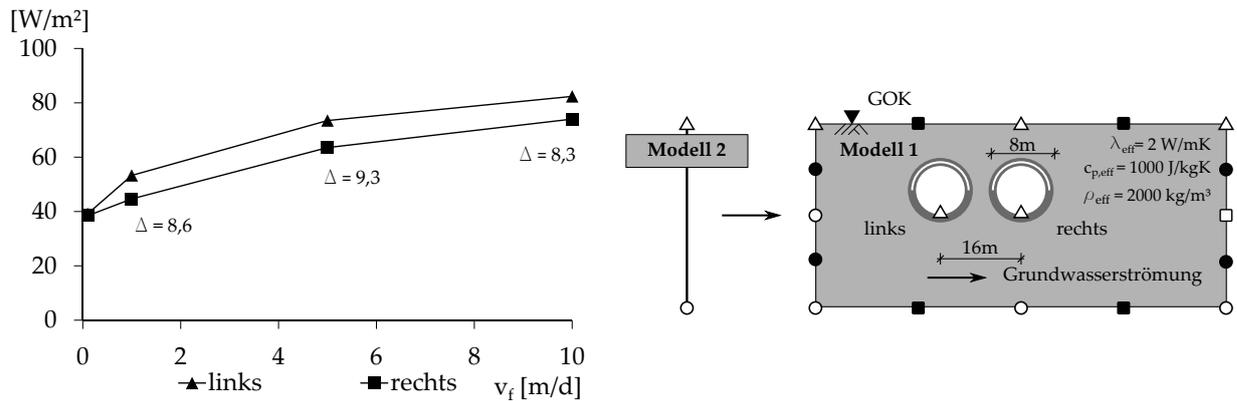


Abbildung 5.30: Änderung der mittleren Wärmestromdichte im Bereich des Absorbers mit zunehmender Filtergeschwindigkeit sowie die gegenseitige Beeinflussung zweier Tunnel

Wirkt eine Grundwasserströmung, ist die thermische Entzugsleistung der oberstromig liegenden Tunnelröhre grundsätzlich höher als die der unterstromig angeordneten Röhre (vgl. Abb. 5.30), wobei mit steigender Filtergeschwindigkeit ein Trend zu beobachten ist, der auch bei der Ausbreitung von Kältefahnen von Erdwärmesonden auftritt. So zeigt [95], dass mit zunehmender Filtergeschwindigkeit  $v_f$  die Länge der abstromigen Kältefahne zunächst zu und danach abnimmt. Somit vergrößert sich der Einfluss der linken Tunnelröhre auf die rechte Röhre zunächst, bevor der Einfluss mit zunehmender Filtergeschwindigkeit wieder abnimmt. Unter den betrachteten Randbedingungen beträgt der Unterschied in den extrahierbaren Wärmeströmen der beiden Tunnelröhren ca. 10-20%.

Die Untersuchungen in Kapitel 4.4.2 zeigen weiter, dass der Tunneldurchmesser im Zusammenspiel mit der Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers aufgrund der unterschiedlichen Kontaktzeiten  $t_c$  einen großen Einfluss auf die extrahierbare Wärmestromdichte hat. Zur Abschätzung dieses Einflusses wird auf die Gleichung 4.36 verwiesen. Durch die horizontale Anordnung des Wärmeübertragers im Aquifer wirkt sich anders als bei klassischen Geothermieabsorbern der Anströmwinkel auf die extrahierbare Wärmestromdichte aus (nähere Ausführung hierzu siehe Kapitel 4.4.2). Nach Auswertung der Gleichung 4.38 ist bei Anströmwinkeln  $\beta_{GW} < 60^\circ$  von einer Reduzierung der Wärmestromdichte zwischen 10 - 330% gegenüber der extrahierbaren Wärmestromdichte bei einer Senkrechtanströmung auszugehen.

**Tunneldurchmesser und Lage** Für die Untersuchungen des Einflusses des Tunneldurchmessers auf die Wärmeentzugsleistung einer TGTA wurde unter Beibehaltung aller sonstigen Parameter ausschließlich der Durchmesser variiert. Geänderte Strömungsverhältnisse innerhalb des Tunnelluftraumes wurden nicht dem neuen Tunnelquerschnitt angepasst. Des Weiteren gelten diese Untersuchungen ausschließlich für Tunnel die nicht in durchströmten Aquiferen angeordnet sind, der Wärmetransport im Boden also vorwiegend durch Wärmeleitung erfolgt. Vor dem Hintergrund, dass die im Rahmen dieser

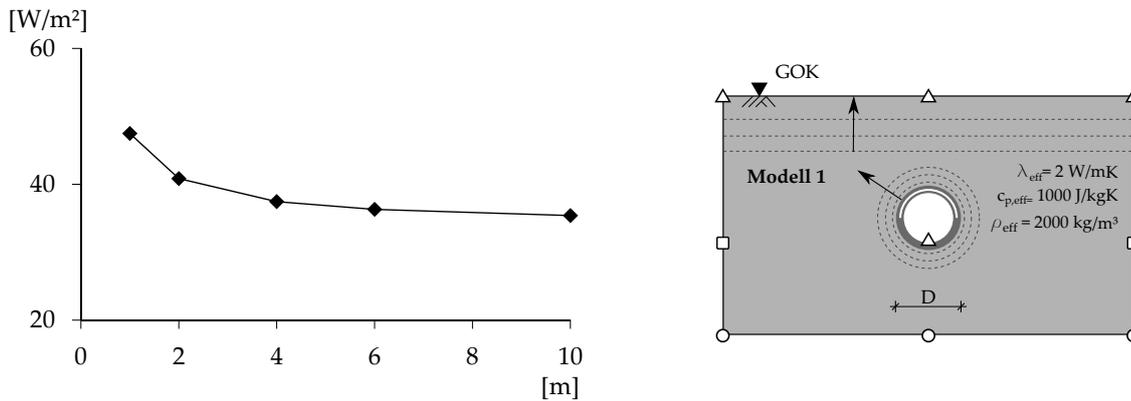


Abbildung 5.31: Änderung der mittleren Wärmestromdichte in Abhängigkeit des Tunneldurchmessers

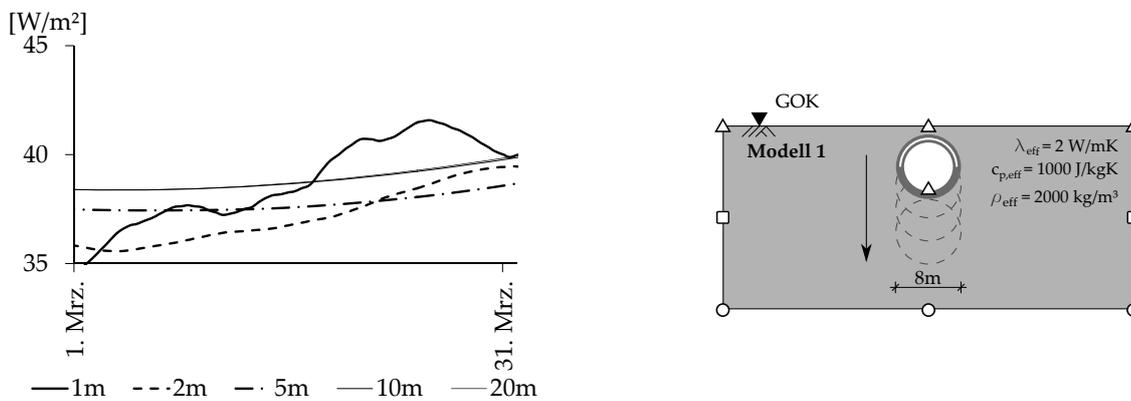


Abbildung 5.32: Änderung der mittleren Wärmestromdichte in Abhängigkeit der Tiefenlage einer TGTA exemplarisch für den Monat März, Kurven für 10 m und 20 m verlaufen nahezu deckungsgleich

Parameterstudie gezeigten Untersuchungen mit entsprechenden Adaptionen hinsichtlich des Luftraumklimas auf Abwasserkanäle und andere unterirdische Transportröhren übertragbar sind, wurden auch Tunnel kleinen Durchmessers in die Untersuchung einbezogen.

Die Abb. 5.31 zeigt, dass bei kleinen Tunneldurchmessern die bezogene Wärmestromdichte höher als bei großen Tunneldurchmessern ist (ca. 30% bezogen auf die untersuchte Bandbreite), der Effekt bei üblichen Infrastrukturtunneln allerdings vernachlässigt werden kann.

Die Überdeckung einer TGTA kann von wenigen Metern bis hin zu mehreren hundert Metern reichen. Die Untersuchungen zum Einfluss der Überdeckung auf die extrahierbaren Wärmeströme einer TGTA wurden im Rahmen dieser Arbeit auf den Bereich von 1 - 20 m beschränkt. Für weiterführende Untersuchungen zu den thermischen Verhältnissen bei tiefliegenden Tunneln, wie z.B. bei alpinen Basistunneln, wird an dieser Stelle auf [31] verwiesen.

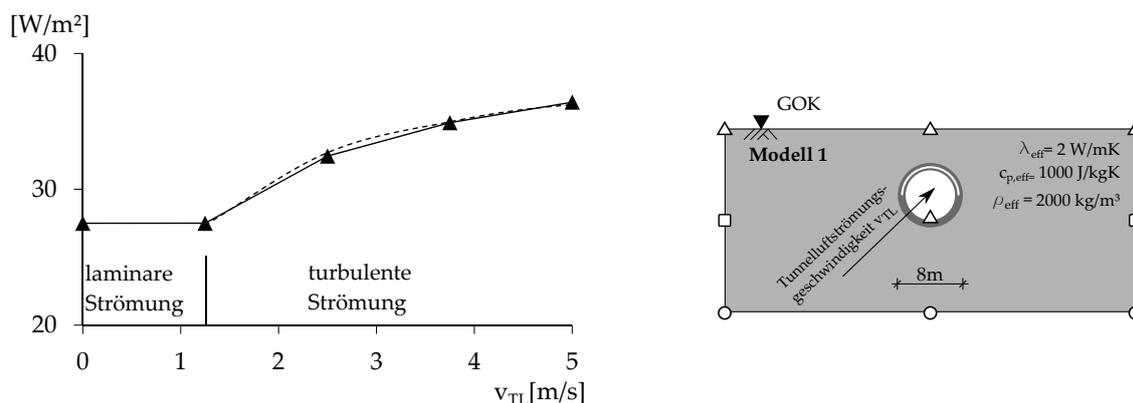


Abbildung 5.33: Änderung der mittleren Wärmestromdichte in Abhängigkeit der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit, gestrichelte Linie = Extrapolation

In Abb. 5.32 ist der Ausschnitt des Jahresganges der extrahierten Wärmestromdichte für den Monat März dargestellt. Liegt der Tunnel in einem Bereich von  $0 < t_{\text{tunnel}} < 2,0 \text{ m}$ , ist die Ganglinie der Wärmestromdichte durch die Wärmeströme an der GOK geprägt. Mit zunehmender Tiefe vergleichmäßigt sich der Wärmeentzug. Betrachtet man die über den Jahresgang gemittelte Wärmestromdichte, so ist diese von der Tiefenlage der TGTA kaum beeinflusst ( $< 5\%$  bezogen auf die untersuchten Tiefenstufen). Liegt der Tunnel unterhalb der SSZ, hat die Änderung der Tiefenlage auf die extrahierbare Wärmestromdichte keinen Einfluss mehr. Diese Aussage gilt nur für TGTA, die sich im geosolaren Bereich unterhalb der SSZ befinden. Mit zunehmender Tiefe wird die mögliche Entzugsleistung der TGTA entsprechend dem geothermischen Gradienten  $\Gamma$  zunehmen.

### Wärmetransport im Tunnelluftraum

**Tunnelluftströmung** Der Einfluss Strömungsgeschwindigkeit der Tunnelluft  $v_{TL}$  ist direkt an das Modell zur Beschreibung des Wärmeübergangs von der Tunnelluft zur Tunnelschale gekoppelt (vgl. Kapitel 4.5). Streng genommen zeigt die folgende Untersuchung den Einfluss des Gesamtzusammenhangs aus Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit und dem Modell zur Beschreibung des Wärmeübergangs. Das ist auch der Grund, warum in Abbildung 5.33 zunächst keine Änderung der Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit erkennbar ist. Zur Veranschaulichung wurde der laminare Bereich mit konstanter  $Nu_L$ -Zahl entsprechend vergrößert. Im turbulenten Strömungszustand nimmt der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die extrahierbare Wärmestromdichte mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Die Extrapolation der durchgeführten Berechnungen zeigt eine Zunahme der Wärmestromdichte bis zu einer Luftströmungsgeschwindigkeit von ca. 10  $\text{m/s}$  (in Abb. 5.33 nicht dargestellt). Dies liegt im Bereich maximal möglicher Tunnelluftströmungsgeschwindigkeiten. Mit verbessertem Wärmeübergang von der Tunnelluft zur Tunnelschale nimmt die Wärmestromdichte um ca. 33% bezogen auf die untersuchten Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0 - 5  $\text{m/s}$  zu.

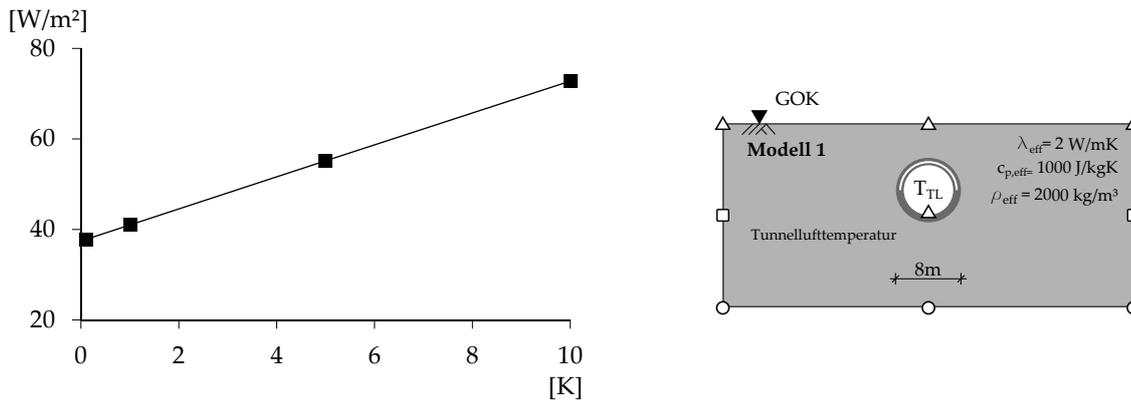


Abbildung 5.34: Änderung der mittleren Wärmestromdichte in Abhängigkeit der Tunnellufttemperatur

**Tunnellufttemperatur** Neben der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit hat die Tunnellufttemperatur einen maßgeblichen Einfluss auf das tunnelthermische Potential einer TGTA. Zur Untersuchung des Einflusses der absoluten Tunnellufttemperatur auf die Wärmeentzugsleistung einer TGTA, wurde die Temperaturganglinie in ihrer Lage verschoben, so dass über den gesamten Jahresgang entsprechend höhere bzw. tiefere Tunnellufttemperaturen simuliert wurden.

Die Abb. 5.34 zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen der Wärmestromdichte und der Temperatursteigerung von  $3,5 \text{ W/m}^2 \cdot 1 \text{ K}^{-1}$ .

### Wärmetransport im Absorbersystem

**Betrieb** Beim Betrieb einer Geothermieanlage wird die Frage nach der Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf vor dem Hintergrund einer möglichen Frostschädigung der Bauteile oder der Kontaktzone zwischen Geothermieabsorber und umgebenden Boden kontrovers diskutiert. Durch die Vergrößerung der Temperaturspreizung zwischen der Absorberrtemperatur und dem Boden bzw. dem Tunnelklima steigt die extrahierbare Wärmestromdichte an. Nähert sich die Absorberrtemperatur hingegen der ungestörten Untergrundtemperatur bzw. der mittleren Tunnellufttemperatur, nimmt das geothermische Potential einer TGTA ab.

Die Untersuchungen zur Absorberrtemperatur (siehe Abb. 5.35) zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen der mittleren Absorberrtemperatur und dem extrahierbaren Wärmestrom. Mit der Änderung der Absorberrtemperatur um 1K ändert sich die Wärmestromdichte um ca.  $3,8 \text{ W/m}^2$ .

Neben der Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf ist der Volumenstrom  $\dot{V}$  die zweite Regelgröße. Mit der Erhöhung der Fließgeschwindigkeit verbessert sich der Wärmeübergang von der inneren Rohrwandung an das Fluid, gleichzeitig steigt durch eine Zunahme der Rohrreibung der Druckverlust. Vor diesem Hintergrund ist bei der Auslegung eines Geothermieabsorbers das Optimum aus Wärmeentzug und Pumpleistung zu suchen. Die Untersuchungen zum Einfluss des Strömungszustandes in den Absor-

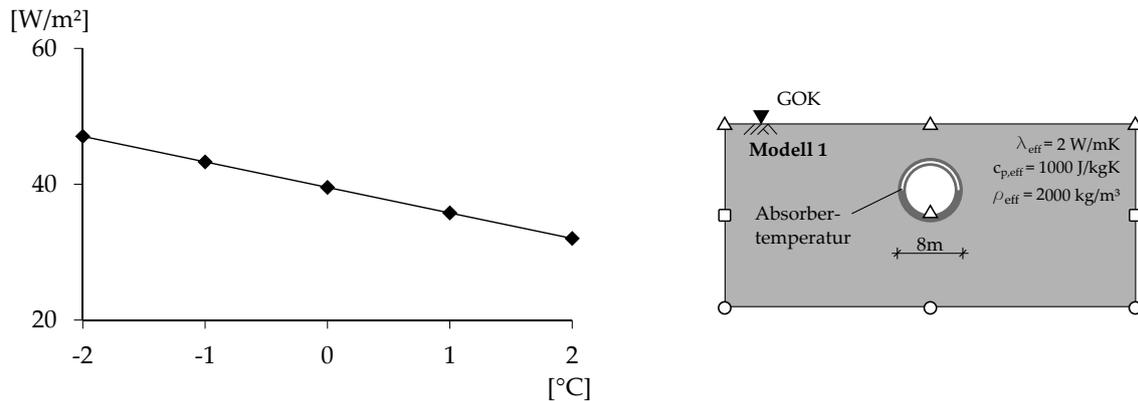


Abbildung 5.35: Änderung der mittleren Wärmestromdichte in Abhängigkeit der Absorbertemperatur

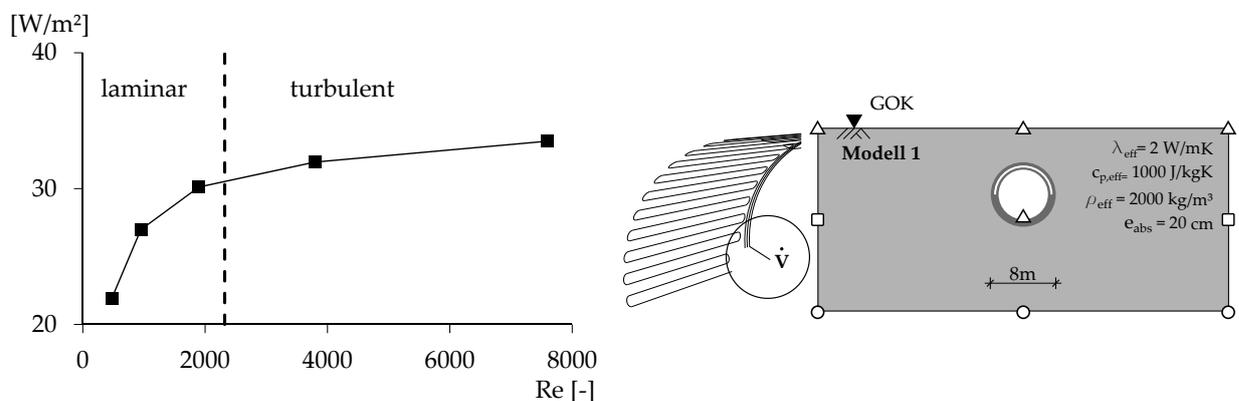


Abbildung 5.36: Änderung der mittleren Wärmestromdichte des Volumenstroms ( $Re_L$ -Zahl) in den Absorberrohrleitungen

berrohrleitungen werden auf der Basis eines dreidimensionalen Berechnungsmodells durchgeführt, das dem zweidimensionalen Berechnungsgebiet entspricht (vgl. Kapitel 5.3).

Die Abbildung 5.36 zeigt den Zusammenhang zwischen der extrahierbaren Wärmestromdichte und dem Volumenstrom innerhalb der Absorberrohrleitungen, ausgedrückt über die  $Re_L$ -Zahl. Während sich im Bereich eines laminaren Strömungszustandes eine hochgradig nichtlineare Abhängigkeit zwischen der extrahierbaren Wärmestromdichte und dem Volumenstrom zeigt, führt eine Volumenstromzunahme im turbulenten Strömungsbereich zu keiner wesentlichen Erhöhung der Wärmestromdichte.

**Geometrie** Eine TGTA nutzt sowohl Wärmeströme aus dem Untergrund als auch aus dem Tunnelluftraum. Die radiale Anordnung der Absorberleitungen innerhalb der Tunnelschale entscheidet folglich darüber, ob die TGTA im Wesentlichen direkt an den Tunnelluftraum gekoppelt ist und somit wenig Speichereffekte nutzt, oder vorwiegend Wärmeströme aus dem Erdreich nutzt und die Wärmekapazität der Tunnelschale und

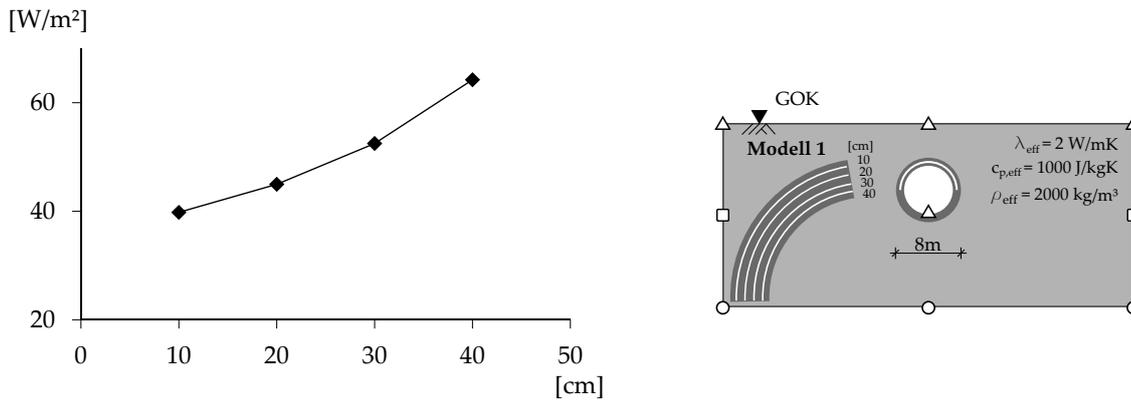


Abbildung 5.37: Änderung der mittleren Wärmestromdichte in Abhängigkeit der radialen Anordnung des Absorbers mit Bezug zur erdseitigen Außenkante der Tunnelschale

des Bodens aktiviert. Vor diesem Hintergrund wurde die radiale Lage des Absorbers innerhalb der Tunnelschale in 10 cm-Schritten variiert. Hierbei wurde sowohl luft- wie auch erdseitig eine Betondeckung von 10 cm berücksichtigt.

Das Ergebnis der Simulation zeigt eine nichtlineare Abhängigkeit zwischen der Lage des Absorbers in der Tunnelschale und der extrahierbaren Wärmestromdichte. Unter der Berücksichtigung der gewählten Betondeckung ist durch die Anordnung der Absorber nahe der Tunnelluft für die gewählten Randbedingung eine Steigerung der Wärmestromdichte von ca. 75% gegenüber der Anordnung nahe des Erdreichs möglich.

Einen weiteren Freiheitsgrad bei der Auslegung eines Tunnelgeothermieabsorbers bietet die Ausbildung der Rohrleitungsführung innerhalb der Tunnelschale. In diesem Zusammenhang wird zunächst der Rohrschenkelabstandes untersucht. Die Wahl eines großen Rohrschenkelabstand führt zu einer Reduktion von Material- und Installationskosten sowie zu einem möglichst geringen Druckverlust. Demgegenüber steht die Abnahme der extrahierbaren Wärmestromdichte durch eine variierende Temperaturverteilung innerhalb des Schalenbetons.

Die Simulationsergebnisse zur Variation des Rohrschenkelabstandes (siehe Abb. 5.38) zwischen 10-30 cm zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen der extrahierbaren Wärmeenergie und dem Schenkelabstand der Rohrleitungen. Mit der Vergrößerung des Schenkelabstandes von 10 cm geht eine Abnahme der extrahierbaren Wärmestromdichte von ca. 8% einher. Die Abbildung 5.38 zeigt darüber hinaus die nicht linearen Zusammenhänge zwischen der Rohrleitungslänge und dem Schenkelabstand und dem daraus resultierenden Druckverlust. Für beide gilt, dass sich bei einer Vergrößerung des Schenkelabstandes von 10 cm auf 30 cm die Leitungslänge  $l$  und der Druckverlust  $\Delta p$  um den Faktor von ca. 3 reduzieren.

Zur Ausrüstung einer TGTA existieren am Markt unterschiedliche Rohrmaterialien unterschiedlichen Durchmessers. Grundsätzlich ist zur Reduktion des Druckverlustes ein möglichst großer Rohrrinnendurchmesser zu wählen. Soll zur Steigerung der extrahierbaren Wärmestromdichte ein enger Rohrschenkelabstand gewählt werden, wird

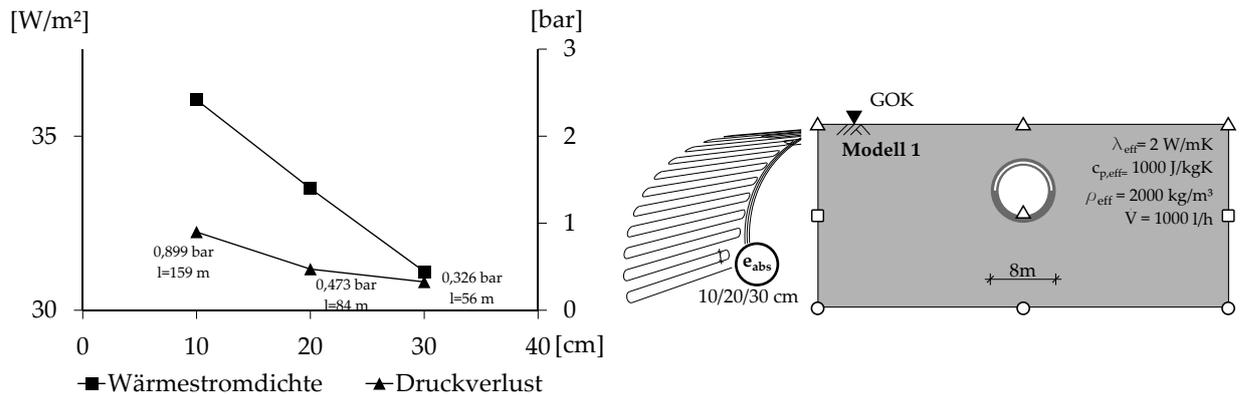


Abbildung 5.38: Änderung der mittleren Wärmestromdichte in Abhängigkeit des Schenkelabstandes  $e_{abs}$  der Absorberrohrleitungen

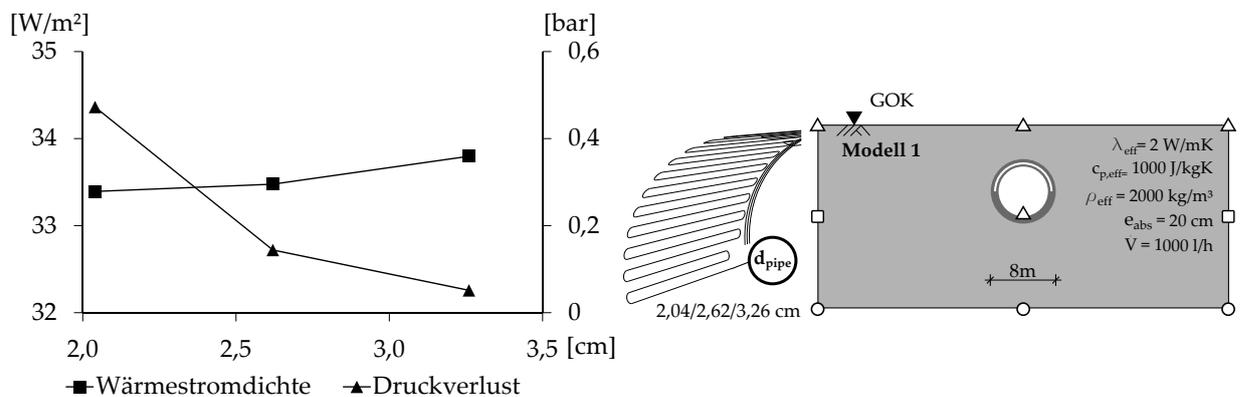


Abbildung 5.39: Änderung der mittleren Wärmestromdichte und des Druckverlustes in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers  $d_{pipe}$  der Absorberrohrleitungen

der maximal mögliche Rohrdurchmesser durch den Mindestbiegeradius der Rohrleitung begrenzt. Im Rahmen dieser Parameterstudie werden die Rohrdurchmesser 2,04 / 2,62 / 3,26 cm untersucht. Die gewählten Durchmesser repräsentieren die gängigsten verfügbaren Rohrtypen für Anwendungen aus dem Bereich der thermischen Bauteilaktivierung.

Das Diagramm in Abbildung 5.39 zeigt die extrahierbare Wärmestromdichte sowie den errechneten Druckverlust in Abhängigkeit des simulierten Rohrdurchmessers.

Die Länge eines Absorberkreislaufes beträgt hierbei ca. 84 m. Während der Rohrdurchmesser  $d_{pipe}$  einen vernachlässigbaren Einfluss auf die extrahierbare Wärmestromdichte hat, macht sich dieser in der Änderung des Druckverlustes deutlich bemerkbar. Zur Veranschaulichung des Druckverlustes wird dieser gemäß der Gleichung 5.16 in eine erforderliche Wellenleistung überführt.

$$P_{Welle} = \frac{\rho \cdot g \cdot \dot{V} \cdot \Delta h}{\eta} \quad (5.16)$$

Unter Berücksichtigung eines Pumpenwirkungsgrades  $\eta = 0,5$  liegt die erforderliche Leistung an der Pumpenwelle für  $d = 3,26$  cm bei 2,8 W, für den kleinsten Durchmesser von  $d = 2,04$  cm bei 25,8 W, also ca. um den Faktor 11 höher.

**Zusammenfassende Bewertung** Im Zuge der Parameterstudie wurden der Einfluss von Änderungen der thermischen, hydraulischen und geometrischen Randbedingungen auf das thermische Potential einer TGTA wie auch auf den Druckverlust des Primärkreislaufes untersucht. Die Abbildung 5.40 soll am Beginn der Planungsphase einer TGTA dazu dienen, den erforderlichen Variationsumfang möglicher Faktoren auf wesentliche Einflussfaktoren zu reduzieren.

Durch den Umstand, dass die untersuchten Einflussfaktoren hinsichtlich ihrer möglichen Bandbreite eine gänzlich unterschiedliche Charakteristik aufweisen, ist eine einheitliche Gewichtung dieser nicht möglich. Deutlich wird dies bei dem Vergleich der Parameter Wärmeleitfähigkeit des Bodens mit dem Parameter Absorbtemperatur. Während die Wärmeleitfähigkeit nur zwischen den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Grenzen für einen trockenen Kornhaufen und einem Quarzit variieren kann, unterliegt die Absorbtemperatur theoretisch keiner Limitation. Um zu einer aussagekräftigen Darstellung der Einflussparameter auf das thermische Potential einer TGTA zu kommen, wird die Streubreite der einzelnen Einflussparameter auf eine Referenzwärme­stromdichte von  $40 \text{ W/m}^2$  bezogen. Dies entspricht in etwa der Wärmestromdichte des untersuchten Basismodells. Hierdurch ergeben sich prozentuale Abweichungen gegenüber dem Referenzmodell, die zwischen 0 und 120% liegen. Die Bewertung der Parameter erfolgt in 3 Stufen:

- Stufe 1: 0 - 20%
- Stufe 2: 20 - 45%
- Stufe 3: 45 - 120%

Einige der Einflussparameter wurden im Zuge der Parametervariation nicht untersucht. Für diese wurde der Einfluss auf die extrahierbare Wärmestromdichte abgeschätzt. Zur Bewertung der Einflüsse aus den Wärmeübergängen vom Aquifer bzw. dem Tunnel­luft­raum zur Tunnelwand, wie auch dem Einfluss aus dem Wärmeeintrag durch den Verkehr innerhalb des Tunnels sind weitere physikalische Versuche durchzuführen.

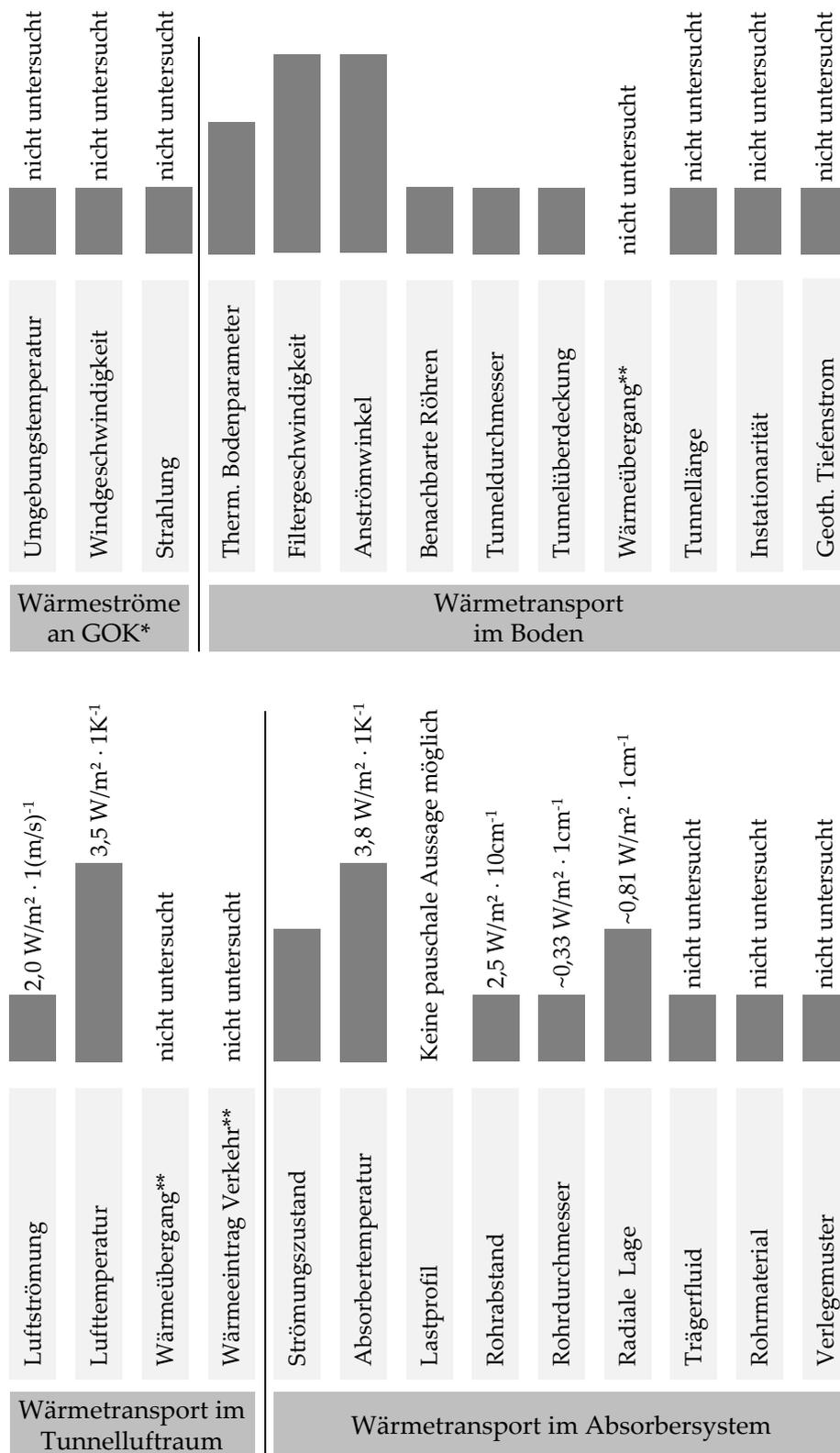


Abbildung 5.40: Zusammenschau der Einflüsse auf die extrahierbare Wärmestromdichte  $\dot{q}$  einer TGTA, \*relevant für Tunnel in der solaren Speicherzone, \*\*weitere physikalische Versuche erforderlich

## 5.4.2 Transiente Kopplung an eine Gebäudesimulation

Zur Beurteilung der Gesamteffizienz einer TGTA ist die Bilanzgrenze 1 gemäß Abbildung 2.2 zu berücksichtigen. Hierzu wurde das Simulationsmodell der TGTA des Tunnels Stuttgart-Fasanenhof (siehe Abb. 5.11) über die in Abbildung 4.37 gezeigte Kopplung an die Simulationsumgebung TRNSYS gekoppelt, in der der Wärme- und Kältebedarf eines Bürogebäudes für einen Jahresgang simuliert wird. Die Erstellung des gebäudeseitigen Simulationsmodells erfolgte durch das Institut für Gebäudeenergetik der Universität Stuttgart und wird im Folgenden kurz beschrieben.

Das Gebäudemodell in TRNSYS repräsentiert ein eingeschossiges Bürogebäude mit der in Abbildung 5.41 gezeigten Grundriss.

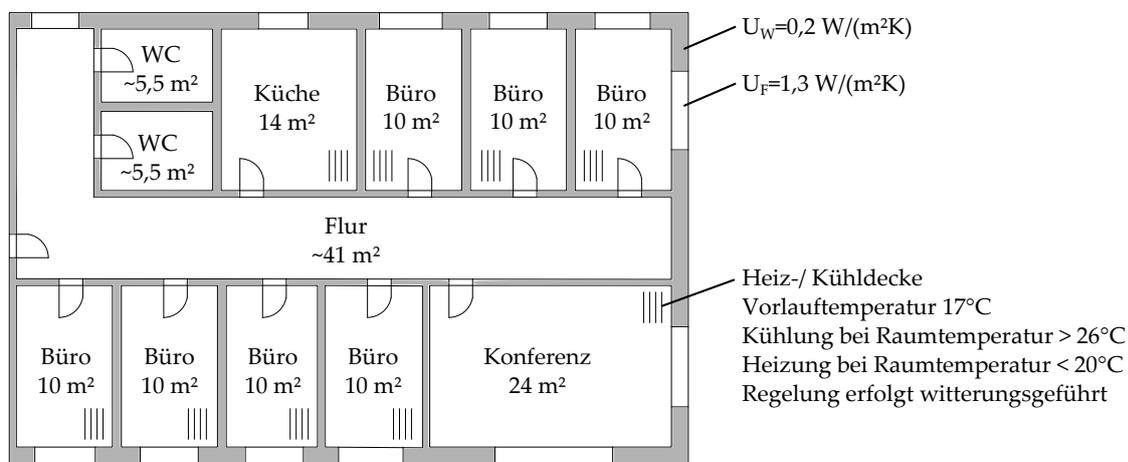


Abbildung 5.41: Grundriss des Gebäudemodells in TRNSYS

Die Wärmelast je Büroraum basiert auf der Anwesenheit einer Person sowie der Abwärme aus der Beleuchtung sowie eines Personalcomputers. Der Konferenzraum sowie die Küche werden während der Arbeitszeiten jeweils von einer variierenden Personenanzahl genutzt. Das Bürogebäude verfügt neben den in Abbildung 5.41 gezeigten kombinierten Heiz- und Kühldecken über eine haustechnische Ausrüstung gemäß Abbildung 5.42.

Im Heizbetrieb dient eine Wärmepumpe dem Temperaturhub der Absorbiertemperatur aus der TGTA auf das erforderliche Niveau zur Versorgung des Bürogebäudes mit Wärmeenergie. Mit der aus dem Tunnel extrahierten Wärmeenergie wird zunächst ein Schichtspeicher beladen, der die zeitlich verzögerte Wärmeversorgung des Bürogebäudes übernimmt. Die Deckung des vorhandenen Kühlbedarfs erfolgt aufgrund des geringen Temperaturniveaus aus der TGTA direkt und wird ggf. durch einen zusätzlichen Kühler unterstützt.

Die Berechnungen werden für einen konstanten Volumenstrom von  $5001/\text{h}$  je Absorbierkreislauf der TGTA durchgeführt, was einer schwach turbulenten Strömung innerhalb der Rohrleitungen entspricht. Als minimale Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf wird eine Temperatur von  $0^\circ\text{C}$  berücksichtigt, so dass ein Phasenwechsel im anstehenden Untergrund ausgeschlossen werden kann. Um der gekoppelten Simulation ein möglichst realitätsnahes Temperaturfeld im Boden sowie der Tunnelschale zu Grunde

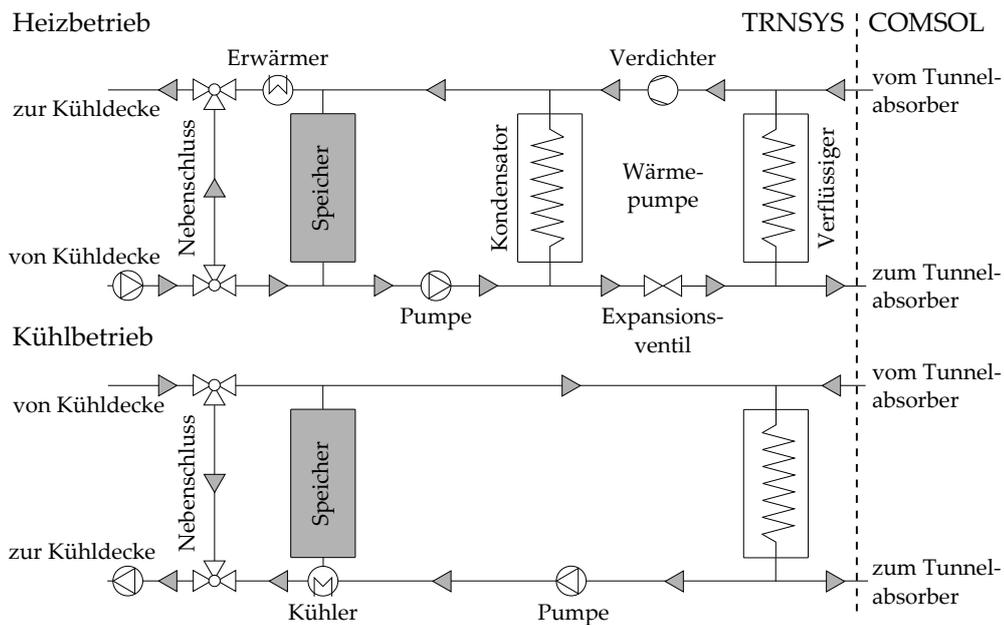


Abbildung 5.42: Schematische Darstellung der Haustechnikkomponenten

zu legen, wurde das Simulationsmodell der TGTA des Tunnels Stuttgart-Fasanenhof zunächst über den Zeitraum von einem Jahr ohne Anlagenbetrieb simuliert. Die Abbildung 5.43 links zeigt das Wärme- bzw. Kältebedarfsprofil der im Gebäudemodell berücksichtigten Kühl-/Heizdecken über den Verlauf eines Simulationszeitraums von einem Jahr. Der Energiebedarf des Bürogebäudes ist über einen Schichtspeicher mit dem Primärkreislauf der TGTA gekoppelt, so dass die Aktivierung der TGTA nicht unmittelbar dem gebäudeseitigen Energiebedarf folgt.

Die Abbildung 5.43 rechts zeigt den einhüllenden Temperaturverlauf ausgehend von der Ulme des Tunnels innerhalb des Bodens. Am Übergang vom Tunnel zum Boden treten für den Kühlfall 1 K höhere Temperaturen gegenüber dem initialen Temperaturfeld ohne tunnelgeothermischen Betrieb auf, für den Heizfall beträgt die Temperaturredukti-

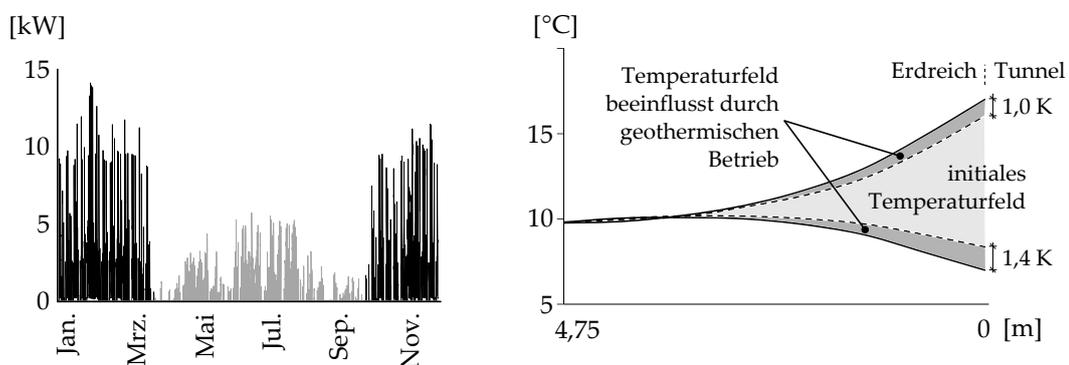


Abbildung 5.43: links: Energiebedarfsprofil für die Lastfälle Heizen (schwarz)/Kühlen (grau), rechts: Simulationsergebnis der einhüllenden Baugrundtemperaturen über den Simulationszeitraum

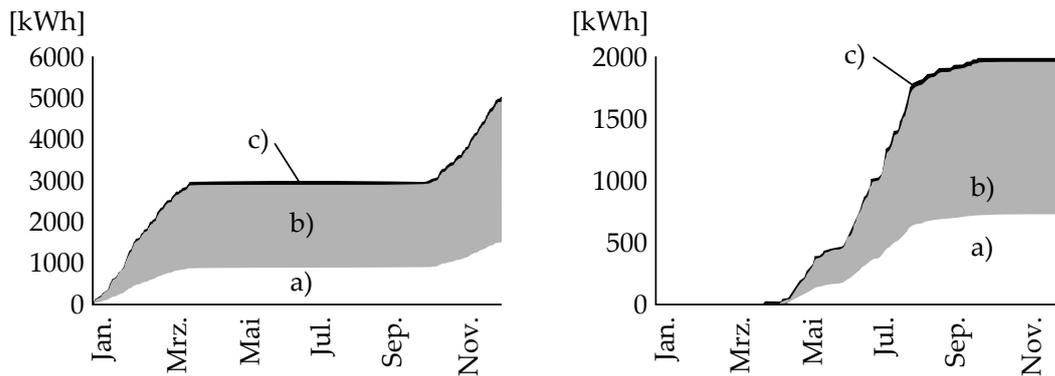


Abbildung 5.44: Akkumulierte Energieversorgung a) Wärmepumpe (WP), b) TGTA (Abs), c) Kühler/Erwärmer (Ex), links: Heizenergie (h), rechts: Kühlenergie (k)

on ca. 1,5 K. Der Ausbreitungsradius der Temperaturkorona um den Tunnel wird durch die thermische Aktivierung der Tunnelschale nicht vergrößert. Die Abbildung 5.44 zeigt die durch die Gebäudetechnik zur Verfügung gestellte Heiz- bzw. Kühlenergie akkumuliert über den Simulationszeitraum getrennt nach den Anteilen der Energiequellen a) Wärmepumpe, b) TGTA und c) zusätzliche Wärmequelle zur Deckung des Gesamtenergiebedarfs.

Für den Heiz- bzw. den Kühlzeitraum lassen sich auf der Basis der in Abbildung 5.44 dargestellten kumulierten Energiebedarfe getrennte JAZs für die jeweiligen Zeiträume bilden. Hierbei werden die hydraulischen Druckverluste für den Primär- und den Sekundärkreislauf vernachlässigt.

$$JAZ_{h/k} = \frac{\dot{Q}_{WP} + \dot{Q}_{Abs} + \dot{Q}_{Ex}}{P_{el,WP} + P_{el,Ex}} \quad (5.17)$$

$$JAZ_h = 3,2 \quad JAZ_k = 2,7$$

In [16] wurde die Effizienz von 16 unterschiedlichen realen Wärmepumpennutzungen nach zweijährigem Betrieb untersucht. Die Anlagen versorgen überwiegend kompakt gebaute Gebäude, die energetisch optimiert sind und mindestens den KfW Standard 55 erfüllen. Untersucht wurden 6 Luft/Wasser-, 8 Sole/Wasser- und 2 Wasser/Wasser-Wärmepumpen. Für einen Bilanzraum bestehend aus dem Wärmepumpenkreislauf sowie dem Primärkreislauf ergeben sich eine mittlere Jahresarbeitszahl von 2,6 für Luft/Wasser-Wärmepumpen und 3,2 für Sole/Wasser-Wärmepumpen. Verglichen mit den hier durchgeführten Berechnungen liegt die JAZ für den Heizbetrieb in der Größenordnung der Sole/Wasser-Wärmepumpen. Die JAZ für den Kühlbetrieb ist nicht direkt mit den Ergebnissen aus [16] vergleichbar. Nach dem Gesetz zur Förderung erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz - EEWärmeG) wird für Wärmepumpen eine JAZ von mindestens 3,8 gefordert, die bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht erreicht werden konnte.

Gründe hierfür sind neben der ungenauen Definition der Bilanzierungsgrenzen vor allem in der Regelung der Anlagentechnik zu suchen.

### 5.4.3 Nutzung der extrahierten Energie im Tunnelnahbereich

Die Entscheidung zur Ausrüstung von Tunneln mit Absorbertechnik zur Extraktion von Kälte- und/oder Wärmeenergie scheidet zum Teil an der Frage, wie die extrahierte Energie genutzt werden kann. Liegt ein Tunnel außerhalb eines urbanen Umfeldes, schließt die örtliche Entfernung zu potentiellen Energieabnehmern eine klassische Versorgung im Sinne eines kalten Nahwärmenetzes oftmals aus. Darüber hinaus existieren bis dato keine Konzepte zur kaufmännischen und rechtlichen Ausbildung der Schnittstelle zwischen dem Tunnelbetreiber als Energielieferant und der Nutzerseite. Dies stellt, wie die Erfahrungen aus den Projekten Tunnel Stuttgart-Fasanenhof und Tunnel Jenbach belegen, eine entsprechende Hemmschwelle im Zuge der Projektierung einer TGTA dar. Dieses Kapitel betrachtet zwei potentielle Anwendungen, die in der Sphäre des Tunnelbetreibers liegen und für Straßentunnel in Mitteleuropa einen wirtschaftlich und ökologischen Nutzen versprechen.

Zum einen steigt mit der zunehmenden Digitalisierung und Steuerung von Straßentunneln der Bedarf an der kontinuierlichen Kühlung der Tunnelbetriebsräume. Die Deckung der entstehenden Kühllast erfolgt üblicherweise durch die Anordnung eines entsprechenden Klimagerätes. Zum anderen existieren an den Tunnelportalen, vor den Tunnelbetriebsräumen sowie im Bereich von Rettungswegen kleinteilige Flächen, die eine händische Schnee- und Eisfreihaltung erforderlich machen. Durch die Temperierung dieser Flächen kann eine kontinuierliche Schnee- und Eisfreiheit hergestellt werden, die zur Erhöhung der Betriebssicherheit und ggf. zu einer Reduktion der Unterhaltskosten führt. Für beide Anwendungen bietet sich der Einsatz der Tunnelgeothermie an. Untersucht wurden diese Anwendungen im Zuge der Erstellung einer Machbarkeitsstudie zur geothermischen Ausrüstung der Straßentunnel Himmelschleife und Drackenstein im Zuge des Ausbaus des Altbauaufstiegs, Bundesautobahn 8, Baden-Württemberg. Hierzu wurde die Schnee- und Eisfreihaltung für die an die Tunnel anschließenden Brückenoberflächen untersucht, da diese im Gegensatz zu erdgebundenen Fahrbahnen verstärkt zu Glättebildung neigen.

**Berechnungsgrundlagen** Die Grundlage zur Beurteilung des thermischen Potentials der untersuchten Tunnel bilden zwei zweidimensionale Berechnungsmodelle, bei denen lediglich die jeweiligen Festkörperstrukturen (Boden, Tunnelschale, Brückenquerschnitt) räumlich diskretisiert werden und die Abbildung der klimatischen Einflüsse durch das Ansetzen entsprechender Randbedingungen erfolgt. Hierdurch genügt die Lösung des Temperaturfeldes ausschließlich auf der Basis des Wärmetransportes durch Wärmeleitung.

Das Modell Tunnel repräsentiert eine geschlossene TGTA als zweidimensionales Simulationsmodell. Die Straßentunnel Himmelschleife und Drackenstein liegen in der Formation des Weißjura (Kalkmergel und Mergel) z.T. unterhalb des Bergwasserspiegels, für den keine gerichtete Grundwasserströmung bekannt ist. Der die Tunnel umge-

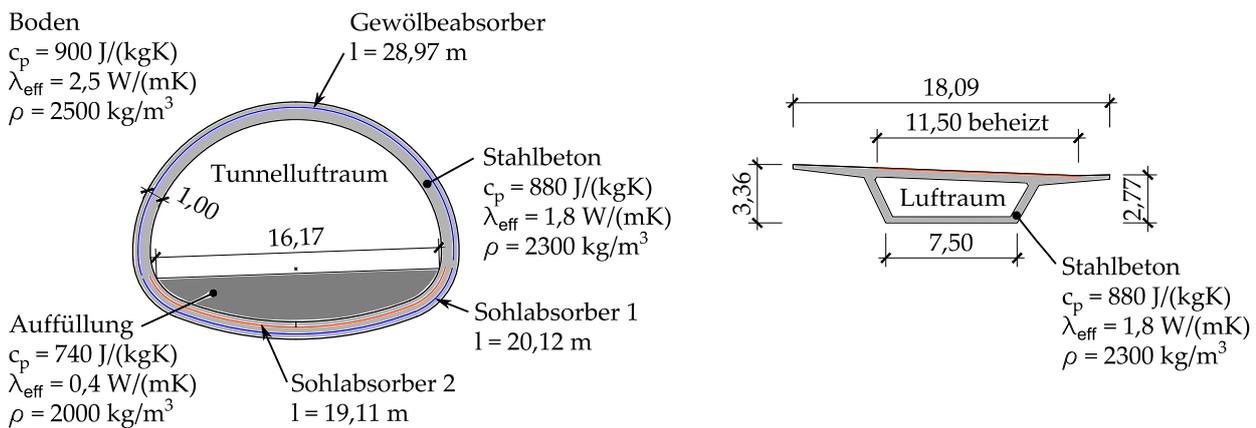


Abbildung 5.45: Berechnungsmodelle Alaufstieg, links: Modell Tunnel, rechts: Modell Talbrücke

bene Untergrund wurde daher lediglich für Wärmetransport durch Wärmeleitung modelliert. Im Bereich der Tunnelsohle wird eine Auffüllung berücksichtigt, deren thermische Eigenschaften denen eines trockenen Kieses entsprechen. Der Grundgedanke zur Wahl eines schlecht thermisch leitfähigen Materials geht zum einen auf die Annahme zurück, dass die Sohle aus gebrochenem, trockenem Material aufgebaut wird und keine Möglichkeit der Wasseraufsättigung besteht. Zum anderen wird hierdurch unterhalb der späteren Fahrbahn die Möglichkeit eines thermischen Speichers (Sohlspeicher) geschaffen, um das geothermische Potential der Tunnelgeothermieanlage zu steigern. Innerhalb der Tunnelschale zeigt die Abbildung 5.45 drei getrennte Absorberkreisläufe, die durch eine Wärmestromrandbedingung bzw. durch eine Temperaturrandbedingung abgebildet werden. Der Absorber im Bereich des Tunnelluftraumes (Gewölbeabsorber) dient im Wesentlichen der Energieextraktion aus dem Tunnelklima bzw. dem umgebenden Erdreich. Im Bereich der Tunnelsohle berücksichtigt das Simulationsmodell zwei getrennte Absorber, von denen ein Absorber zwischen der Innen- und der Außenschale angeordnet ist, der andere mit einer Betondeckung von ca. 30 cm unterhalb der Auffüllung liegt. Der Sohlabsorber 1 dient der Energieextraktion aus dem Sohl Speicher und damit als Energielieferant für die Brückenheizung. Der Sohlabsorber 2 wird durch den Gewölbeabsorber mit Wärmeenergie versorgt, wenn die Temperatur im Bereich der Tunnelsohle geringer als die des Tunnelluftraumes ist. Es erfolgt in diesem Fall eine Einspeicherung von Wärmeenergie aus dem Tunnelklima in den Sohl Speicher.

Das Modell Brücke repräsentiert den geplanten Brückenquerschnitt der Talbrücken. Innerhalb des Luftraumes sowie der Betonstruktur wird das Temperaturfeld in Abhängigkeit der an den Brückenrändern wirkenden klimatischen Randbedingungen berechnet. Die Abbildung 5.46 zeigt den betrachteten Brückenquerschnitt unter Angabe der entsprechend wirkenden Wärmeströme.

Das Aufprägen der Heizenergie im Bereich der zu temperierenden Fahrfläche erfolgt durch Einführung einer inneren Wärmestromrandbedingung. Hierzu ist auf der Breite von 11,5 m (vgl. Abb. 5.45) in einem Abstand von 5 cm unter der Oberkante der Fahrbahn eine entsprechende Geometrie innerhalb des Brückenquerschnitts angeordnet.

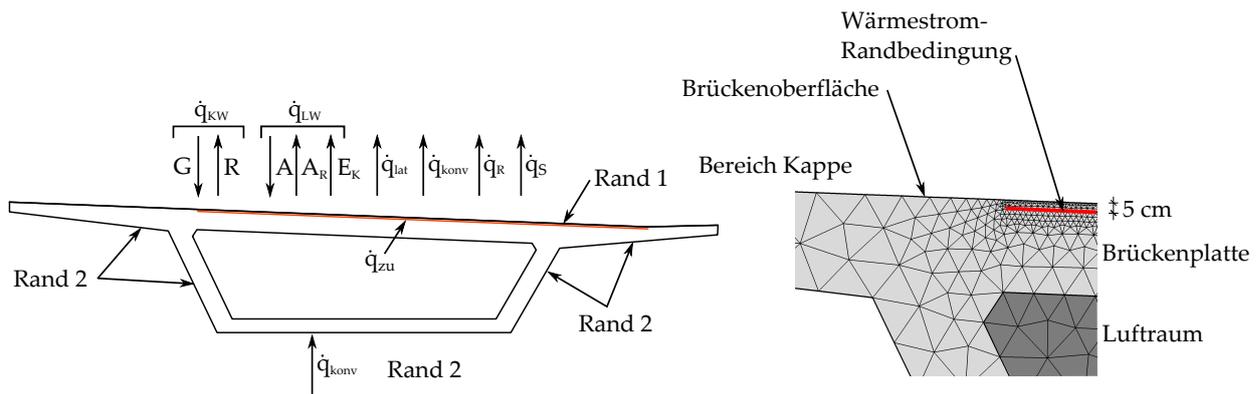


Abbildung 5.46: links: Berücksichtigte Wärmestrome am Berechnungsmodell Brücke, rechts: Detaildarstellung Berechnungsnetz und Anordnung Wärmestromrandbedingung

Das geothermische Potential einer TGTA hängt neben den thermischen Eigenschaften des umgebenden Bodens und des Tunnelklimas auch vom Betrieb der Anlage ab. So können durch einen Intervallbetrieb kurzzeitig höhere Wärmestromdichten erzielt werden, als wenn die Anlage in einem Langzeitbetrieb gefahren wird. Der Grund hierfür liegt in der Regeneration der Anlage über die Rückführung von Wärmeenergie an den Absorber, wenn die Anlage nicht in Betrieb ist. Eine realitätsnahe Abbildung des Betriebs der TGTA ist folglich die Grundvoraussetzung zur Abschätzung der extrahierbaren Wärmeenergie.

Der Wärmebedarf zum Betrieb einer Schnee- und Eisfreihaltung ist direkt an die klimatischen Verhältnisse vor Ort gekoppelt und unterliegt einer hohen zeitlichen Varianz. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wird eine Kopplung der Simulationsmodelle Tunnel und Brücke eingeführt, die es ermöglicht, das Energiebedarfsprofil der Straßenbrücke direkt an die TGTA zu koppeln, um so einen möglichst realistischen Betrieb der Tunnelabsorber zu simulieren. Der Betrieb der Brückenheizung beruht auf zwei Betriebsbedingungen. Zum einen ist sicherzustellen, dass im Falle eines Niederschlages in Form von Eis oder Schnee dieser an der Brückenoberfläche abgetaut wird und sich weder Glatteis, noch eine festgefahrene Schneedecke bildet (Bedingung 1). Zur Sicherstellung dieser Bedingung wird die Brückenheizung eingeschaltet, wenn ein Niederschlag bei einer Außenlufttemperatur von weniger als  $2^\circ\text{C}$  fällt. Zum anderen kann es zu sogenannter Reifglätte kommen, wenn die Taupunkttemperatur  $\vartheta_{tau}$  unterhalb der Oberflächentemperatur  $\vartheta_{OF}$  der Brücke ist (vgl. Gleichung 5.18) (Bedingung 2).

$$\begin{aligned} \vartheta_{tau} &< \vartheta_{OF} \\ \vartheta_{amb} &< 2^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (5.18)$$

Wenn eine der beiden genannten Bedingungen erfüllt ist, wird der betreffende Absorber des Modells Tunnel aktiviert (vgl. Abb. 5.47). Der Tunnelabsorber ist folglich nur in Betrieb, wenn die Brückenheizung Wärmeenergie benötigt. Hierbei werden eventuell erforderliche Vorlaufzeiten zur Überwindung der thermischen Trägheit des Brücken-

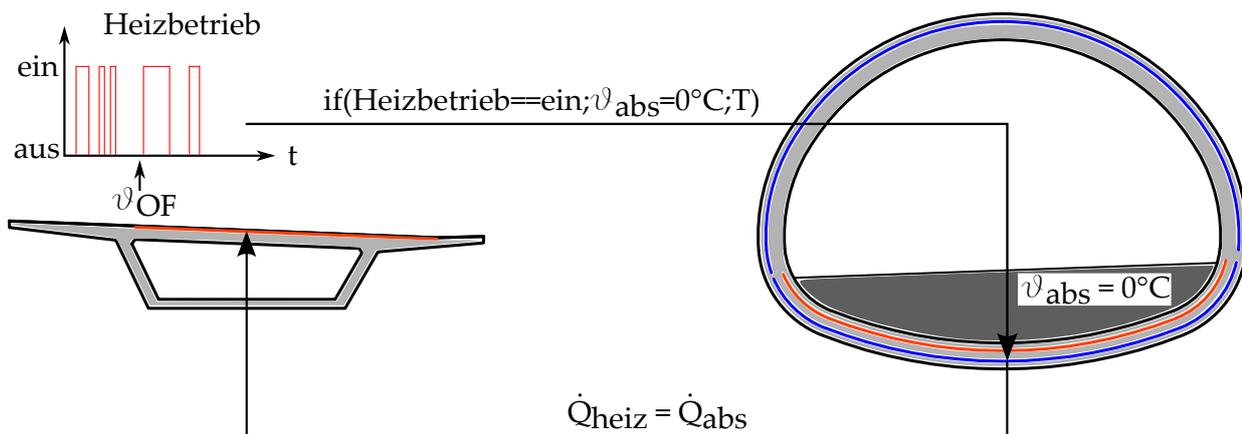


Abbildung 5.47: Systemskizze der Kopplung zwischen dem Modell Brücke und dem Modell Tunnel

bauwerks vernachlässigt.

An der Brücke steht nur so viel Energie zur Verfügung, wie aus dem Tunnelabsorber zur Verfügung gestellt werden kann. Es besteht hierdurch ein direkter Zusammenhang zwischen der extrahierbaren Energie  $\dot{Q}_{abs}$  je Meter Tunnel und der möglichen Heizenergie  $\dot{Q}_{heiz}$  je Meter Brücke. Durch die Variation der thermisch aktivierten Tunnellänge lässt sich der Wärmestrom  $\dot{Q}_{heiz}$  je Meter Brücke so anpassen, dass die Brückenoberfläche die Temperatur  $\vartheta_{OF} > 0^{\circ}C$  annimmt. Für diese Situation wird davon ausgegangen, dass eine Schnee- und Eisfreiheit gegeben ist.

Die Grundlage vieler Empfehlungen zur Klimatisierung von Server- und Technikräumen bildet [6]. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der bezogene Strom der IT-Infrastruktur eines Tunnelbetriebsraumes vollständig in Wärme umgewandelt wird, da die über die Datenverbindungen übertragene Leistung vernachlässigbar gering ist. Daher lässt sich die Leistungsaufnahme der Geräte in Watt der thermischen Abwärme gleichsetzen. Die Gesamtabwärme eines Systems setzt sich aus der Abwärme der Server selber, jener von zusätzlichen Geräten wie einer unterbrechungsfreien Stromversorgung und ggf. Verteilern zusammen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur thermischen Nutzung von Tunneldrainagewässern [87] wurde der Kühlbedarf eines Tunnelbetriebsraumes auf ca.  $17,5 \text{ kW}_{th}$  (Dauerlast) abgeschätzt. Erfahrungswerte der Tunnelbetriebsräume des Tunnels Rennsteig im Thüringer Wald liefern einen Kühlbedarf von ca.  $8 \text{ kW}_{th}$  (Dauerlast). Am Tunnel Rosenstein in Stuttgart entstehen derzeit Serverräume im Zusammenhang mit Tunnelbetriebstechnik, für die eine Abwärme von ca.  $60 \text{ kW}_{th}$  abgeschätzt wurde [23]. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Kühllast von  $20 \text{ kW}_{th}$  (Dauerlast) unterstellt. Die Bewertung der Machbarkeit der Kühlung mittels einer Tunnelgeothermieanlage erfolgt über die Bewertung des Temperaturfeldes innerhalb der Tunnelschale sowie des anstehenden Untergrundes.

**Berechnungsergebnisse** Unter der Berücksichtigung eines extremen Winters gemäß [38] beläuft sich der Betrieb der Brückenheizung auf ca. 250 h pro Heizperiode bei einer maximalen zusammenhängenden Einschaltzeit von 21 h. Die Untersuchungen zeigen,

Tabelle 5.6: Vergleich der extrahierten Wärmeströme aus dem Modell Tunnel für die Varianten V1 bis V3

|                                      | V1                       | V2                       | V3                       |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $\dot{Q}_{gesamt}$ (Heizperiode)     | 92 kW <sub>th</sub> /m   | 184 kW <sub>th</sub> /m  | 354 kW <sub>th</sub> /m  |
| $\dot{Q}_{gesamt}$ (pro h im Mittel) | 0,4 kWh <sub>th</sub> /m | 0,7 kWh <sub>th</sub> /m | 1,7 kWh <sub>th</sub> /m |
| $\dot{q}$ (im Mittel)                | 12 W/m <sup>2</sup>      | 36 W/m <sup>2</sup>      | 70 W/m <sup>2</sup>      |

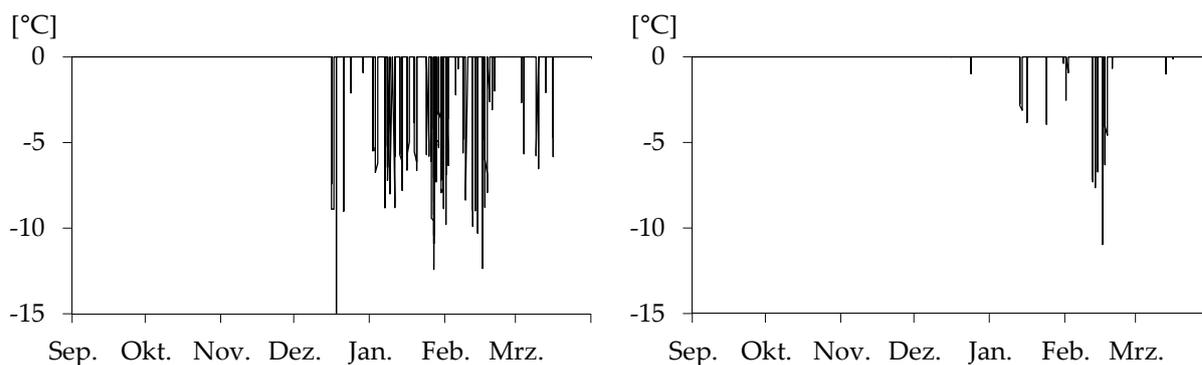


Abbildung 5.48: Temperatur mittig oberhalb des beheizten Brückenbereichs, links: Temperatur bei der Aktivierung von 1 m Tunnel, rechts: Temperatur bei der Aktivierung von 10 m Tunnel

dass die Aktivierung des Gewölbeabsorbers (Variante V1) die geringsten Wärmestromdichten liefert und bereits kurze Zeit nach dem Einschalten der Brückenheizung z.T. keine nutzbare Energie mehr zur Verfügung steht. Wird die Energie aus dem Bereich der Sohle extrahiert (Variante V2), verbessert sich das geothermische Potential des untersuchten Tunnelquerschnitts. Wird der Sohlbereich in einem Speicherbetrieb gefahren und die Wärmeenergie aus dem Tunnelluftraum zeitverzögert genutzt (Variante V3), kann die extrahierbare Wärmeenergie nochmal deutlich gesteigert werden. Die Tabelle 5.6 stellt die Gesamtwärmeströme pro Heizperiode, als Stundenmittel und als Wärmestromdichte gegenüber.

Die Variante 3 bildet die Basis für die weiterführenden Untersuchungen zur Abschätzung der thermisch zu aktivierenden Tunnellänge zur Sicherstellung der Schnee- und Eisfreiheit auf den Talbrücken. Die Grundlage zur Abschätzung der thermisch zu aktivierenden Tunnellänge bildet die Auswertung der Brückenoberflächentemperatur in der Mitte des beheizten Brückenbereiches. Hierdurch werden die gefährdeten Randbereiche der Brückenkappen nicht in die Bewertung einbezogen. Ausgewertet werden lediglich die Temperaturen, die während der Heizzeiten unterhalb der 0°C-Grenze liegen.

Die Abbildung 5.48 zeigt die simulierten Oberflächentemperaturen mittig im Bereich der beheizten Brückenfläche für die Kopplung des Modells Brücke mit einem Tunnelabschnitt von 1 m Länge sowie mit einem Tunnelabschnitt von 10 m Länge. Wird die Temperatur von 0°C während des Heizbetriebes unterschritten, ist mit Schnee- bzw. Glättebildung auf der Brücke zu rechnen. Dies ist unter Nutzung eines Tunnelabschnitt-

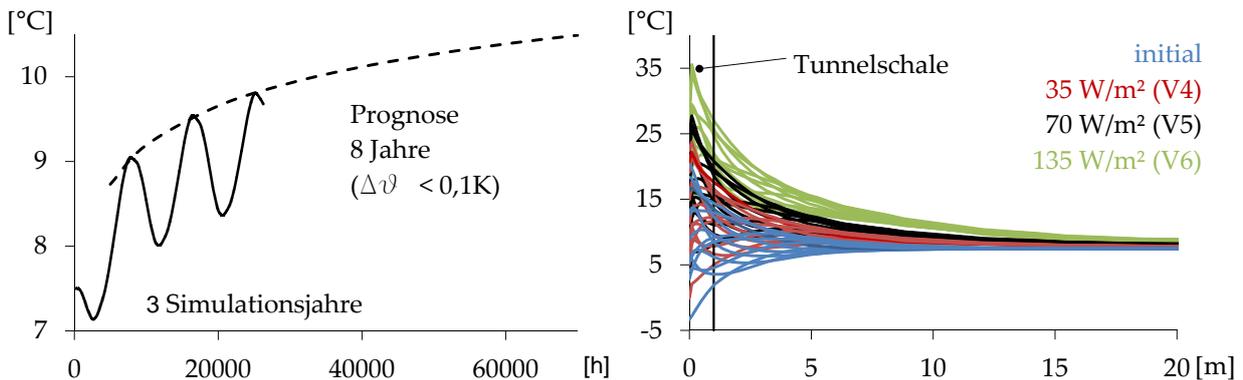


Abbildung 5.49: links: Verlauf der Baugrundtemperatur über die Simulationszeit von 3 Jahren, rechts: Vergleich der initialen Baugrundtemperatur mit dem Temperaturfeld infolge Wärmeeintrag aus dem Tunnelbetriebsraum im dritten Simulationsjahr

tes von 1 m in 221 h der Fall, d.h., dass das System zur Schnee- und Eisfreihaltung lediglich 29 h während einer Heizperiode zuverlässig arbeitet (ca. 12% des erforderlichen Heizbetriebs). Wird hingegen ein Tunnelabschnitt von 10 m Länge mit einem Brückenabschnitt von 1 m gekoppelt, können lediglich 28 h des Heizbetriebs nicht ausreichend mit Wärmeenergie versorgt werden, was einer Abdeckung des erforderlichen Heizbetriebs von 89% entspricht. Durch die thermische Aktivierung eines Tunnelabschnitt  $> 10$  m je Meter Brücke stellt sich in den Monaten Januar und Februar keine wesentlich höhere Abdeckung der Heizzeiten ein. Für die durch die geothermische Energie nicht abgedeckten Heizzeiten ist in jedem Falle eine zusätzliche thermische Energiequelle vorzuhalten.

Die Abfuhr einer konstanten Wärmelast aus den Tunnelbetriebsräumen in den Untergrund führt zwangsläufig zu einer Veränderung des Temperaturfeldes. Um einen Infrastrukturtunnel bildet sich auch ohne einen geothermischen Betrieb eine sich über den Jahresgang verändernde Temperaturkorona aus, die sich bis zu einem radialen Abstand von der Tunnelaußenschale von ca. 7–10 m ausbreitet und in das ungestörte Temperaturfeld des Untergrundes übergeht (vgl. Abb. 2.3). Bis zum Erreichen eines quasi-stationären Temperaturfeldes unter einer konstanten Wärmezufuhr vergehen mehrere Jahre (vgl. Abb. 5.49 links). Je höher der spezifische Wärmeeintrag ist, desto größer wird die anthropogene Temperaturänderung in der Tunnelschale und dem angrenzenden Untergrund. Die Abbildung 5.49 rechts zeigt die einhüllenden Temperaturverläufe für unterschiedliche Wärmestromdichten jeweils am Ende eines Simulationsmonats im dritten Simulationsjahr. Mit zunehmender Wärmestromdichte steigen die absoluten Untergrundtemperaturen im Nachbereich des Tunnels und die radiale Ausdehnung der Temperaturkorona vergrößert sich (vgl. Tabelle 5.7).

Das Temperaturfeld innerhalb der Tunnelschale reagiert im Gegensatz zum Temperaturfeld im Boden bereits nach kurzer Zeit quasi-stationär. Durch die Temperaturleitfähigkeit des Betons und die tageszeitliche Temperaturanregung verändern sich die Temperaturen in einer Schalentiefe von ca. 50 cm mit dem Tagesgang. Die Bewertung des Eintrags von Wärmeenergie in die Tunnelschale ist somit bereits nach der Simulati-

Tabelle 5.7: Einfluss des Wärmeeintrags aus dem Tunnelbetriebsraum auf das Temperaturfeld im Untergrund

| Variante             | Boden                   |              | Tunnelschale            |
|----------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
|                      | $\Delta\vartheta_{max}$ | $l_{Korona}$ | $\Delta\vartheta_{max}$ |
| 35 W/m <sup>2</sup>  | 3,3 K                   | 1 m          | 5,8 K                   |
| 70 W/m <sup>2</sup>  | 5,6 K                   | 2 m          | 11,6 K                  |
| 135 W/m <sup>2</sup> | 11,6 K                  | 3 m          | 23,3 K                  |

on eines Jahresganges möglich. Hierzu werden die maximalen Temperaturdifferenzen zwischen der initialen Schalentemperatur mit den Temperaturen infolge der Beaufschlagung mit der Heizlast aus den Tunnelbetriebsräumen verglichen (vgl. Tabelle 5.7). Die Temperaturdifferenzen in der Tunnelschale gegenüber dem initialen Temperaturfeld führen zu Zwangsbeanspruchungen innerhalb des Schalenbetons, die durch eine entsprechende Bewehrung zu berücksichtigen sind.

#### 5.4.4 Empfehlungen für die Praxis

Derzeit existieren 10 TGTA in geschlossener Bauweise, von denen lediglich eine Anlage (TGTA Jenbach) unter Realbedingungen Wärmeenergie extrahiert. Die Erfahrungsberichte der bestehenden Anlagen geben nur zum Teil Hinweise auf die Vor- und Nachteile der gewählten Konstruktionen und Betriebsweisen. Allgemeine Empfehlungen zur Ausführung von geschlossenen TGTA existieren in [2]. Hier werden neben den Angaben zum Ablauf der Planung einer TGTA auch technische Detaillösungen vorgestellt und Hinweise zur thermischen Erkundung des Untergrundes gegeben. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Ausrüstung und der Betrieb von Infrastrukturtunneln mit Absorbertechnik noch nicht dem Stand der Technik angehört und jedes in der Literatur beschriebene Projekt auf eigene Entwurfskriterien zurückgeht. Die nachfolgenden Empfehlungen zum Bau und Betrieb einer geschlossenen TGTA fußen zum einen auf den Erfahrungen aus den Projekten TGTA an Stuttgart-Fasanenhof, Jenbach und Rosentunnel, Informationen aus Forschungsprojekten aus dem Bereich Temperierung von Verkehrsflächen [45][54][57] sowie den durchgeführten Parameterstudien.

**Bau einer TGTA** Das Basiselement zur Herstellung eines Wärmeübertragers innerhalb der Tunnelschale bildet eine Absorberrohrleitung, durch die eine Trägerflüssigkeit zirkuliert. Zur Wahl und Ausbildung des Rohrregisters gelten die Planungsgrundlagen, die aus dem Fachbereich der Gebäudetechnik bekannt sind:

- Möglichst großer Rohrdurchmesser zur Reduzierung des Druckverlustes
- Optimierung des Rohrschenkelabstandes über das Verhältnis Druckverlust zu Wärmestromdichte
- Wahl eines Strömungszustandes am Übergang vom laminaren zum turbulenten Bereich

- Wahl eines Rohrmaterials mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit und in Abstimmung mit dem erforderlichen Biegeradius
- Nutzung einer Trägerflüssigkeit entsprechend der Anforderungen aus der Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf (Frostschutz) bei möglichst geringer Viskosität
- Ausbildung von Teilkreisläufen mit einer möglichst kurzen Rohrlänge zur Steigerung der extrahierbaren Wärmestromdichte

Für die Befestigung der Rohrleitungen vor der Betonage der Tunnelschale existieren zahlreiche baustellenspezifische Möglichkeiten (Geovlies, Konstruktionsmatte, Schalenbewehrung, Befestigungsschienen), die hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit gleichwertig nebeneinander stehen. Die radiale Lage der Rohrleitungen bezogen auf den Tunneldurchmesser wurde in unterschiedlichen Projekten ([23][108]) möglichst weit in Richtung Erdreich angeordnet, um die jahreszeitlich ausgeglichene Wärmestromdichte  $\dot{q}_{Geo}$  nutzbar zu machen. In [90] wird eine luftseitige Betondeckung der Absorberrohrleitungen von ca. 20 cm beschrieben, hier liegt der Absorber folglich nahe des Tunnelluftraumes. In der vorliegenden Studie wurde der Absorber mit einer Betondeckung von 10 cm zum Tunnelluftraum angeordnet, so dass im Wesentlichen die Wärmeströme hieraus aktiviert werden. Die radiale Anordnung der Absorberrohrleitungen sollte

- nahe dem Tunnelluftraum angeordnet werden, wenn eine direkte Ankopplung an den Tunnelluftraum im Sinne einer Luftwärmepumpe mit hohen Wärmeaus-tauschraten erforderlich ist (Betrieb „on demand“),
- nahe dem Erdreich, wenn die Wärmekapazitäten des Schalenbetons und des Erdreichs genutzt werden sollen (Speicherbetrieb),

gewählt werden. Darüber hinaus kann auch die Anordnung von 2 getrennten Absorbern mit unterschiedlicher radialer Anordnung in der Tunnelschale sinnvoll sein (vgl. Kapitel 5.4.3 und [11]). Die Planung der Rohrleitungsführung innerhalb der Tunnelschale ist mit der Dimensionierung eines klassischen Wärmeübertragers aus dem Bereich der Anlagentechnik gleichzusetzen. So ist für jede TGTA ein Prozess zu durchlaufen, bei dem das Optimum aus Druckverlust und Wärmestromdichte sowie dem notwendigen Personal- und Materialeinsatz zu finden ist. Mit der in Kapitel 5.3 vorgestellten Simulationsumgebung wird hierzu ein entsprechendes Werkzeug zur Verfügung gestellt.

Bei der Betonage der Tunnelschale sollten zur Vermeidung von Schäden an den Absorberleitungen diese mit einem geringen Vordruck beaufschlagt werden, der oberhalb des erwarteten Betonierdruckes liegt. Hierbei ist darauf zu achten, dass es durch die Hydratationswärme des Betons zu einer Temperatur- und damit Volumenzunahme des Fluids innerhalb der Rohrleitung kommen kann. Aus diesem Grund ist ein Rohrende mit einem entsprechenden Überdruckventil auszurüsten. Die Absorberkreisläufe sind nach der Herstellung der Tunnelschale einer Druckprüfung gemäß [125] bzw. Prüfverfahren anderer einschlägiger Normen, wie z.B. [40], zu unterziehen.

Die Verbindungsleitungen der Absorberkreisläufe mit entsprechenden hydraulischen Verteilern oder der Haustechnikzentrale erfolgt in den bekannten TGTA über wärme-gedämmte Rohrleitungen, die im Bereich der Tunnelsohle angeordnet werden. Bei der

Dimensionierung dieser Rohrleitungen sollte zur Reduzierung des Druckverlustes ein wesentlich größerer Rohrquerschnitt als für die Absorberleitungen gewählt werden. Für das Anschließen der Einzelkreisläufe an die Verbindungsleitungen bietet sich zum einen der Anschluss im sogenannten „Tichelmann-System“ an. Um die Gesamtleitungslänge der Verbindungsleitungen zu reduzieren ist auch eine einfache Parallelschaltung der Kreisläufe denkbar, allerdings sollte dann für jeden Kreislauf ein hydraulischer Abgleich erfolgen.

**Betrieb einer TGTA** Das thermische Potential einer TGTA wird durch ihren Betrieb entscheidend beeinflusst. Wird über die Anlage über einen langen Zeitraum kontinuierlich Wärme zu- oder abgeführt, werden sich geringere Wärmestromdichten extrahieren lassen, als wenn die Energieextraktion dem tatsächlichen gebäudeseitigen Bedarf folgt. Der Abbildung des zu deckenden Wärme- bzw. Kältebedarfs kommt im Zuge der Entwurfsplanung der TGTA daher eine entscheidende Bedeutung zu. Hierzu kann zum einen der Ansatz nach Kapitel 4.6 der statischen Lastprofile verwendet werden. Eine weitere Verbesserung der Prognose des thermischen Potentials liefert die Nutzung der dynamischen Kopplung des TGTA an eine Simulation des Energiebedarfs, bei der auch der Einfluss realistischer Regelungen der Haustechnikkomponenten berücksichtigt werden kann. Grundsätzlich wird empfohlen, den zu deckenden Energiebedarf möglichst realistisch abzubilden und der Anlage ausreichend Zeit zur thermischen Regeneration zu geben.

Je größer die Temperaturspreizung zwischen dem Absorber und der Umgebung (Tunneluft bzw. Boden) ist, desto höher fallen mögliche Energieentzugsleistungen aus. Daher ist für den Heizfall eine möglichst geringe, für den Kühlfall eine möglichst hohe Eintrittstemperatur in den Primärkreislauf zu wählen. Hierbei sind entsprechende Untersuchungen hinsichtlich der Temperaturfeldentwicklung in der Tunnelschale und des umgebenden Bodens durchzuführen und dessen Auswirkungen auf Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Tunnels und dessen Einfluss auf die Flora und Fauna des Untergrundes zu bewerten.

Die Wärme- bzw. Kälteenergie einer TGTA wird auf einem geringen Temperaturniveau zur Verfügung gestellt. Die angeschlossenen Nutzungen sollten daher mit einer niedrigen Vorlauftemperatur betrieben werden. Im Bereich der Haustechnik wird dies durch die Anordnung von flächigen Wärmeübertragern wie Kühl-/Heizdecken, Fußbodenheizungen und Bauteilaktivierungen erreicht. Vorlaufauflauftemperaturen  $> 35^\circ\text{C}$  führen zu JAZ deutlich unter 4 und sollten daher vermieden werden. Weitere Möglichkeiten zur Nutzung der Wärme- bzw. Kälteenergie auf einem geringen Temperaturniveau finden sich im Bereich der Eis- und Schneefreihaltung von Frei- und Fahrflächen bzw. technischen Einrichtungen des Schienenverkehrs wie Weichen oder Bahnsteigen. Darüber hinaus kann eine TGTA wie in Kapitel 5.4.3 gezeigt zur Klimatisierung von Technikräumen des Tunnels und naheliegenden Gebäuden zum Einsatz kommen.

**Messtechnik einer TGTA** Für den Betrieb einer TGTA ist zur Regelung des Primärkreislaufes entsprechende Messtechnik erforderlich. Hierzu zählen Temperaturmessungen am Ein- und Austritt in den Primärkreislauf sowie die Messung des Volumenstroms.

Idealerweise erfolgen diese Messungen getrennt für jeden Teilkreislauf. Darüber hinaus ist eine permanente Erfassung des Systemdrucks nach [125] erforderlich, um eventuelle Leckagen der Absorberrohrleitungen frühzeitig zu erkennen. Weitere Messtechnik innerhalb einer TGTA dienen im Wesentlichen dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn und können nachrangig in die Steuer- und Regelungstechnik integriert werden. Hierzu zählen Temperatursensoren innerhalb der Tunnelschale, die mit einem exakt definierten Abstand zueinander in radialer Richtung, verteilt über die gesamte Schalendicke angeordnet werden. Hierdurch wird es möglich, Wärmeströme vom Erdreich zum Absorber wie auch vom Tunnelluftraum zum Absorber getrennt voneinander zu erfassen und Aussagen über die Wärmestromdichten  $\dot{q}_{Geo}$  und  $\dot{q}_{TL}$  zu treffen. Wenn möglich sollten weitere Temperatursensoren am Übergang von der Tunnelschale zum Boden angeordnet werden. Hieraus können Rückschlüsse auf die Veränderung der Bodentemperaturen gezogen werden, die im Zusammenhang mit dem Nachweis der Störung des Untergrundes im Zuge der Genehmigung einer TGTA wichtig sind.

# Kapitel 6

## Ausblick

Für die Auslegung von thermisch aktivierten Tunnelbauwerken wurde im Rahmen dieser Arbeit eine ganzheitliche Simulationsumgebung entwickelt, die eine abgesicherte Prognose des tunnelgeothermischen Potentials einer TGTA ermöglicht. In diesem Zusammenhang haben sich im Bereich der Beschreibung des Tunnelklimas und dem Wärmeübergang von der Tunnelaußenschale zum Aquifer Fragestellungen ergeben, die im Zuge von weiteren Forschungsaktivitäten weiter zu untersuchen sind. Entsprechende Zusammenfassungen dieser offenen Fragestellungen sind den Kapiteln 4.4.4 und 4.5.6 zu entnehmen. Mit der Entwicklung einer Schnittstelle zwischen der Simulationsumgebung zur Abbildung einer TGTA und Computeranwendungen zur Simulation des energetischen Gebäudeverhaltens ist ein erster Baustein entstanden, die Gesamteffizienz einer TGTA im Zusammenhang mit einem angeschlossenen Nutzer zu bewerten. Hierauf aufbauend sind Regelungsstrategien zu entwickeln und in die entsprechenden Simulationsumgebungen zu implementieren, die zu einer Steigerung der Gesamteffizienz, ausgedrückt in der JAZ, führen.

Während der Begleitung und Durchführung der Projekte TGTA an Stuttgart-Fasanenhof, Jenbach und Rosensteintunnel hat sich gezeigt, dass die Ausrüstung von Infrastrukturtunneln mit Absorbertechnik oft an den Fragen der Wirtschaftlichkeit, des Vorhandenseins potentieller Energieabnehmer und dem Fehlen von Modellen zum Betrieb einer TGTA scheitert. Die Planung eines Tunnels stellt bereits ohne die Ausrüstung mit Absorberrohrleitungen zur Energieextraktion eine komplexe und vor allem langwierige Aufgabe dar. Die Integration von Erhebungen zu potentiellen Nutzern der tunnelthermischen Energie und die daran anschließende Abschätzung des zur Verfügung stehenden thermischen Potentials in den traditionellen Planungsablauf ist vor diesem Hintergrund nur schwer möglich. Darüber hinaus verfügen die Betreiber von Infrastrukturtunneln wie Eisbahngesellschaften, Landes- oder Stadtämter nicht oder nur indirekt über die notwendige Infrastruktur zum Betrieb eines Nahwärmeversorgungsnetzes. In diesem Zusammenhang wird als Hürde vor allem die Gewährleistung der Versorgungssicherheit genannt. Es sind folglich Konzepte zu entwickeln, die zum einen die Frage nach potentiellen Energieabnehmern im Zuge der Planung eines Tunnels aus dem Fokus nehmen und zum anderen den Betrieb der TGTA und damit die Versorgungssicherheit in die Sphäre eines konventionellen Energieversorgers übergeben. Im Folgenden wird ein möglicher Lösungsansatz diskutiert, der auf der Basis einer Neuordnung der Schnittstelle zwischen der „Technischen Gebäudeausrüstung“ und der „Technischen Baugrundausstattung“ beruht (vgl. Abb. 6.1 links).

Zentrales Element dieser Schnittstelle ist die konstruktive Ausbildung des Übergabepunktes zwischen der TGTA und der Gebäudetechnik, der sich anders als in [122] be-

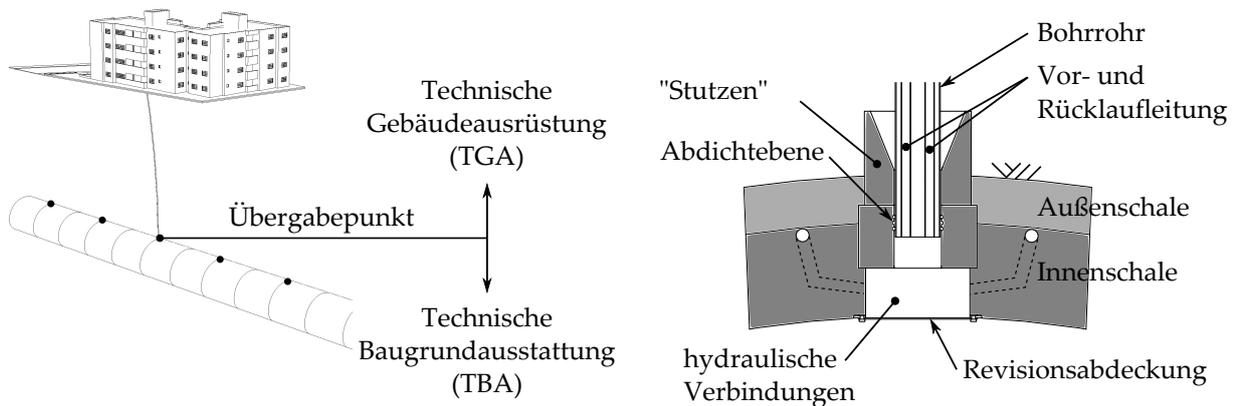


Abbildung 6.1: Konstruktive Trennung zwischen der TGTA und dem Energieabnehmer, links: Anordnung der Schnittstelle zwischen TGA und TBA, rechts: Konstruktive Details des Übergabepunktes

geschrieben nicht an der GOK befindet, sondern direkt an der Tunnelfirste angeordnet ist. Dieser Übergabepunkt befindet sich in diskreten Abständen entlang der Tunnelfirste. Die Verbindung des Tunnels mit der GOK erfolgt über eine gesteuerte bzw. gerichtete Bohrung, mit der der Übergabepunkt angefahren wird. Die Steuerung der Bohrung wird gegenüber den klassischen Verfahren z.B. der Horizontalbohrtechnik (Horizontal-Directional-Drilling HDD) dadurch vereinfacht, dass eine noch zu entwickelnde Sender-Empfänger-Technologie zum Einsatz kommen kann, bei der eine Einheit direkt im Ziel, also dem Übergabepunkt angeordnet wird. Dies wird die Steuerung der Bohrung wesentlich vereinfachen. Die Konstruktion des Übergabepunktes (siehe Abb. 6.1 rechts) erlaubt durch eine trichterförmige Ausbildung den Ausgleich möglicher Bohrtoleranzen. Durch unterschiedliche Abdichtungsebenen und Verpressgänge wird ein dichter Anschluss zwischen Betonschale und Bohrrohr gewährleistet. Durch das Bohrrohr werden die Zu- und Rücklaufleitungen des Primärkreislaufes zur Oberfläche geführt. Die hydraulische Verbindung der Versorgungsleitungen mit den Teilkreisläufen innerhalb der Tunnelwand erfolgt innerhalb einer Aussparung an der Tunnelfirste. In diesem Bereich besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die thermisch aktivierten Teilkreisläufe in Längsrichtung des Tunnels zu koppeln. Hierdurch kann die Absorberfläche zur Deckung der Heiz- bzw. Kühllast je nach Erfordernis angepasst werden. Durch die Anordnung der Schnittstelle zwischen der „Technischen Gebäudeausrüstung“ und der „Technischen Baugrundausrüstung“ an der Tunnelfirste und der Möglichkeit des nachträglichen Verbindens der TGTA mit der GOK werden folgende Hindernisse zur Errichtung einer TGTA beseitigt:

- Potentielle Energieabnehmer müssen zum Zeitpunkt der Planung des Tunnels und der TGTA nicht bekannt sein.
- Kostenintensive Investitionen zur Herstellung der Verbindung der Absorberfläche mit der „Technischen Gebäudeausrüstung“ fallen in den Bereich des Energieabnehmers und brauchen bei der Planung der TGTA nicht berücksichtigt werden.

- 
- Der Tunnelbetreiber ist ausschließlich für die Anordnung der Absorberrohrleitungen in der Tunnelschale verantwortlich und übernimmt kein Versorgungsrisiko.
  - Änderungen des Energiebedarfs oder Energiebedarfprofils auf der Energieabnehmerseite kann durch eine Anpassung der thermisch aktivierten Fläche begegnet werden.

Die Ausrüstung eines Tunnels mit Absorbertechnik zur Energieextraktion ist nur im Zuge der Errichtung eines Tunnels sinnvoll. Eine Nachrüstung bestehender Tunnel durch die Anordnung von oberflächennahen Absorberleitungen kann vor dem Hintergrund einer Erhöhung der Brandlast, einer Reduzierung des Lichtraumes und unter verkehrsbetrieblichen Randbedingungen nur die Ausnahme sein. Aus diesem Grund ist das zukünftige Potential der Tunnelgeothermie nicht prognostizierbar. Allerdings eröffnet die Übertragung dieser Technologie auf Bauwerke der Siedlungswasserwirtschaft (Kanäle) die Möglichkeit einer breiten Anwendung. Besonders in innerstädtischen Bereichen kann durch die thermische Aktivierung von Abwassersammlern nicht nur das Speicherpotential des Erdreichs genutzt werden, sondern es ergeben sich durch die Nutzung des Kanalnetzes als hydraulisch-thermische Verbindung ganz neue Möglichkeiten der Energieverteilung innerhalb eines Stadtquartiers. Diese Ansätze gilt es in Zukunft weiter zu erforschen.



# Literatur

- [1] Abu-Hamdeh, N. H. "Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content". In: *Biosystems Engineering* 86 (1 2003), S. 97–102. ISSN: 15375110.
- [2] Adam, D., Hofinger, H. und Unterberger, W. *Geothermische Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken. Einsatzmöglichkeiten und wirtschaftlicher Nutzen*. Bd. 96. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen : B, Brücken- und Ingenieurbau. Bremen: Fachverl. NW Schünemann, 2013. 80 S. +. ISBN: 978-3-95606-054-0.
- [3] Adam, D. und Markiewicz, R. "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers". In: *Géotechnique* 59 (3 2009), S. 229–236. ISSN: 0016-8505.
- [4] AG Energiebilanzen e.V. *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen legt Energiebericht 2017 vor. Wirtschaft und Bevölkerung steigern Verbrauch / CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf Vorjahresniveau*. Pressedienst. Berlin: AG Energiebilanzen e.V., 2018.
- [5] Albert, A. und Schneider, K.-J. *Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen*. 21. Aufl. Köln: Bundesanzeiger Verl. [u.a.], 2014. getr. Zählung. ISBN: 978-3-8041-5251-9.
- [6] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance*. 2011.
- [7] Ang, C. D., Rein, G., Peiro, J. und Harrison, R. "Simulating longitudinal ventilation flows in long tunnels. Comparison of full CFD and multi-scale modelling approaches in FDS6". In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 52 (2016), S. 119–126. ISSN: 08867798.
- [8] Ataie-Ashtiani, B., Volker, R. E. und Lockington, D. A. "Tidal effects on groundwater dynamics in unconfined aquifers". In: *Hydrological Processes* 15 (4 2001), S. 655–669. ISSN: 0885-6087.
- [9] Bai, Y., Zeng, Y., Zhang, X., Yan, X., Ruan, L. und Zhou, X. "Numerical and experimental study on the flow field induced by a train urgently speeding to the rescue station". In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 58 (2016), S. 74–81. ISSN: 08867798.
- [10] Barla, M., Di Donna, A. und Perino, A. "Application of energy tunnels to an urban environment". In: *Geothermics* 61 (2016), S. 104–113. ISSN: 03756505.
- [11] Barla, M. und Insana, A. "Energy Tunnel Segmental Lining: an Experimental Site in Turin Metro". In: *ITA - AITES WORLD TUNNEL CONGRESS. Proceedings. WORLD TUNNEL CONGRESS (Dubai)*. Hrsg. von International Tunnelling and Underground Space Association. ITA. 2018.

- [12] Bauer, D. "Zur thermischem Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern". Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2011. 136 S.
- [13] Bauer, M., Fren, W., Jacobi, H. und Neu, T. *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*. Berlin: Springer Spektrum, 2018. 1-817. ISBN: 978-3-662-50306-5.
- [14] Bear, J. *Dynamics of fluids in porous media*. Dover books on physics and chemistry. New York: Dover, 1988. Online Ressource (xvii, 764 Seiten). ISBN: 162198639X.
- [15] Bellenoue, M., Morinière, V. und Kageyama, T. "Experimental 3-D Simulation of the compression wave, due to train-tunnel entry". In: *Journal of Fluids and Structures* 16 (5 2002), S. 581–595. ISSN: 08899746.
- [16] Bergmann, A. und Erhorn, H. "Kleiner als gedacht. Monitoring zeigt Defizite bei Wärmepumpen-Systemen". In: *Gebäude Energie Berater* 05 (2017), S. 36–40.
- [17] Bernhardt, P., Sauer, C. und Hendrix, M. *Ermittlung des Energiebedarfs zur Bewegung von Fahrzeugen in mikroskopischen Verkehrssimulationen*. Wissenschaftliche Beiträge TH Wildau. Wildau, 2015.
- [18] Bertleff, B., Plum, H., Schuff, J., Stichler, W., Storch, D. H. und Trapp, C. *Wechselwirkungen zwischen Baggerseen und Grundwasser. Ergebnisse isotopehydrologischer und hydrochemischer Untersuchungen im Teilprojekt 6 des Forschungsvorhabens „Konfliktarme Baggerseen (KaBa)“*. Freiburg, 2001.
- [19] Beven, K. "A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates". In: *Journal of Hydrology* 44 (3-4 1979), S. 169–190. ISSN: 00221694.
- [20] Bidarmaghz, A., Narsilio, G. A., Buhmann, P., Moormann, C. und Westrich, B. "Thermal interaction between tunnel ground heat exchangers and borehole heat exchangers". In: *Geomechanics for Energy and the Environment* 10 (2017), S. 29–41. ISSN: 23523808.
- [21] Blofeld, J. und Rönnau, I. *Wärmeenergie aus dränierten Bergwässern von Straßentunneln (unveröffentlicht)*. Bergisch Gladbach, 2014.
- [22] Brandl, H. "Energy foundations and other thermo-active ground structures". In: *Géotechnique* 56 (2 2006), S. 81–122. ISSN: 0016-8505.
- [23] Buch, C. und Erichsen, C. "Rosensteinstraßentunnel: Nutzung von Verlustwärme aus der Betriebszentrale in Verbindung mit Geothermie zur Klimatisierung von Gebäuden und Wasserbecken des zoologisch-botanischen Gartens Wilhelma". In: *U-Verkehr und unterirdisches Bauen, STUVA-Tagung 2017 - Internationales Forum für Tunnel und Infrastruktur. STUVA-Tagung 2017 in Stuttgart : 6. bis 8. Dezember 2017 : Langfassungen der Vorträge = STUVA conference 2017 - International Forum for Tunnels and Infrastructure* (Stuttgart). Hrsg. von Richter, Helmut und Theberath, Jörg. Bd. 49. Forschung + Praxis 49. 2017, S. 433–437. ISBN: 978-3-433-03247-3.
- [24] Buhmann, P. "Potentiale der Tunnelgeothermie am Beispiel Energietübbing. Jenbach, Österreich". Institut für Geotechnik. Masterarbeit. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2017.

- [25] Buhmann, P., Blossfeld, J. und Moormann, C. "Geothermische Bergwassernutzung Hydrogeothermische Verfahren an deutschen Straßentunneln". In: *Fachsektionstage Geotechnik. Interdisziplinäres Forum*. Fachsektionstage Geotechnik (Würzburg). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Essen, 2017, S. 46–51. ISBN: 978-3-946039-03-7.
- [26] Buhmann, P., Moormann, C., Kleinknecht, S. und Braun, J. "Erdwärmesonden - Temperaturentwicklung im Sondennahfeld". In: *bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau* 67 (10 2016), S. 40–45.
- [27] Bundesanstalt für Strassenwesen. *BASt aktuell. Informationen aus der Bundesanstalt für Straßenwesen*. 3. Aufl. Informationen aus der Bundesanstalt für Straßenwesen. 2016. 4 S.
- [28] Bundesanstalt für Strassenwesen. *Fachthemen - Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen*. Bergisch Gladbach, 2018.
- [29] Bundesverband Wärmepumpen e.V. *Absatzzahlen für Heizungswärmepumpen in Deutschland 2011 bis 2017*. Hrsg. von Bundesverband Wärmepumpen e.V. Bundesverband Wärmepumpen e.V. 2017. (Besucht am 13. 08. 2018).
- [30] Buntebarth, G. *Geothermie*. Hochschultext. Berlin, Heidelberg: Springer, 1980. IX, 156 S. ; ISBN: 9783540104230.
- [31] Busslinger, A. "Geothermische Prognosen für tiefliegende Tunnel". Dissertation. Zürich: Eidgenössische technische Hochschule Zürich, 1998. 207 S.
- [32] Cecinato, F., Piglialepre, R., Loveridge, F.A. und Nicholson, D. "Numerical analysis of thermal cycling during a multi-satage energy pile thermal response test". In: *Energy Geotechnics*. 1st International Conference on Energy Geotechnics (Kiel). Hrsg. von Wuttke, F., Bauer, S. und Sanchez, M. CRC Press, Har/Com edition, 2016, S. 593–599. ISBN: 9781138032996.
- [33] Chu, C.-R., Chien, S.-Y., Wang, C.-Y. und Wu, T.-R. "Numerical simulation of two trains intersecting in a tunnel". In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 42 (2014), S. 161–174. ISSN: 08867798.
- [34] Cotting, R. *Wärmenutzung aus dem Rickentunnel. Mehrzweckhalle Kaltbrunn*. Schlussbericht 2000, Cotting Ingenieurbüro AG. Uznach: Bundesamt für Energie, 2000.
- [35] Csesznák, A., Järschke, R. und Wittke, M. "B 10 Rosenstein Tunnel - Designing a geothermal energy system in a spa protection area / B 10-Rosensteintunnel - Planung einer Geothermieanlage im Heilquellenschutzgebiet". In: *Geomechanics and Tunnelling* 9 (5 2016), S. 458–466. ISSN: 18657362.
- [36] Danielopol, D. L., Griebl, C., Gunatilaka, A. und Notenboom, J. "Present state and future prospects for groundwater ecosystems". In: *Environmental Conservation* 30 (2 2003), S. 104–130. ISSN: 03768929.
- [37] Decker, A. "Innenschalenbeton – Erfahrungen am Rennsteigtunnel". In: *Tunnelbau-Fachtagung 2002* (Hennef). 2002, S. 1–7.

- [38] Deutschen Wetterdienst. *Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Handbuch*. Offenbach, 2017.
- [39] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. *SCART :: TSG*. Copyright: Copyright. 2016.
- [40] DIN, Hrsg. *Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 4: Installation*. DIN Norm. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Juni 2010.
- [41] Eicker, U. und Thumm, F. "Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit oberflächennaher Geothermie für das Heizen und Kühlen von Nichtwohngebäuden". In: *Bauphysik* 34 (1 2012), S. 11–18. ISSN: 01715445.
- [42] *Empfehlung Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung - EA Geothermie*. 1st. Berlin: Ernst & Sohn, 2013. 300 S. ISBN: 978-3-433-02967-1.
- [43] Fang, Y., Fan, J., Kenneally, B. und Mooney, M. "Air flow behavior and gas dispersion in the recirculation ventilation system of a twin-tunnel construction". In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 58 (2016), S. 30–39. ISSN: 08867798.
- [44] Farouki, O. T. "The thermal properties of soils in cold regions". In: *Cold Regions Science and Technology* 5 (1 1981), S. 67–75. ISSN: 0165-232X.
- [45] Feldmann, M., Döring, B., Hellberg, J., Kuhnhenne, M., Pak, D., Mengerling, I., Beucher, S., Hess, A., Steinhauer, B., Kemper, D. und Scharnigg, K. *Vermeidung von Glatteisbildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Bd. B 87. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen : B, Brücken- und Ingenieurbau. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2012.
- [46] Fischer, D., Wolf, T., Scherer, J. und Wille-Hausmann, B. "A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households". In: *Energy and Buildings* 124 (2016), S. 120–128. ISSN: 0378-7788.
- [47] Florides, G. und Kalogirou, S. "Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications". In: *Renewable Energy* 32 (15 2007), S. 2461–2478. ISSN: 0960-1481.
- [48] Frodl, S., Franzius, J. N. und Bartl, T. "Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach - Planung und Bau der Tunnelgeothermieanlage in Jenbach". In: *Geomechanics and Tunnelling* 3 (5 2010), S. 658–668.
- [49] *Gewicht von Pkw nach Autoherstellern* | Statista. 2018.
- [50] Glaeser, K.-P., Kaschner, R., Lerner, Markus, Roder, C. K., Weber, R., Wolf, A. und Zander, U. *Auswirkungen von neuen Fahrzeugkomponenten auf die Infrastruktur des Bundesfernstraßennetzes*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen : V, Verkehrstechnik. Bergisch Gladbach, 2006.
- [51] Gnielinski, V. "Ein neues Berechnungsverfahren für die Wärmeübertragung im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Rohrströmung". In: *Forschung im Ingenieurwesen* 61 (9 1995), S. 240–248. ISSN: 1434-0860.

- [52] Griebler, C. *Grundwasser-Ökologie*. Bd. 2111. UTB. Griebler, Christian, (Hrsg.) Wien: Facultas, 2003. 495 Seiten. ISBN: 9783825221119.
- [53] Hahne, E. *Technische Thermodynamik. Einführung und Anwendung*. 4., überarb. Aufl. München und Wien: Oldenbourg, 2004. 528 S. ISBN: 9783486576511.
- [54] Hanschke, T., Köhl, J.-U., Freund, R. und Mackert, K.-U. "Die Geothermische Brücke Berkenthin". In: *Bautechnik* 86 (11 2009), S. 729–732. ISSN: 09328351.
- [55] Heißing, B., Ersoy, M. und Gies, S., Hrsg. *Fahrwerkhandbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. ISBN: 978-3-658-01991-4.
- [56] Hellwig, M. "Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile". INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK. Dissertation. München: Technischen Universität München, 2003.
- [57] Herrmann, V. und Koch, S. "Schnee- und Eisfreihaltung einer Grundstückszufahrt: Geothermie in Kombination mit Walzasphaltschichten". In: *bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau* (09 2017), S. 54–57.
- [58] Höfer-Öllinger, G. und Millen, B. "Geothermal prognoses for tunnels in the Andes / Geothermische Prognose für Andentunnel". In: *Geomechanics and Tunnelling* 3 (5 2010), S. 622–633. ISSN: 18657362.
- [59] Hofinger, H. und Kohlböck, D. *Wirtschaftliche Optimierung von Tunnelthermie®-Absorberanlagen. Grundlagenuntersuchung und Planungsleitfaden*. Wien, 2005.
- [60] Hofmann, K. und Schmitt, D. "Geothermie im Tunnelbau - Konzept für die Nutzung der Geothermie am Beispiel des B 10-Tunnels Rosenstein". In: *Geotechnik* 33 (Nr. 2 2010), S. 135–139.
- [61] HUANG, Y.-d., GAO, W. und KIM, C.-N. "A numerical study of the train-induced unsteady airflow in a subway tunnel with natural ventilation ducts using the dynamic layering method". In: *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* 22 (2 2010), S. 164–172. ISSN: 10016058.
- [62] Hufschmied, P. und Brunner, A. "The exploitation of warm tunnel water through the example of the Lötschberg Base Tunnel in Switzerland / . Nutzung warmer Tunnelwässer am Beispiel des Lötschberg-Basistunnels in der Schweiz". In: *Geomechanics and Tunnelling* 3 (5 2010), S. 647–657. ISSN: 18657362.
- [63] Huysmans, M. und Dassargues, A. "Review of the use of Péclet numbers to determine the relative importance of advection and diffusion in low permeability environments". In: *Hydrogeology Journal* 13 (5-6 2005), S. 895–904. ISSN: 1431-2174.
- [64] ILF und GTH. *Geologischer Bericht (nicht veröffentlicht)*. AS133, Hauptbaumaßnahme H8 - Jenbach. B-AS-TB-88100.e00-027-5056.00-00 (not published). 2005.
- [65] Islam, M. S., Fukuhara, T., Watanabe, H. und Nakamura, A. "Horizontal U-Tube Road Heating System using Tunnel Ground Heat". In: *Journal of Snow Engineering of Japan* 22 (3 2006), S. 229–234. ISSN: 0913-3526.
- [66] Klerk, A. de. "Voidage variation in packed beds at small column to particle diameter ratio". In: *AIChE Journal* 49 (8 2003), S. 2022–2029. ISSN: 00011541.

- [67] Knapp, C. "Energiepfähle: Ein interessantes System zur Energiegewinnung". In: *Wohnen* 1992.Heft: 9 Band: 67 (1992), S. 6–7.
- [68] Knüsel, P. "Erdwärmesonden im Dichtestress". In: *TEC21 – Schweizerische Bauzeitung* (10 2015), S. 26–28.
- [69] Köhler, M., Maidl, U. und Martak, L. "Abrasive wear and tool wear in shield tunnelling in soil / Abrasivität und Werkzeugverschleiß beim Schildvortrieb im Lockergestein". In: *Geomechanics and Tunnelling* 4 (1 2011), S. 36–54. ISSN: 18657362.
- [70] Krähenmann, S., Walter, A., Brienen, S., Imbery, F. und Matzarakis, A. "High-resolution grids of hourly meteorological variables for Germany". In: *Theoretical and Applied Climatology* 131 (3-4 2018), S. 899–926. ISSN: 0177-798X.
- [71] Kürten, S. "Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermoaktiven Bauteilen". Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2014.
- [72] Laasch, T. und Laasch, E. *Haustechnik. Grundlagen, Planung, Ausführung*. 13., durchges. und akt. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013. XVII, 919 S. 909 Abb. ISBN: 978-3-8348-1260-5.
- [73] Lahme, A. "Dynamische Simulation des Wärmebedarfs zur besseren Dimensionierung von Erdwärmesonden". In: *Geothermische Energie* 3 (74 2012), S. 22–25.
- [74] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser. *Grundlagen zur Beurteilung des Einsatzes von Wärmepumpen aus wasserwirtschaftlicher Sicht*. Frankfurt am Main, 1980.
- [75] Lee, C., Park, S., Choi, H.-J., Lee, I.-M. und Choi, H. "Development of energy textile to use geothermal energy in tunnels". In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 59 (2016), S. 105–113. ISSN: 08867798.
- [76] Lee, C., Park, S., Won, J., Jeoung, J., Sohn, B. und Choi, H. "Evaluation of thermal performance of energy textile installed in Tunnel". In: *Renewable Energy* 42 (2012), S. 11–22. ISSN: 0960-1481.
- [77] Li, X., Chen, Z. und Zhao, J. "Simulation and experiment on the thermal performance of U-vertical ground coupled heat exchanger". In: *Applied Thermal Engineering* 26 (14-15 2006), S. 1564–1571. ISSN: 13594311.
- [78] López González, M., Galdo Vega, M., Fernández Oro, J. M. und Blanco Marigorta, E. "Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels". In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 40 (2014), S. 22–37. ISSN: 08867798.
- [79] Markiewicz, R. "Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau". Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Dissertation. Wien: Technische Universität Wien, 2004. 345 S.
- [80] Martin, H. "Nusselt's Fundamental Law of Heat Transfer—Revisited". In: *Heat Transfer Engineering* 35 (3 2013), S. 246–250. ISSN: 0145-7632.

- [81] Marx, R., Nußbicker-Lux, J., Bauer, D., Heidemann, W. und Drück, H. "Saisonale Wärmespeicher - Bauarten, Betriebsweise und Anwendungen". In: *Chemie Ingenieur Technik* 83 (11 2011), S. 1994–2001. ISSN: 0009286X.
- [82] Mayer, P.-M. und Franzius, J. N. "Thermische Berechnungen im Tunnelbau". In: *Geotechnik* 33 (Nr. 2 2010), S. 145–151.
- [83] Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S. und Blum, P. "Subsurface urban heat islands in German cities". eng. In: *The Science of the total environment* 442 (2013). Journal Article Research Support, Non-U.S. Gov't, S. 123–133. eprint: 23178772.
- [84] Meyer, B. *Wärmeversorgung Rankwog Trimbach (DIS Proj. 19'249). Wärmenutzung Hauensteintunnel Trimbach*. Schlussbericht April 2003. Lenzburg: Bundesamt für Energie, Schweiz, 2003.
- [85] Minkowycz, W. J., Haji-Sheikh, A. und Vafai, K. "On departure from local thermal equilibrium in porous media due to a rapidly changing heat source. The Sparrow number". In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42 (18 1999), S. 3373–3385. ISSN: 0017-9310.
- [86] Mirsadeghi, M., Cóstola, D., Blocken, B. und Hensen, J.L.M. "Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs. Implementation and uncertainty". In: *Applied Thermal Engineering* 56 (1-2 2013), S. 134–151. ISSN: 13594311.
- [87] Moormann, C. und Buhmann, P. *Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln*. Bd. 141. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen : B, Brücken- und Ingenieurbau. Bergisch Gladbach, 2017.
- [88] Moormann, C., Buhmann, P., Friedemann, W., Homuth, S. und Pralle, N. "Tunnel geothermics - International experience with renewable energy concepts in tunnelling / Tunnelgeothermie - Internationale Erfahrungen zu regenerativen Energiekonzepten im Tunnelbau". In: *Geomechanics and Tunnelling* 9 (5 2016), S. 467–480.
- [89] Murray, J. und Heggie, D. "From urban to national heat island. The effect of anthropogenic heat output on climate change in high population industrial countries". In: *Earth's Future* 4 (6 2016), S. 298–304. ISSN: 23284277.
- [90] Nicholson, D. P., Chen, Q., Silva, M. de, Winter, A. und Winterling, R. "The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK". In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability* 167 (3 2014), S. 118–134. ISSN: 1478-4629.
- [91] Nielsen, K. *Thermal Energy Storage A State-of-the-Art. A report within the research program Smart Energy-Efficient Buildings at NTNU and SINTEF 2002-2006*. Trondheim, Norwegen, 2003.
- [92] Nillert, P., Bachmann, A. und Nillert, D. "Lagerungsabhängige Durchlässigkeit von Kies-/Sand- und Glaskugelfilterschüttungen". In: *Grundwasser* 20 (2 2015), S. 117–125. ISSN: 1430-483X.

- [93] Ninikas, K., Hytiris, N., Emmanuel, R., Aaen, B. und Younger, P. L. "Heat recovery from air in underground transport tunnels". In: *Renewable Energy* 96 (2016), S. 843–849. ISSN: 0960-1481.
- [94] Oosterkamp, A., Ytrehus, T. und Galtung, S. T. "Effect of the choice of boundary conditions on modelling ambient to soil heat transfer near a buried pipeline". In: *Applied Thermal Engineering* 100 (2016), S. 367–377. ISSN: 13594311.
- [95] Pannike, S., Kölling, M., Schulz, H. D., Panteleit, B., Reichling, J. und Scheps, V. "Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahren von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten". German. In: *Grundwasser* 11 (1 2006), S. 6–18. ISSN: 1430-483X.
- [96] Revesz, A., Chaer, I., Thompson, J., Mavroulidou, M., Gunn, M. und Maidment, G. "Ground source heat pumps and their interactions with underground railway tunnels in an urban environment. A review". In: *Applied Thermal Engineering* 93 (2016), S. 147–154. ISSN: 13594311.
- [97] Richter, T. *Verwendung von Erdwärme zur Schnee- und Eisfreihaltung von Freiflächen*. Bd. 2. Berichte des Instituts für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl., 2009. VII, S. 8-373. ISBN: 978-3-8167-8213-1.
- [98] *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. RABT*. Ausg. 2006, korrigierter Nachdr. Bd. 339. FGSV. Köln: FGSV-Verl., 2010. 67 Seiten. ISBN: 3937356878.
- [99] Rohne, E. "Die instationäre Luftströmung in U-Bahn-Tunneln. Eine Näherungslösung zur Berechnung des Anfachvorganges". In: *SCHWEIZERISCHE BAUZEITUNG* 95 (40 1977), S. 705–711.
- [100] Rybach, L. *Die geothermischen Verhältnisse in der Schweiz*. Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure. Zürich: ETH Zürich, 1982.
- [101] Rybach, L. "Innovative energy-related use of shallow and deep groundwaters — Examples from China and Switzerland". In: *Central European Geology* 58 (1-2 2015), S. 100–113. ISSN: 1788-2281.
- [102] Rybach, L., Wilhelm, J. und Gorhan, H. "Geothermal use of tunnel waters – a Swiss speciality". In: *International Geothermal Conference, Reykjavik, 2003*. Hrsg. von Jardhitafelag Islands. Reykjavik, 2003, S. 17–23.
- [103] Rybach, L., Wilhelm, J. und Gorhan, H. "Geothermal use of tunnel waters – a Swiss speciality". In: *International Geothermal Conference IGC-2003*, S. 1–7.
- [104] Sanner, B. "Entwicklung und Stand von Normen und Richtlinien für oberflächennahe Geothermie im In- und Ausland". In: *bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau* 69 (07/08 2018), S. 62–69.
- [105] Sanner, B. "Ground Source Heat Pumps. Ground Source Heat Pumpshistory, development, current status, and future prospects". In: *Proceedings of 12th IEA Heat Pump Conference. Rotterdam, June 2017*. Hoogland: Phetradico Communication and Publishing, 2017. ISBN: 978-90-9030412-0.

- 
- [106] Schack, A. und Schack, K. *Der industrielle Wärmeübergang. Für Praxis und zum Studium mit erläuternden Zahlenbeispielen*. Aufl. 8, vollständig überarb. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1983. VIII, 212 S ; ISBN: 9783514002777.
- [107] Schmölzer, G. "Tunnellüftungsanlagen und deren Regelung. Messungen und Untersuchungen für eine erfolgreiche Inbetriebnahme". Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik. Dissertation. Graz: Technischen Universität Graz, 2016.
- [108] Schneider, M. "Zur energetischen Nutzung von Tunnelbauwerken - Messungen und numerische Berechnungen am Beispiel Fasanenhof". Institut für Geotechnik. Mitteilung 68 des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2013.
- [109] Schneider, M., Vermeer, P. und Moormann, C. "Großversuche zur Gewinnung von Erdwärme im Lias alpha". In: *Geotechnik* 33 (Nr. 2 2010), S. 140–144.
- [110] Scholz, M. und Wendl, K. "Vortriebsbedingte Verdichtung der Ortsbrust bei Mixschildvortrieben. Face compaction during Mix Shield Drives". In: *18. Tagung für Ingenieurgeologie*. Berlin, 2011, S. 229–235.
- [111] Schweizer, A. *Berechnung des Wärmeübergangs an verschiedenen Bauteilformen. Formelsammlung und Berechnungsprogramme Anlagenbau*. Friedrichshafen, 2018.
- [112] Schweizerischen Vereinigung für Geothermie SVG. *Tunnelgeothermie - Eine lokale Energiequelle, die es zu packen gilt*. Technische Notizen 4. Neuchâtel, 2012.
- [113] Schweizerischen Vereinigung für Geothermie SVG. *Tunnelgeothermie Eine nutzenswerte Energiequelle im Land der Tunnels*. Neuchâtel, 2008.
- [114] Statistisches Bundesamt. *Pressemitteilungen - Energieverbrauch privater Haushalte für Wohnen 2017 erneut gestiegen - Statistisches Bundesamt (Destatis)*. Wiesbaden, 2018.
- [115] Tong, Y., Zhai, J., Wang, C., Zhou, B. und Niu, X. "Possibility of using roof openings for natural ventilation in a shallow urban road tunnel". In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 54 (2016), S. 92–101. ISSN: 08867798.
- [116] *TRAIN rig - Birmingham Centre for Rail Research and Education - University of Birmingham*. 2016.
- [117] Treiber, M. und Kesting, A. *Verkehrsdynamik und -simulation. Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Bd. 1183. Springer-Lehrbuch. Heidelberg: Springer, 2010. XII, 368 str. ISBN: 978-3-642-05227-9.
- [118] Umweltministerium Baden-Württemberg. *Arbeitshilfe zum Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen*. 1. Auflage. Stuttgart, 2009. 48 S.
- [119] Unterberger, W., Hofinger, H., Grünstäudl, T., Adam, D. und Markiewicz, R. "Utilization of Tunnels as Source of Ground Heat and Cooling - Practical Applications in Austria". In: *Proceedings of the 2004 ISRM international symposium - Third Asian Rock Mechanics Symposium*. Asian Rock Mechanics Symposium (Kyoto, Japan). Hrsg. von Ohnishi, Y. und Aoki, K. 2004.
-

- [120] van Basshuysen, R. und Schäfer, F., Hrsg. *Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven ; mit 1804 Abbildungen und mehr als 1400 Literaturstellen*. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. 1 online resource. ISBN: 978-3-658-04677-4.
- [121] *VDI-Wärmeatlas*. 10., bearbeitete und erw. Aufl. VDI Buch. Berlin: Springer, 2006. 1 online resource ([1432]). ISBN: 3-540-25504-4.
- [122] Verband Beratender Ingenieure. *Oberflächennahe Geothermie*. 3. überarbeitete Auflage. Bd. 18. VBI-Schriftenreihe. Berlin: VBI, 2012. 97 S.
- [123] Verein Deutscher Ingenieure, Hrsg. *Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen*. Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Mai 2008.
- [124] Verein Deutscher Ingenieure e.V., Hrsg. *VDI 4640 Blatt 1 - Thermische Nutzung des Untergrunds, Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*. Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Juni 2010.
- [125] Verein Deutscher Ingenieure e.V., Hrsg. *VDI 4640 Blatt 2 - Thermische Nutzung des Untergrundes -Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Mai 2015.
- [126] W. Churchill, S. "Friction-Factor Equation Spans all Fluid-Flow Regimes". In: *Chemical Engineering (New York)* 84 (1977), S. 91–92.
- [127] *Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis*. 5., überarb. und erw. Aufl. 2014. SpringerLink : Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. 1 online resource (Online-Ressource). ISBN: 978-3-642-37731-0.
- [128] *Warmwasser Furkatunnel. Ein Projekt der Gemeinde Obergoms (Oberwald und neu evtl. Obergesteln): Wärme aus dem Furkatunnel*. Münster-Geschinen, 2018.
- [129] Watkins, R., Palmer, J., Kolokotroni, M. und Littlefair, P. "The balance of the annual heating and cooling demand within the London urban heat island". In: *Building Services Engineering Research and Technology* 23 (4 2016), S. 207–213. ISSN: 0143-6244.
- [130] Weißmann, C. und Wörner, P. "Entwicklung von thermischen Gebäudelastprofilen für die Dimensionierung von Wärmeezeugern und zur Simulation von Nahwärmenetzen". In: *Bauphysik* 39 (5 2017), S. 291–298. ISSN: 01715445.
- [131] Welsch, B., Rühaak, W., Schulte, D. O., Formhals, Ju., Bär, K. und Sass, I. "Co-Simulation of Geothermal Applications and HVAC Systems". In: *Energy Procedia* 125 (2017), S. 345–352. ISSN: 18766102.
- [132] Wittke, M. "Einflüsse auf den Entwurf von Tunneln im anhydritführenden Gebirge". In: *mining + geo* 2012 (Nr. 4), S. 644–648.
- [133] Wöhrle, D. "Was ist Licht?" In: *Chemie in unserer Zeit* 49 (6 2015), S. 386–401. ISSN: 00092851.

- [134] Yang, J., Wang, J., Bu, S., Zeng, M., Wang, Q. und Nakayama, A. "Experimental analysis of forced convective heat transfer in novel structured packed beds of particles". In: *Chemical Engineering Science* 71 (2012), S. 126–137. ISSN: 00092509.
- [135] Zhang, G., Xia, C., Yang, Y., Sun, M. und Zou, Y. "Experimental study on the thermal performance of tunnel lining ground heat exchangers". In: *Energy and Buildings* 77 (2014), S. 149–157. ISSN: 0378-7788.
- [136] Zhang, N. und Wang, Z. "Review of soil thermal conductivity and predictive models". In: *International Journal of Thermal Sciences* 117 (2017), S. 172–183. ISSN: 12900729.
- [137] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. und Fox, D. *The finite element method for solid and structural mechanics*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. 1 online resource (xxxi, 624. ISBN: 978-1-85617-634-7.



# Anhang A

## Anhang zu Kapitel 4.1

Die Grundlage der Untersuchungen zum Einfluss der Randbedingung zur Abbildung der Wärmetransportvorgänge an der GOK bilden zwei numerische Simulationsmodelle, für die lediglich Wärmetransport durch Wärmeleitung im Mehrphasenmedium Boden gemäß Gleichung A.1 gelöst wird.

$$\rho c_{p,eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda_{eff} \cdot \nabla T) = \dot{Q} \quad (\text{A.1})$$

Die Abbildung A.1 links zeigt ein eindimensionales Berechnungsmodell, an dem am oberen Modellrand eine Randbedingung 3. Art (Wärmeübergang) die klimatischen Verhältnisse an der GOK vereinfacht abbildet. In diskreten Abständen von der GOK werden die simulierten Bodentemperaturen abgegriffen und mit gemessenen Bodentemperaturen verglichen. Ziel dieser Untersuchung ist zu zeigen, dass unter der Verwendung eines rein konvektiv getriebenen Wärmeübergangs an der GOK Bodentemperaturen ausreichend genau nachsimuliert werden können und auf die Abbildung sämtlicher Wärmeströme (vgl. Kapitel 4.1) bei der Simulation von TGTAn verzichtet werden kann.

Die Abbildung A.1 rechts zeigt ein zweidimensionales Berechnungsmodell, bestehend aus dem Boden und einem Abzugskörper, der den Tunnelluftraum repräsentiert. Am oberen Modellrand wird wahlweise eine Randbedingung 1. Art in Form einer konstanten Temperatur oder eine Randbedingung 3. Art in Form eines konvektiven Wärmeübergangs berücksichtigt. Am Rand des Abzugskörpers repräsentiert eine konstante Temperaturrandbedingung die Absorbertemperatur einer TGTA. Ziel der Untersuchungen an diesem Modell ist zu zeigen, welche Bedeutung der Wahl der Randbedingung an der GOK bei hoch liegenden Tunneln zukommt.

Für beide Berechnungsmodelle wurden die wirkenden Randbedingungen und thermischen Untergrundeigenschaften auf der Basis der Klimastation des deutschen Wetterdienstes „Stuttgart/Echterdingen“ berücksichtigt.

An dieser Station wird neben den üblichen Klimadaten wie der Lufttemperatur in 2,0 m über der GOK, der Windgeschwindigkeit u.a. die Temperatur im Untergrund in den Tiefen 5, 10, 20 und 50 cm aufgezeichnet. Die Abbildung A.2 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigten Messdaten für die Jahre 2011 - 2017.

Zur Bestimmung der Bodenart am Standort „Stuttgart/Echterdingen“ wurden zwei repräsentative Bodenproben aus relevanten Bodenschichten entnommen und mittels einer Schlämmanalyse untersucht (siehe Abbildung A.3).

Im Ergebnis ist der anstehende Boden als Schluff zu beschreiben, der einen Wassergehalt zwischen 18,6 - 21,1 % besitzt. Die thermischen Eigenschaften dieses fast wassergesättigten Bodens wurden in Anlehnung an [124], Tabelle 1 als effektive, das gesamte

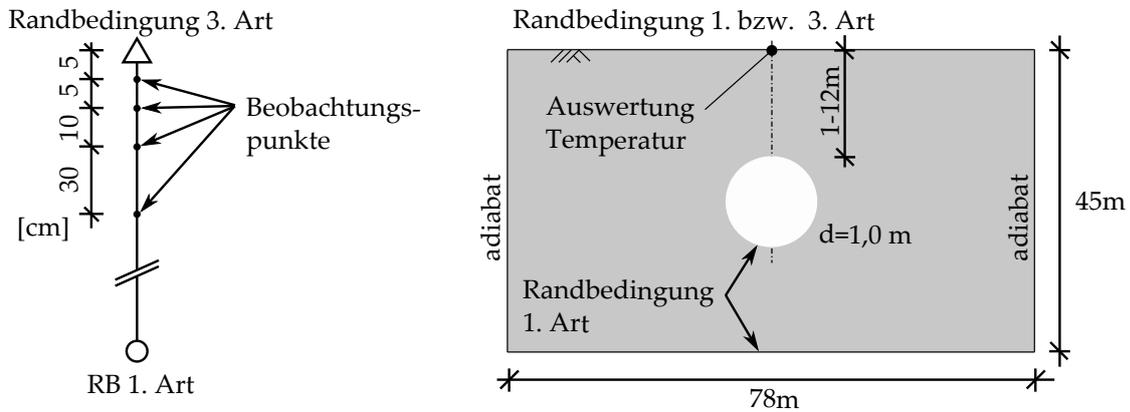


Abbildung A.1: Simulationsmodelle zur Untersuchung des Einflusses der thermischen Randbedingung an der GOK, links: Modell 1, rechts: Modell 2

Tabelle A.1: Klimastation Stuttgart/Echterdingen

| Klimastation Stuttgart/Echterdingen |         |
|-------------------------------------|---------|
| Stations-Kennziffer                 | 10738   |
| StationsID                          | 4931    |
| ICAO-Kennung                        | EDDS    |
| Stationshöhe mNHN                   | 371     |
| geogr. Breite                       | 48° 41' |
| geogr. Länge                        | 09° 13' |
| Beginn Klimareihe                   | 1953    |

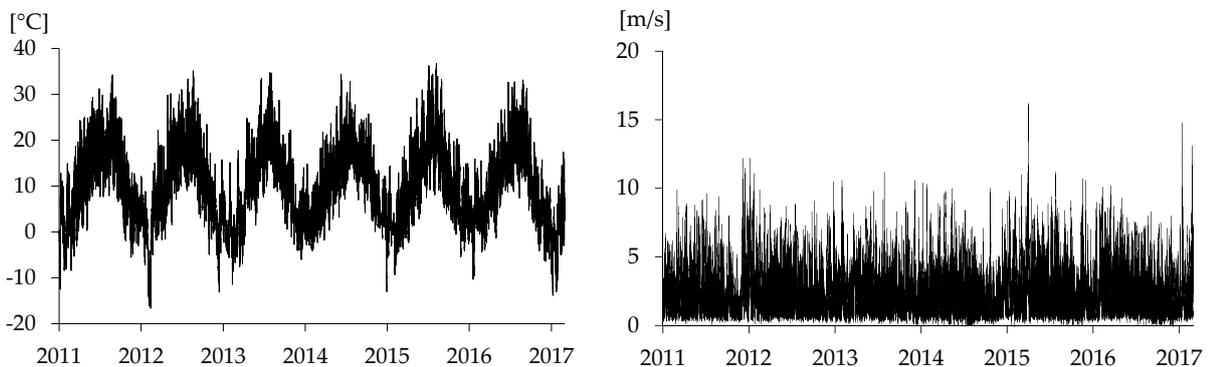


Abbildung A.2: Klimadaten der Station 4931, links: Lufttemperatur 2,0 m über GOK, rechts: Windgeschwindigkeit

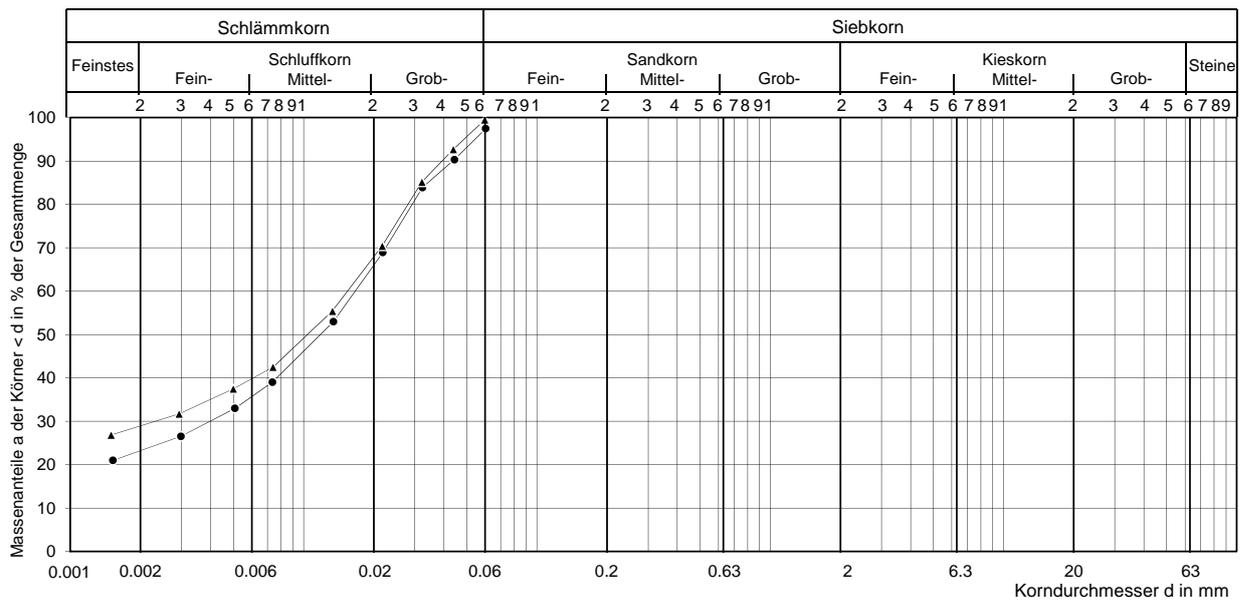


Abbildung A.3: Kornverteilungskurven an zwei repräsentativen Bodenproben des Standortes „Stuttgart/Echterdingen“, Entnahmetiefe ca. 50 cm unter GOK

Mehrphasenmedium Boden beschreibende Parameter berücksichtigt. Für das Berechnungsmodell 2 wurden ergänzende Untersuchungen unter Berücksichtigung thermischer Bodenparameter für einen trockenen Schluff und einen Quarzit durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse zum Modell 2 werden im Hauptteil dieser Arbeit vorgestellt und diskutiert. Nachfolgend werden ausschließlich die Ergebnisse des Modells vorgestellt.

Der Beschreibung des Wärmeübergangs an der GOK wird der empirische Zusammenhang nach [111] gemäß Gleichung A.2 zu Grunde gelegt.

$$\begin{aligned}
 \dot{q} &= \alpha \cdot (T_{2m} - T_{GOK}) \\
 \alpha &= 1,8 + 4 \cdot u \text{ für } u < 5 \text{ m/s} \\
 \alpha &= 7,3 \cdot u^{0,73} \text{ für } u \geq 5 \text{ m/s}
 \end{aligned}
 \tag{A.2}$$

Auf die Berechnung einer bodennahen Temperatur aus der gemessenen Temperatur in 2,0 m über der GOK wie z.B. in [71] wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Die Abbildung A.4 zeigt die gemessenen und simulierten Bodentemperaturen über den betrachteten Zeitraum von 2011 - 2017.

Deutlich zu erkennen ist die mit zunehmender Tiefe abnehmende Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Bodentemperatur. So liegt die über den gesamten Betrachtungszeitraum gemittelte Temperaturabweichung in einer Tiefe von 5 cm bei ca. 0,52 K und reduziert sich in einer Tiefe von 50 cm auf ca. 0,31 K. Für den untersuchten Standort „Stuttgart/Echterdingen“ zeigen die Ergebnisse der Simulation, dass unter dem Ansatz eines rein konvektiven Wärmeübergangs an der GOK das Temperaturfeld

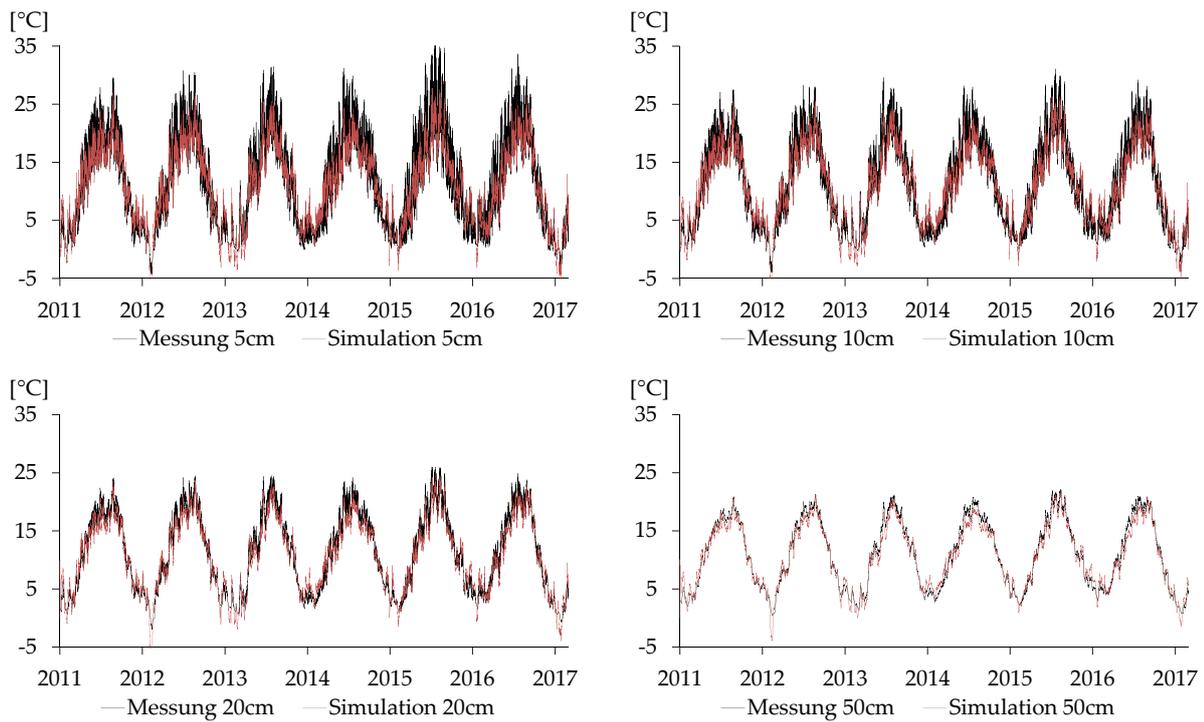


Abbildung A.4: Vergleich der gemessenen und simulierten Bodentemperatur am Standort „Stuttgart/Echterdingen“

im Boden für Untersuchungen im Bereich der Tunnelgeothermie ausreichend genau abgebildet werden.

# Anhang B

## Anhang zu Kapitel 4.4.2

### B.1 Hydrogeologische Situation am Tunnel Jenbach

Die hydrologischen Gegebenheiten an der TGTA Jenbach stehen exemplarisch für horizontal ausgerichtete Geothermieabsorber, die unter dem Einfluss von advektivem Wärmetransport im Mehrphasenmedium Boden stehen. Dies gilt neben TGTA z.B. für thermisch aktivierte Schlitzwände oder Reaktionswände aus dem Bereich der Altlastensanierung.

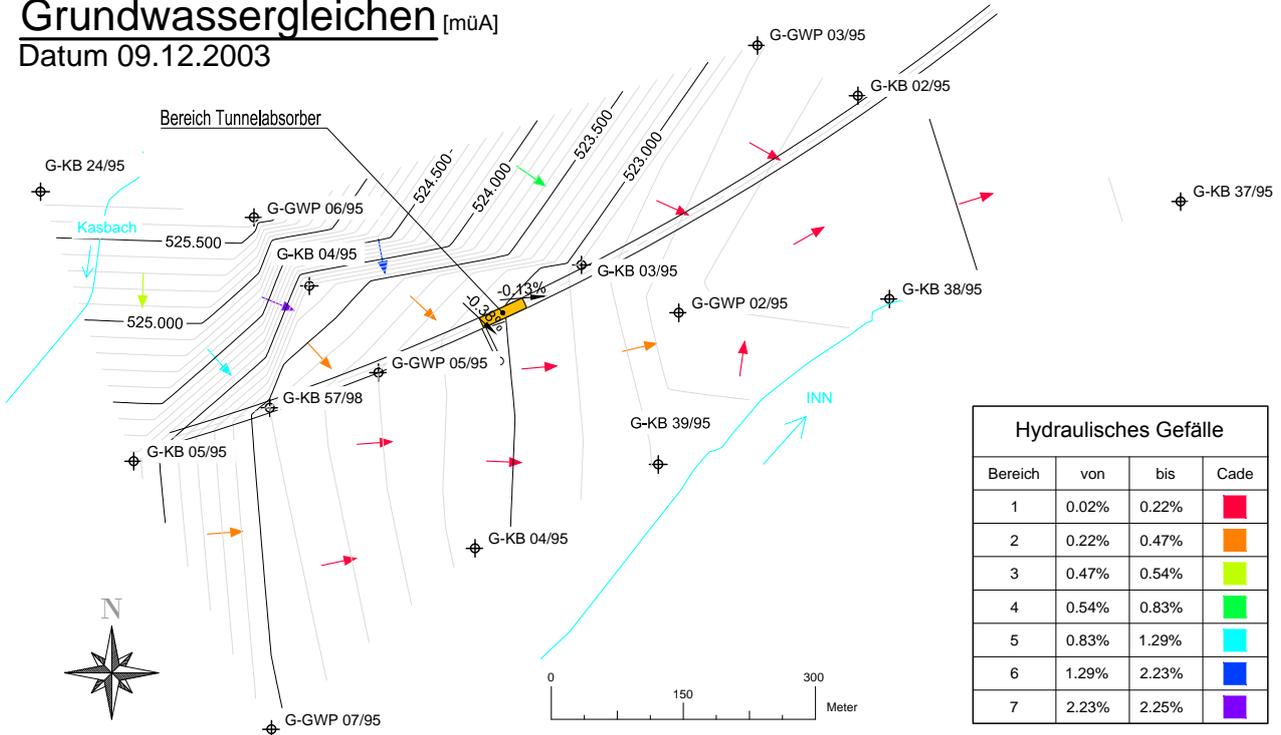
Um das thermische Potential dieser Anlagen prognostizieren zu können, ist eine ausreichend genaue Kenntnis der hydrogeologischen Randbedingungen Grundvoraussetzung. Im Zuge der Planungen zum Tunnel Jenbach wurden zur Beschreibung der hydraulischen Durchlässigkeit des Untergrundes neben direkten Pumpversuchen und Tracer Fluid Loggings auch Auswertungen über die Kornverteilungskurven vorgenommen. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Verfahren streuen über einen Bereich von  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} < k_f < 1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ . Gründe für diese große Streubreite werden in den über mehrere Bodenschichten reichenden Filterstrecken und vorhandenen Wechsellagerungen gesehen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Grundwassergleichen im Bereich der TGTA Jenbach über den Zeitraum von einem Jahr. Hierzu wurden die auf monatlichen Momentanwerten basierenden Pegelganglinien mittels einer Triangulation vernetzt und entsprechende GW-Höhen und GW-Gefälle abgeleitet. Man erkennt, dass sich über den Jahresgang nicht nur das hydraulische Gefälle ändert, sondern im Nahbereichen zum Inn sogar umkehrt. Im thermisch aktivierten Bereich des Tunnels (orange Fläche) liegen nach Auswertung der Grundwassergleichen darüber hinaus unterschiedliche Anström-situationen vor, zu deren genaueren Beschreibung das Messstellennetz der GW-Pegel nicht ausreichend ist. Im Westen der TGTA ist mit einer nahezu senkrechten Anströmung auf den Tunnel zu rechnen, während im Osten der mögliche Anströmwinkel sehr flach gegen die Tunnelachse geneigt ist. Hierdurch ist im Osten mit einer deutlich verminderten Wärmestromdichte gegenüber dem westlichen Anlagenteil zu rechnen.

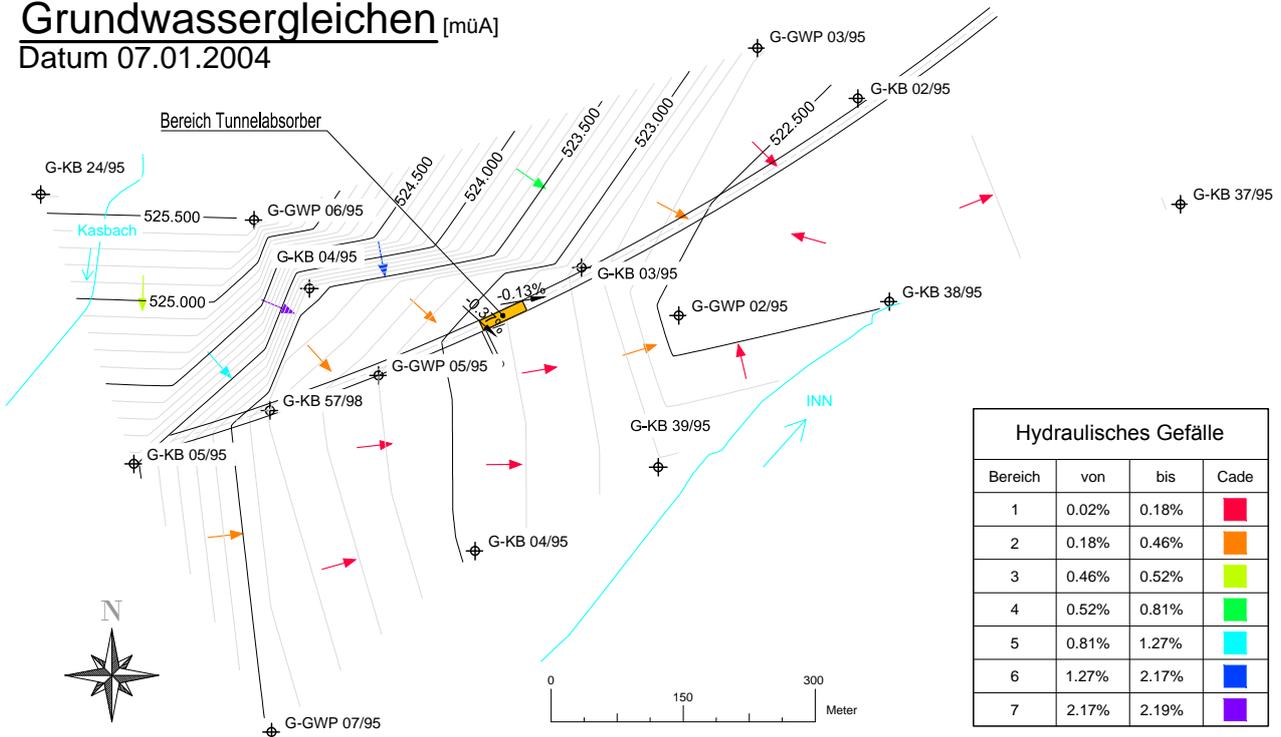
Neben der jahreszeitlich variierenden Anströmsituation ist auch die absolute GW-Temperatur im Bereich der TGTA durch den Inn beeinflusst. Besonders die flussnahen Pegel G-KB-37-95, G-KB-38-95 und G-KB-39-95 zeigen deutliche Unterschiede im Jahresgang, was sich durch infiltrierendes Wasser aus dem Inn begründen lässt. Die landseitigen Pegel zeigen dagegen ein sehr gedämpftes Verhalten mit einer mittleren GW-Temperatur von ca.  $10^\circ\text{C}$ . Am Beispiel der TGTA Jenbach zeigt sich, dass selbst auf der Basis eines für geotechnische Fragestellungen dichten Messstellennetzes und von inten-

siven Versuchen zur Feststellung der hydraulischen Durchlässigkeit des Untergrundes, das thermisch-hydraulische Strömungsregime zur Beantwortung von geothermischen Fragestellungen nur unzureichend beschrieben werden kann.

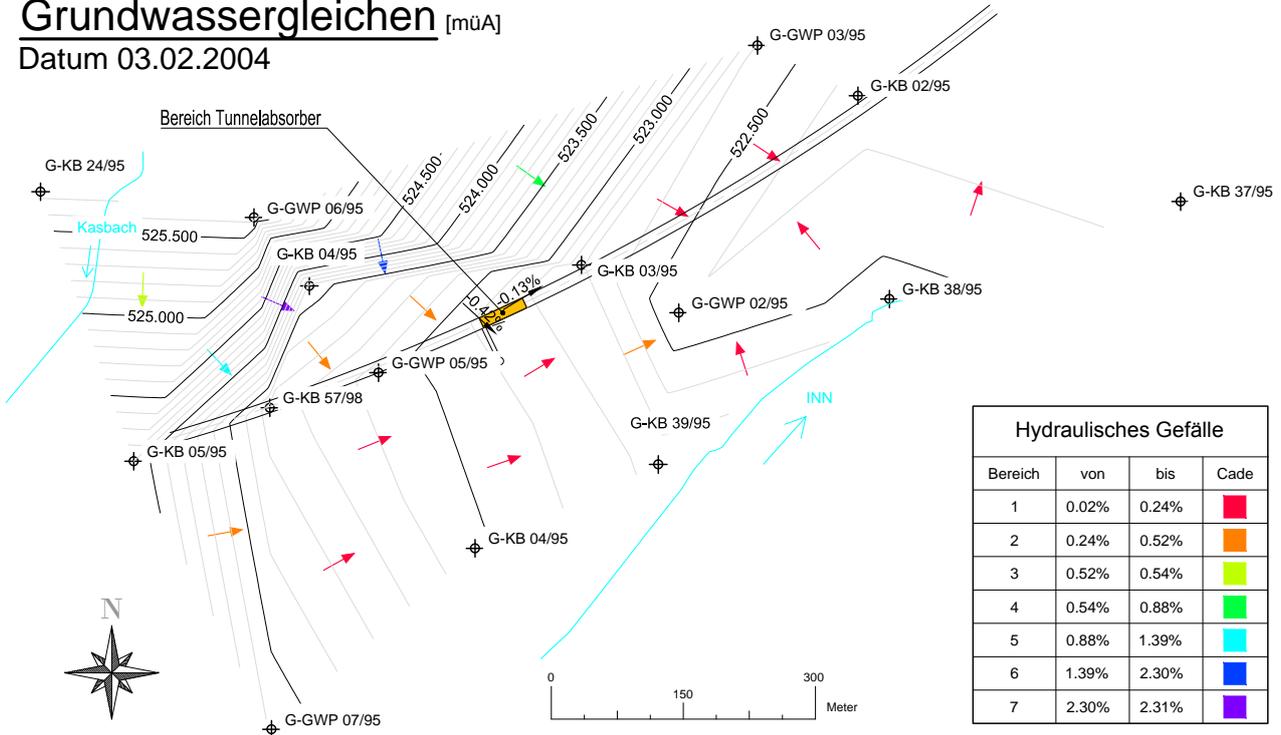
**Grundwassergleichen [müA]**  
Datum 09.12.2003



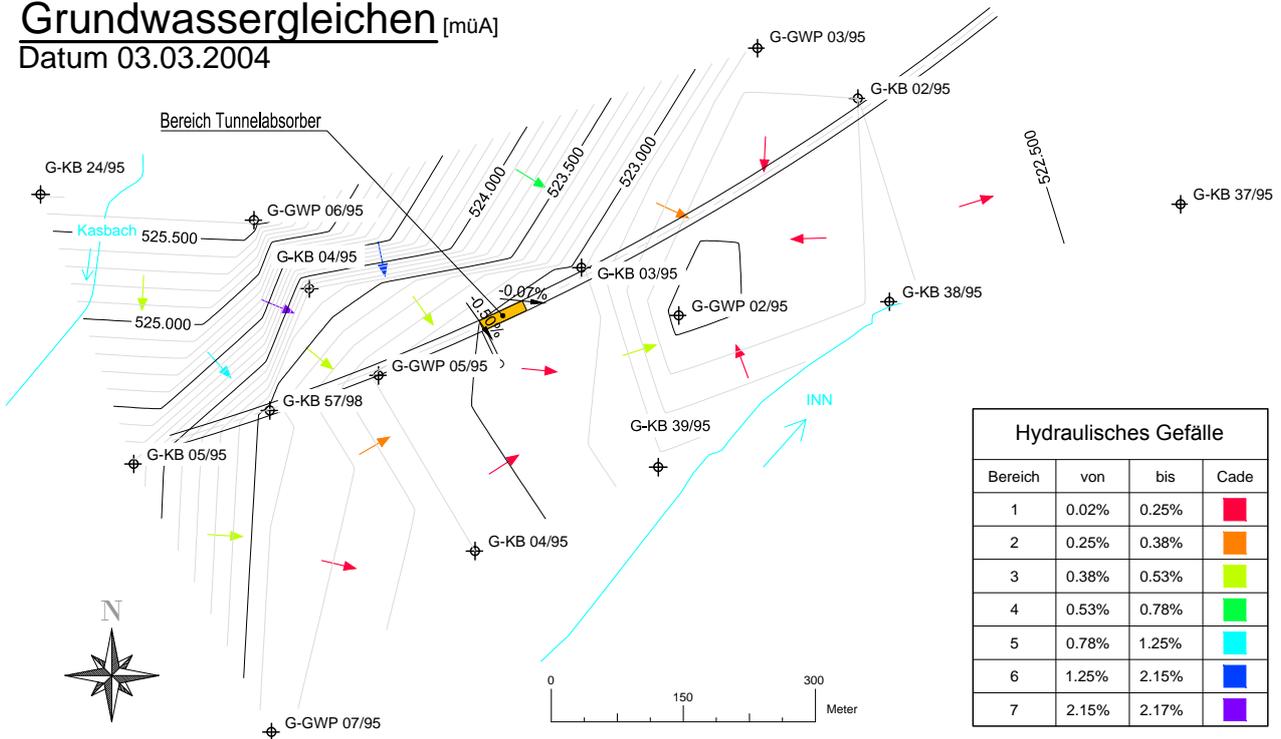
**Grundwassergleichen [müA]**  
Datum 07.01.2004



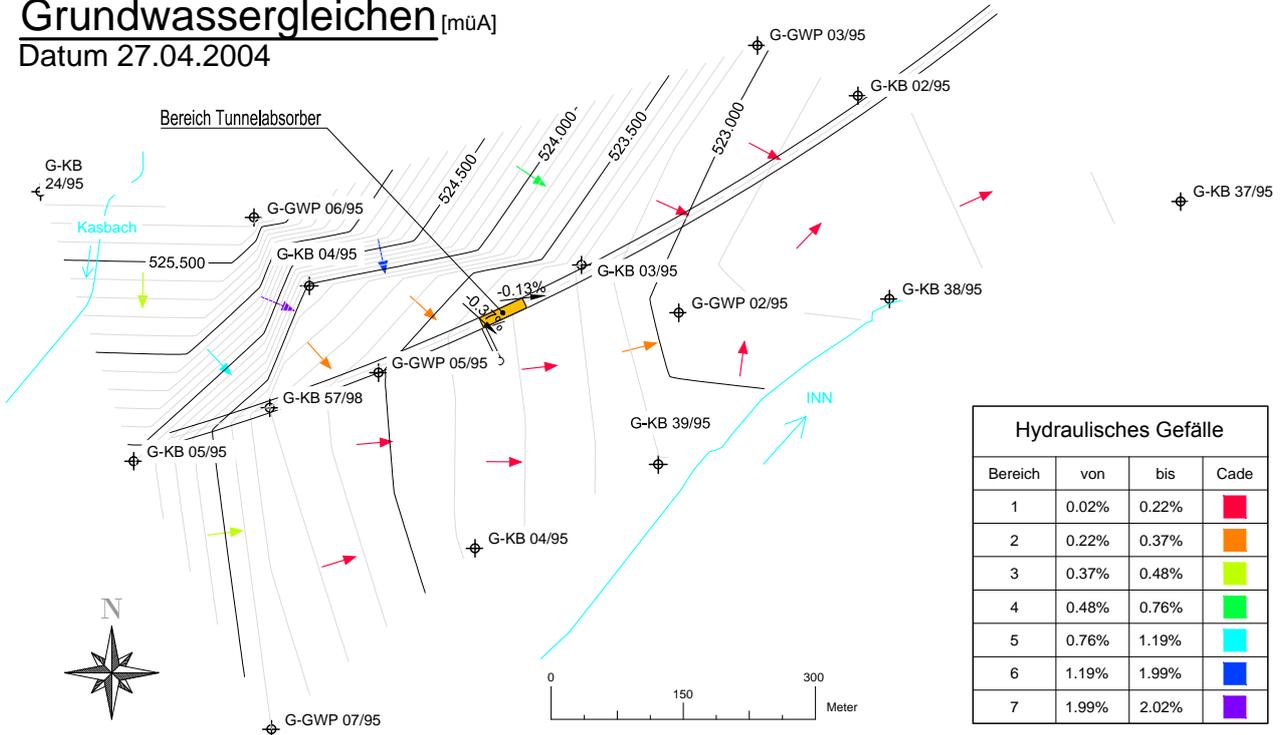
### Grundwassergleichen [müA] Datum 03.02.2004



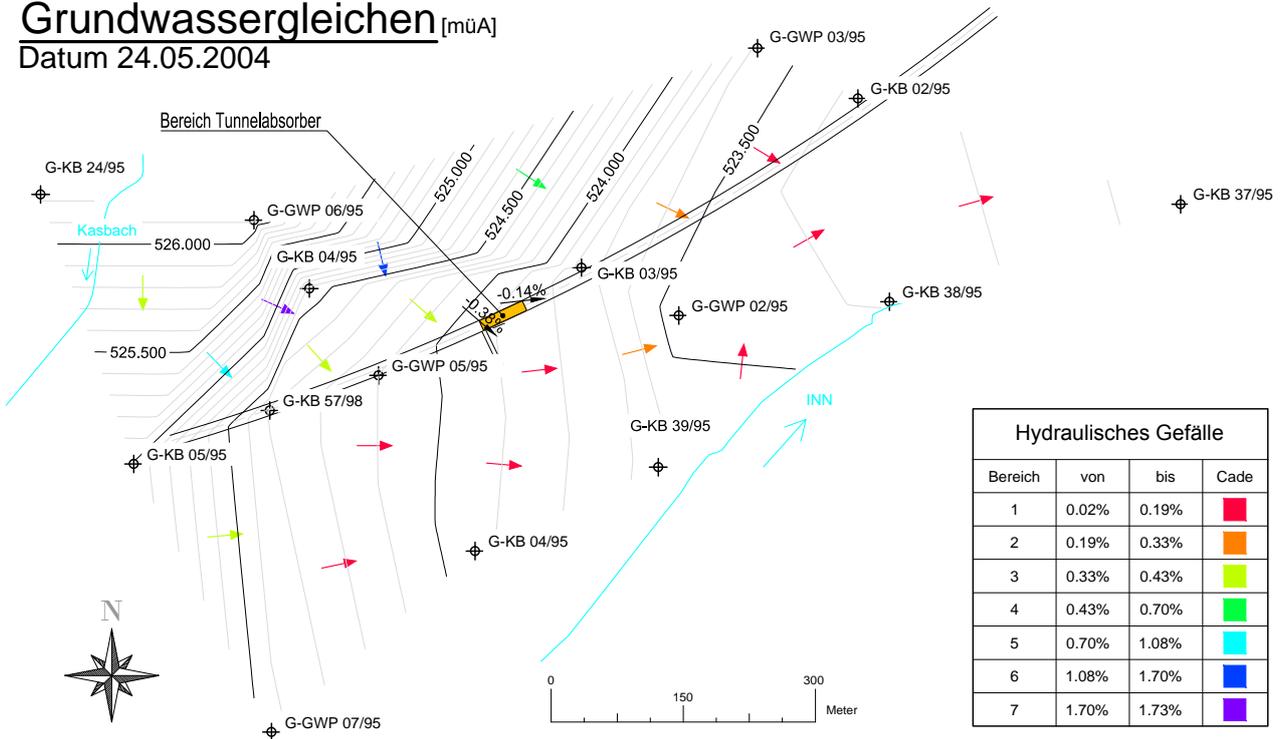
### Grundwassergleichen [müA] Datum 03.03.2004



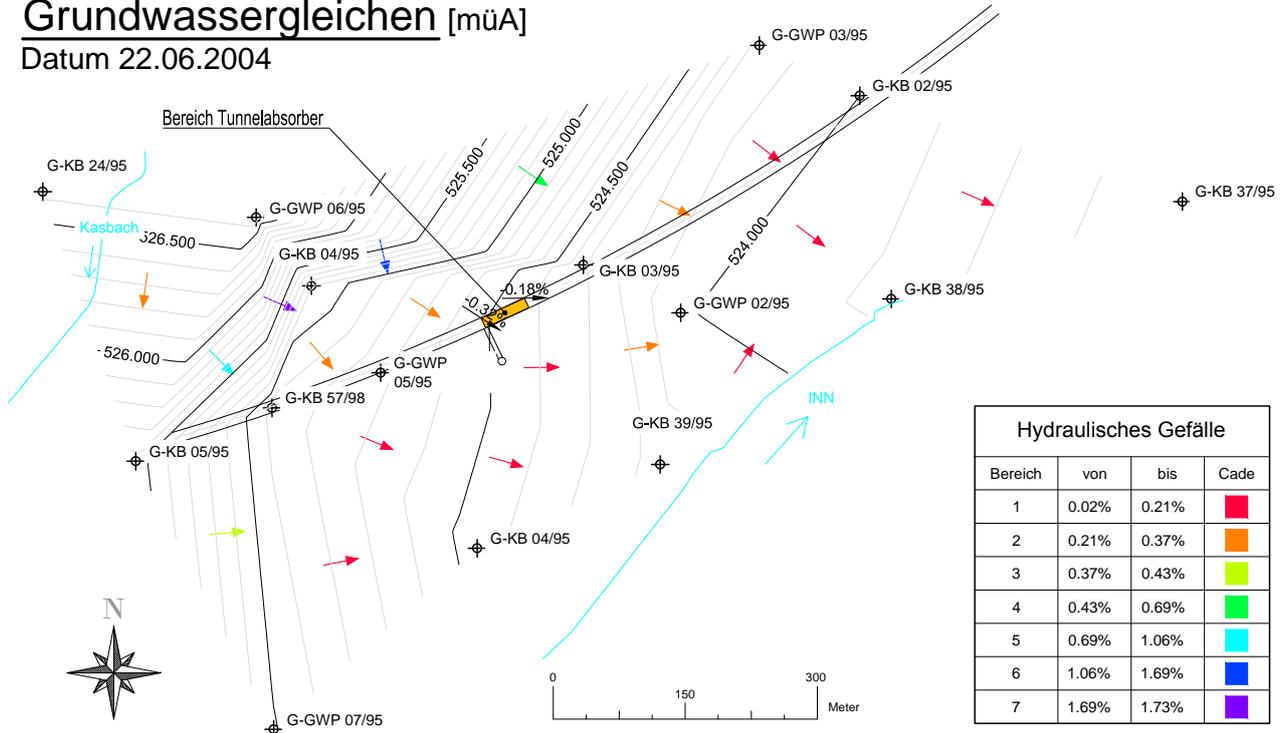
**Grundwassergleichen [müA]**  
Datum 27.04.2004



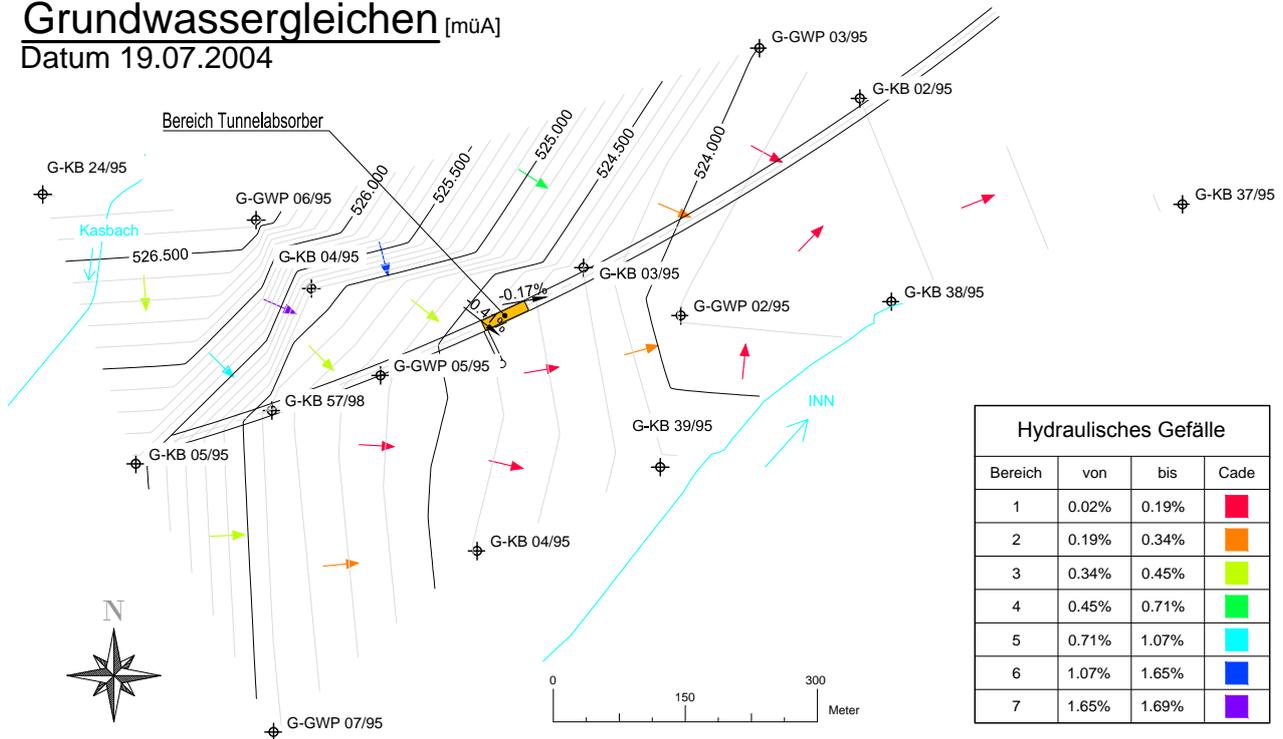
**Grundwassergleichen [müA]**  
Datum 24.05.2004



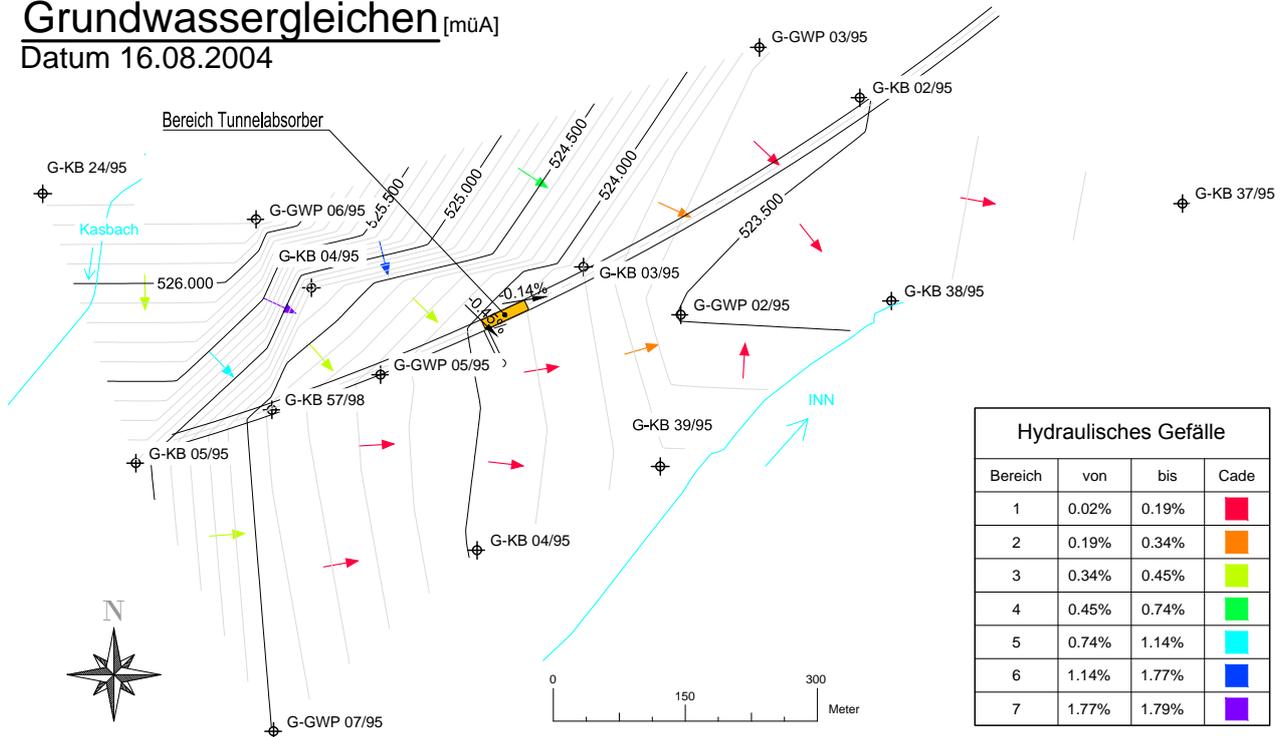
### Grundwassergleichen [müA] Datum 22.06.2004



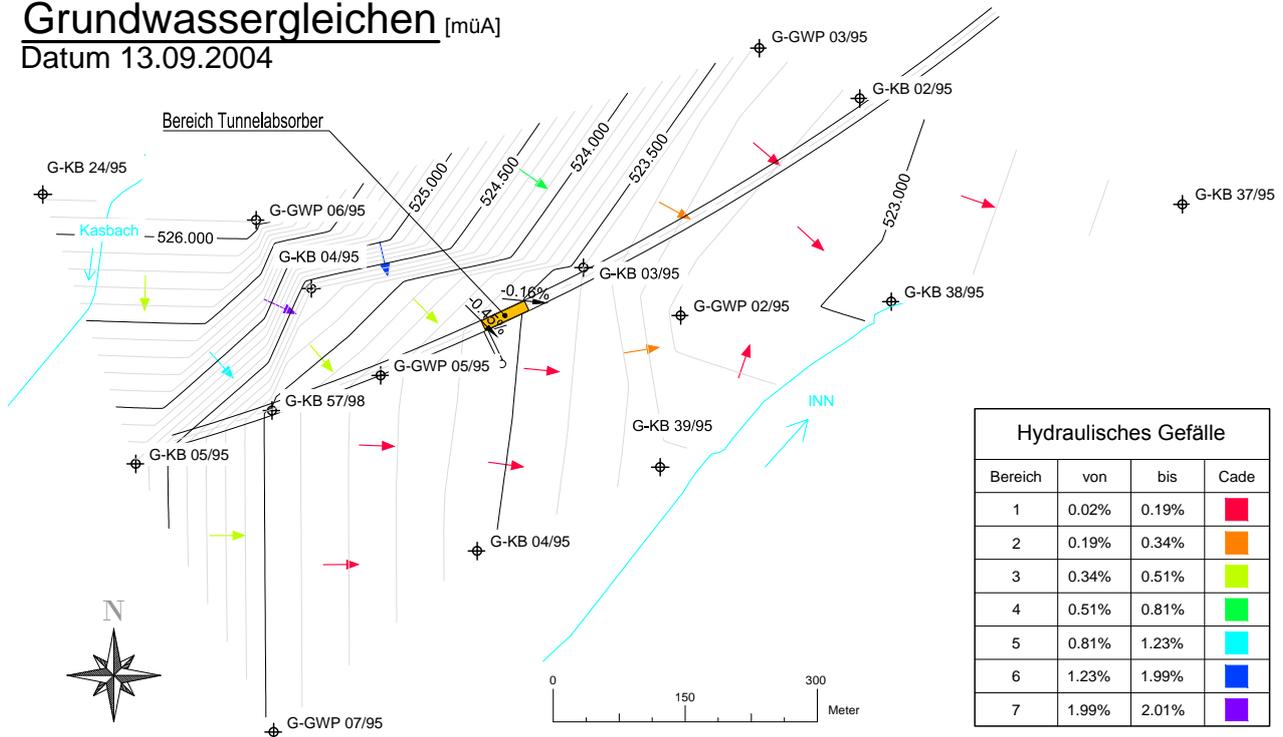
### Grundwassergleichen [müA] Datum 19.07.2004



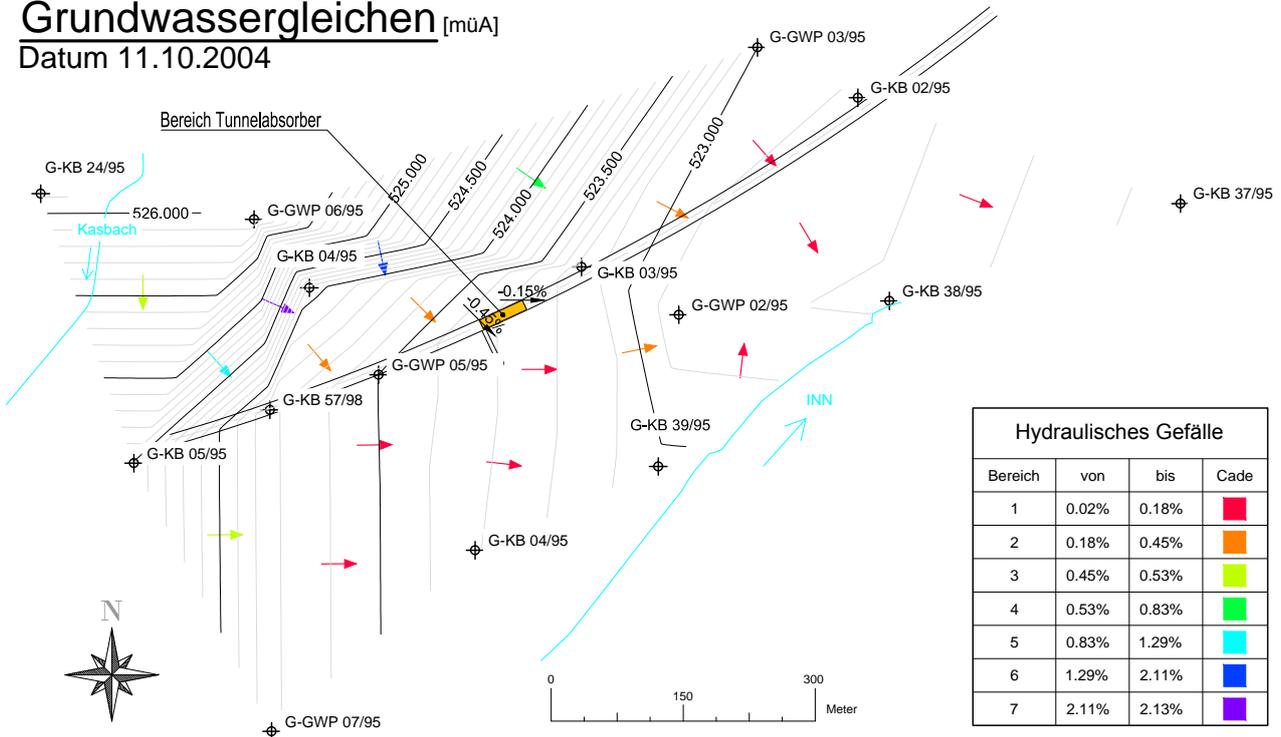
**Grundwassergleichen [müA]**  
Datum 16.08.2004



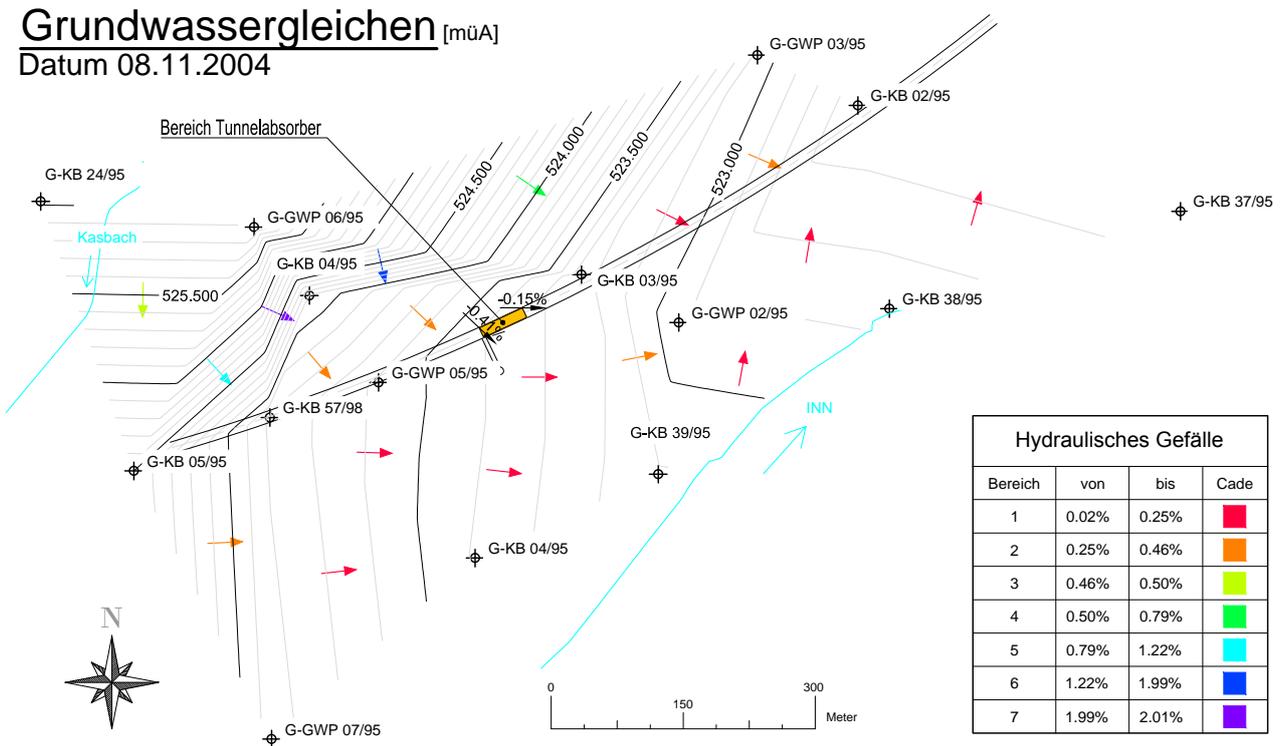
**Grundwassergleichen [müA]**  
Datum 13.09.2004



### Grundwassergleichen [müA] Datum 11.10.2004

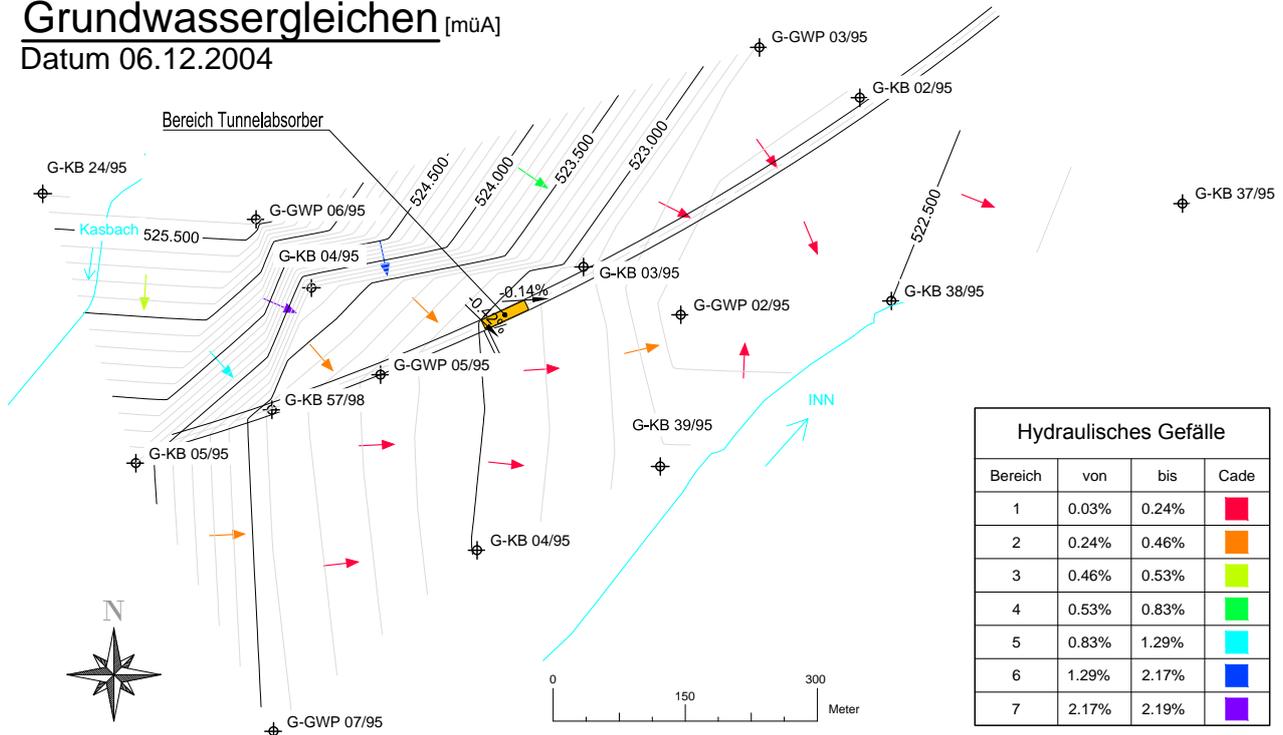


### Grundwassergleichen [müA] Datum 08.11.2004

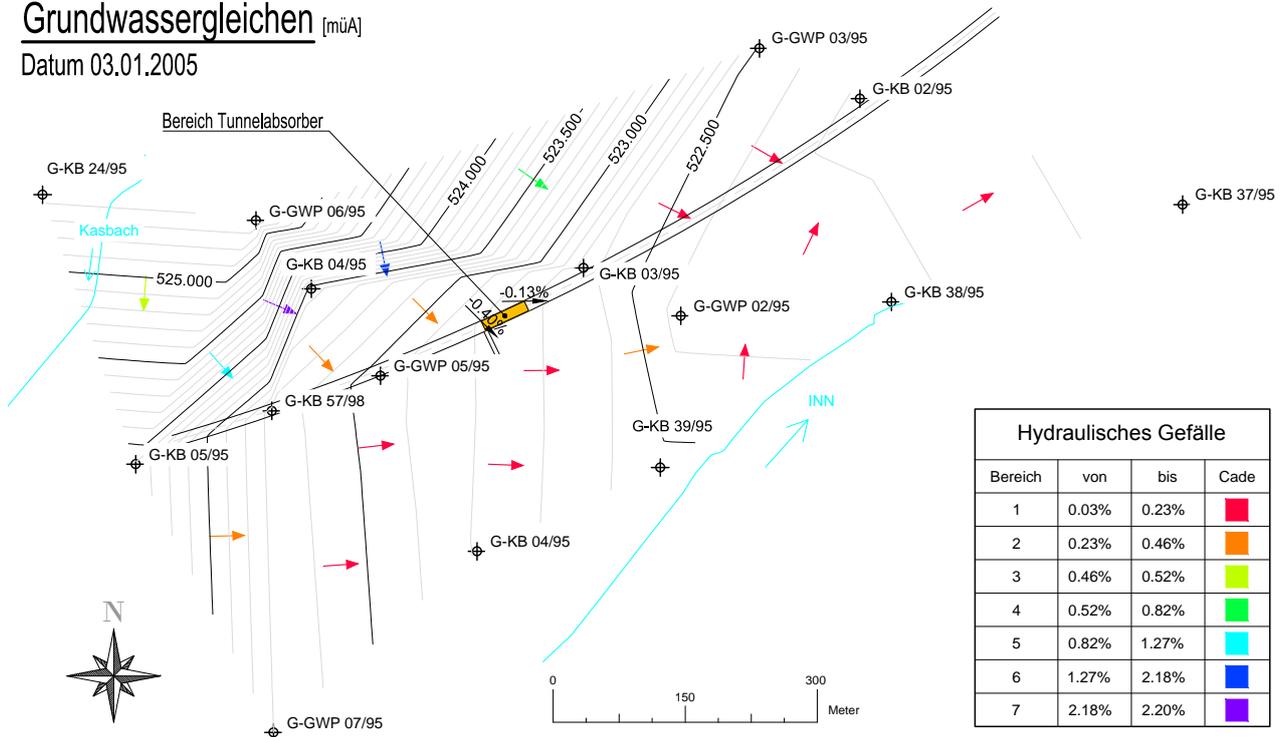


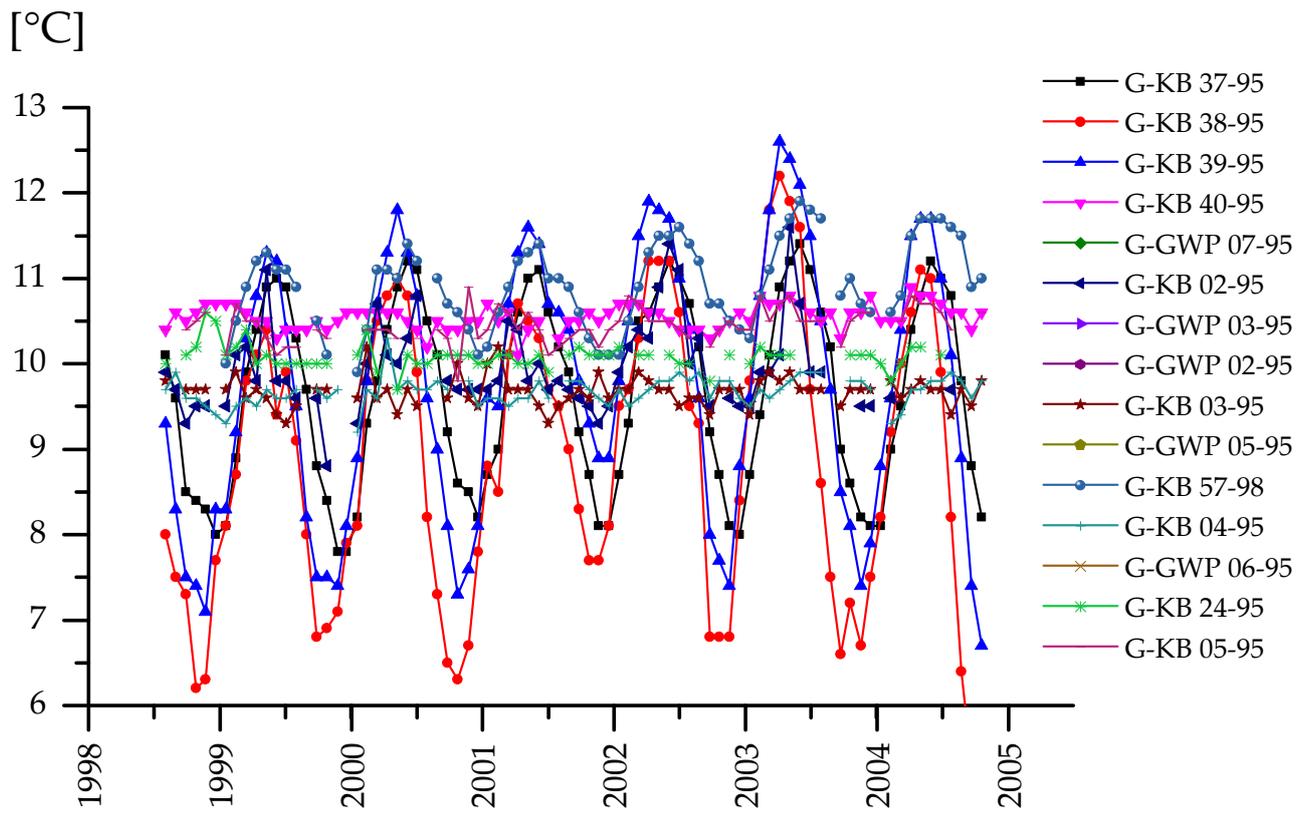
## B.1 Hydrogeologische Situation am Tunnel Jenbach

### Grundwassergleichen [müA] Datum 06.12.2004



### Grundwassergleichen [müA] Datum 03.01.2005





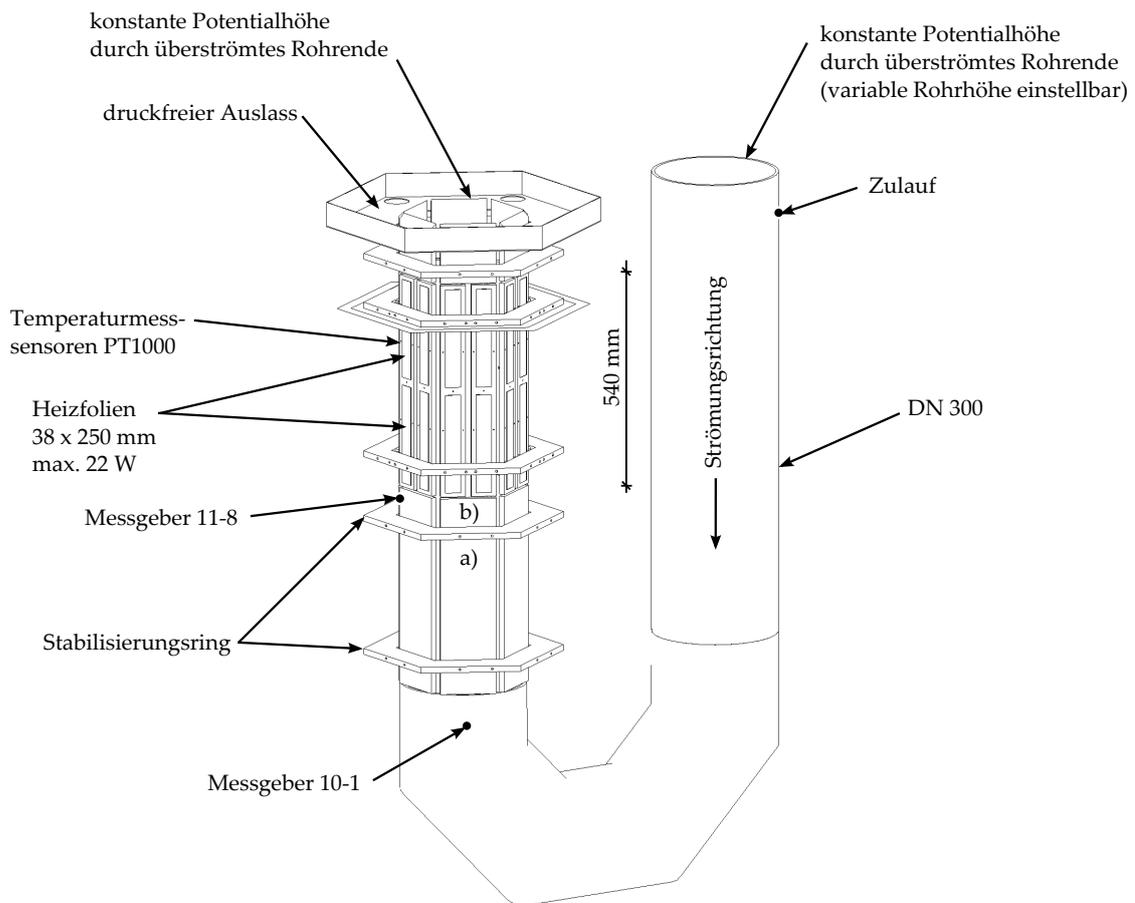


Abbildung B.1: Übersicht Versuchsaufbau, a) hydraulische Bremse, b) Strömungsgleichrichter

## B.2 Versuchsstand Wärmeübergang

Zur Untersuchung des Wärmeübergangs von einem Geothermieabsorber zum durchströmten Aquifer wurde ein Versuchsstand in Anlehnung an thermische Reaktoren aus dem Bereich der Verfahrenstechnik entwickelt. Innerhalb des Reaktors strömt ein Fluid (hier: Leitungswasser) durch ein poröses Medium und wird von den Reaktorwänden mit einem Wärmestrom beaufschlagt. Die Abbildung B.1 zeigt den Aufbau des Versuchsaufbaus.

Das Wasser tritt seitlich in das Zulaufrohr DN 300 ein, so dass sich eine stationäre Überströmung am Kopf des Zulaufrohres einstellt. Die Wassertemperatur beträgt im Zulauf ca.  $20^{\circ}\text{C}$ , was der Umgebungstemperatur außerhalb des Versuchsaufbaus entspricht. Innerhalb des Zulaufrohres stellt sich ein klassisches Rohrströmungsprofil ein, bis es in den Bereich der hydraulischen Bremse a) gemäß Abbildung B.2 kommt. Diese besteht aus einem Aluminiumlochsieb, einem Filtervlies sowie Quarzsand mit einer Schichtmächtigkeit von ca. 8,0 cm.

Auf die hydraulische Bremse folgt ein Strömungsgleichrichter b) mit einer Höhe von ca. 4,5 cm (vgl. Abb. B.2 rechts), der aus Kunststoffrohren mit einem Durchmesser von

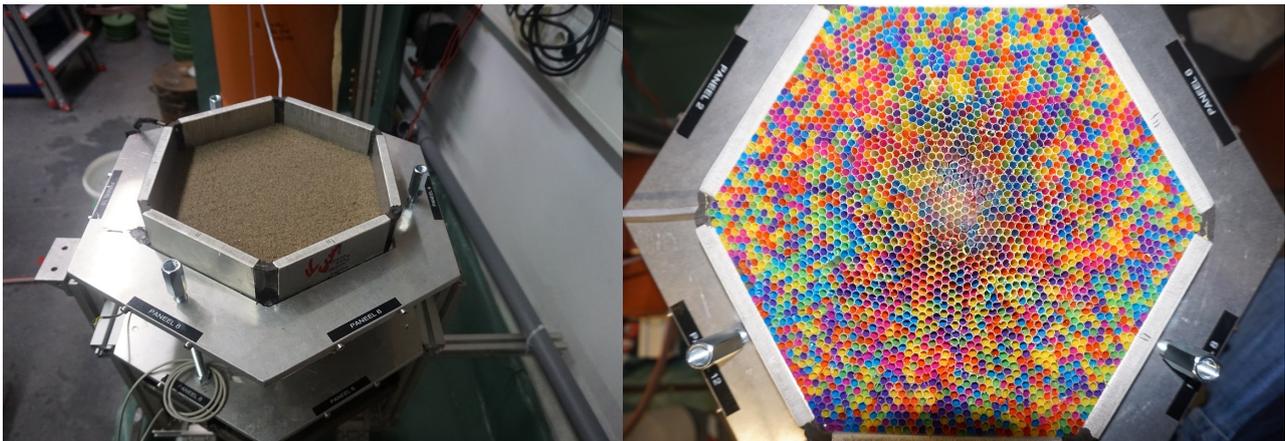


Abbildung B.2: links: hydraulische Bremse a), rechts: Strömungsgleichrichter b)

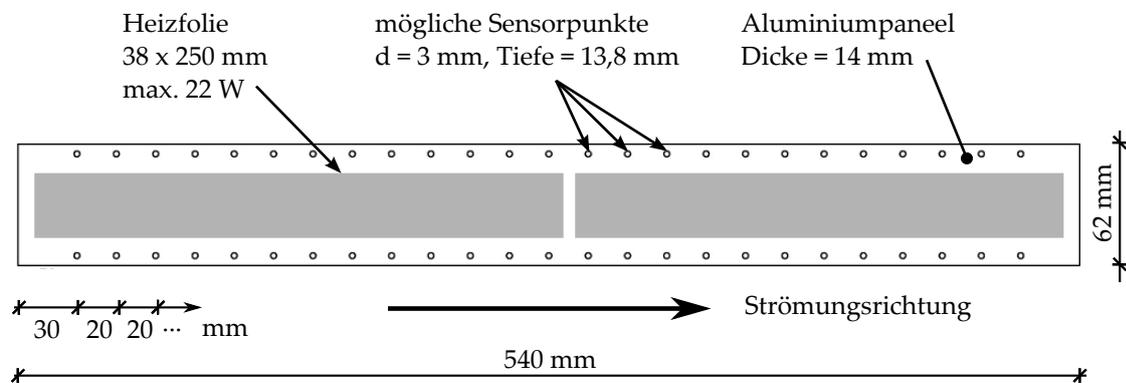


Abbildung B.3: Detaildarstellung Messpaneel

5,0 mm besteht. Oberhalb des Strömungsgleichrichters kann von einer, über die Grundrissfläche des Reaktors konstanten, aufwärts gerichteten Strömung ausgegangen werden. Nach dem Strömungsgleichrichter tritt das Wasser in den Reaktorbereich ein, dessen Wände aus 12 Aluminiumpaneelen gemäß Abbildung B.3 gebildet werden.

Auf den Messpaneelen sind jeweils 2 Heizfolien mit einer maximalen Leistung von 22 W appliziert, mit denen ein konstanter Wärmestrom auf die Reaktorwände aufgebracht werden kann. Zur Messung der Wandtemperatur der Reaktorwand wurden in diskreten Abständen Bohrungen angeordnet, deren Bohrlochgrund bis ca. 0,2 mm an die Innenseite der Reaktorwand heranreicht. Die Temperaturmessgeber bestehen aus Platintemperatursensoren der Klasse A mit einem Widerstand bei  $0^{\circ}\text{C}$  von  $1000\ \Omega$ , die in ein Kunststoffrohr mit 3,0 mm Außendurchmesser eingebettet sind. Der Anschluss der Temperatursensoren erfolgt als Vierleiterschaltung. Sämtliche Temperatursensoren wurden über eine Zweipunktkalibrierung kalibriert und zusammen mit einer silikonfreien Wärmeleitpaste in die Aluminiumpaneele eingebaut.

Nach der Durchströmung des Reaktors verlässt das Wasser den Versuchsstand drucklos und fließt in eine Messeinrichtung zur Aufzeichnung des Volumenstroms. Die Füllstandsmessung erfolgt mittels eines kapazitiven Drucksensors. Die Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt für die durchströmte Reaktorquerschnittsfläche.

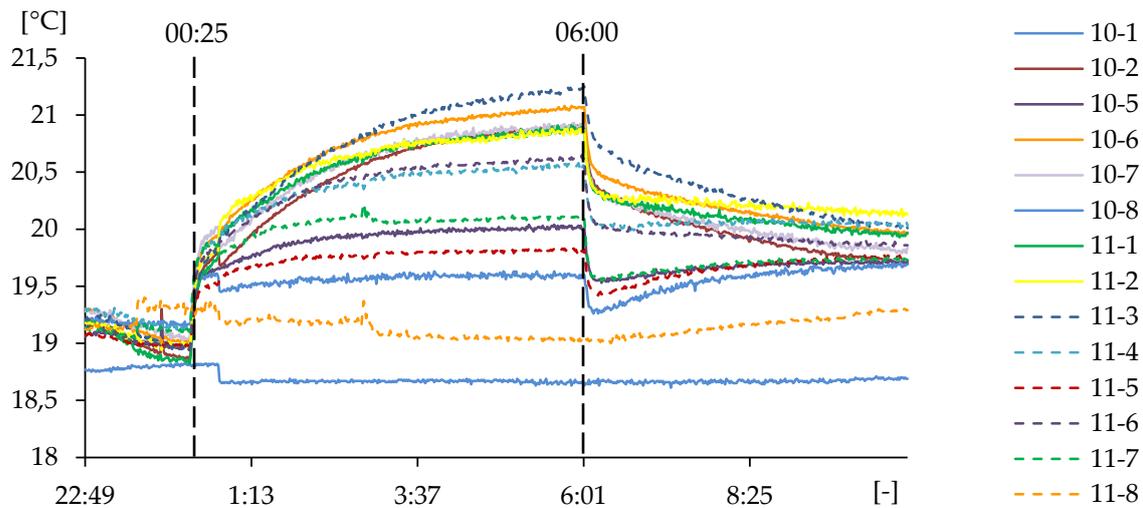


Abbildung B.4: Temperaturverlauf während eines Validierungsversuches über den Zeitraum von ca. 11 h

Sämtliche Versuche werden für einen thermisch-hydraulisch stationären Zustand ausgewertet. Hierzu wird dem Reaktor nach dem Einstellen eines konstanten hydraulischen Potentialunterschieds ein konstanter Wärmestrom zugeführt und die Wandtemperaturen über den Versuchszeitraum gemessen.

Die Abbildung B.4 zeigt den Temperaturverlauf eines Validierungsversuches über die Dauer von ca. 11,5 h. Um 22:49 Uhr wurde die Temperaturopzeichnung gestartet. Zu diesem Zeitpunkt ist lediglich die Durchströmung aktiv, die Beaufschlagung des Reaktor mit einem Wärmestrom erfolgt erst gegen 00:25 Uhr. Zunächst erkennt man eine Vergleichmäßigung der Reaktortemperatur durch das einströmende Wasser, das eine Temperatur von ca.  $18,8^{\circ}\text{C}$  besitzt. Mit dem Zuschalten des Wärmestroms steigt die Temperatur der Reaktorwand. Die Messgeber nahe des Einstromes (z.B. Messgeber 11-5) erreichen bereits nach ca. 3 h quasi stationäre Verhältnisse, während die Messgeber im Bereich des Ausstroms (z.B. Messgeber 11-3) erst nach ca. 7 Stunden keine wesentliche Temperaturänderung mehr zeigen. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt die Auswertung des Versuches. Um 06:00 Uhr wurde die Wärmezufuhr zum Reaktor abgeschaltet, während die Durchströmung aufrecht erhalten wurde. Ab diesem Zeitpunkt erkennt man eine langsame Angleichung der Temperaturen im Bereich des Reaktors. Der Messgeber 10-1 steht in direktem Kontakt mit dem einströmenden Fluid und ist unterhalb der hydraulischen Bremse angeordnet (vgl. Abb. B.1). Auch nach dem Abschalten der Wärmezufuhr findet keine thermische Rückkopplung mit diesem Messgeber statt. Anders verhält sich der Messgeber 11-8, der im Bereich des Strömungsgleichrichters in direktem Kontakt zum Fluid steht. Nach der Unterbrechung der Wärmezufuhr nimmt dieser stetig Wärme aus dem Bereich des Reaktors auf, steht folglich im gegenseitigen thermischen Austausch mit dem Reaktorbereich.

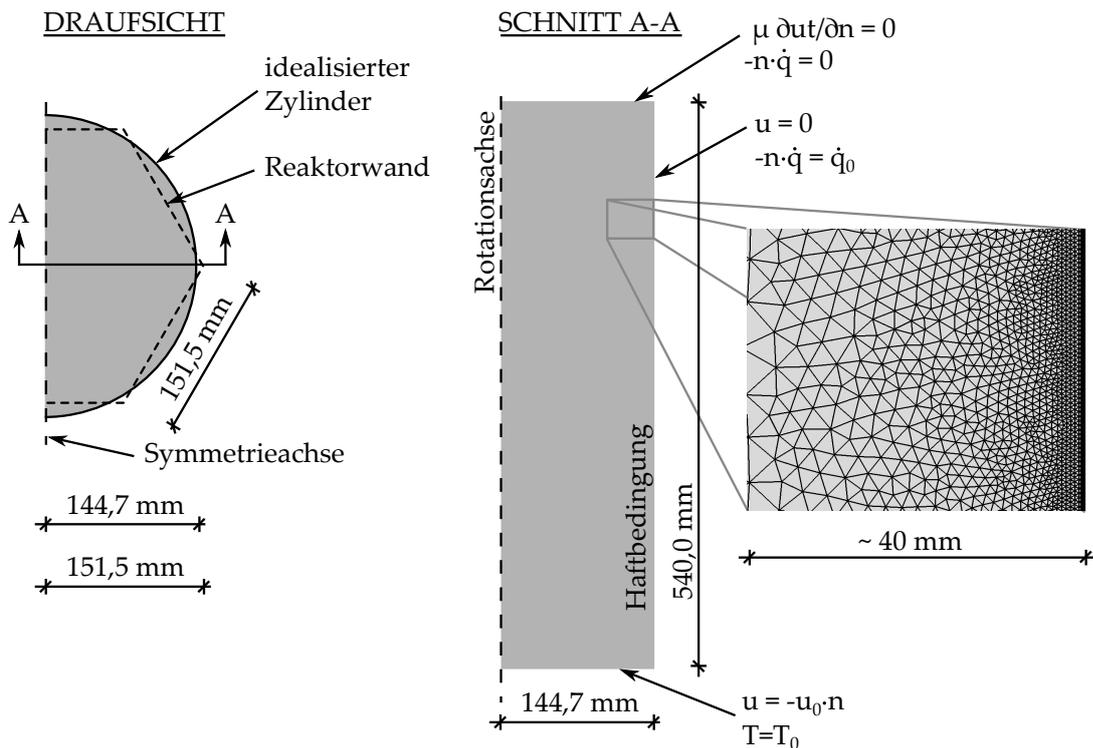


Abbildung B.5: Zweidimensionales, rotationssymmetrisches Berechnungsmodell des Versuchsstandes zur Untersuchung des Wärmeübergangs von einem Geothermieabsorber zum durchströmten Aquifer

**Freie Fluidströmung** Zur Validierung des Versuchsstandes wurden zunächst Versuche mit einer freien Fluidströmung innerhalb des Reaktors durchgeführt und mit numerischen Berechnungen verglichen. Für eine freie Fluidströmung sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten durch die Navier-Stokes-Gleichungen sowie einen gekoppelten Wärmetransport numerisch abbildbar (vgl. Gleichungen 5.12, 5.13 und 5.14 gemäß Kapitel 5.1). Die Simulation des Versuchsstandes erfolgt auf der Basis von zweidimensionalen, rotationssymmetrischen Berechnungen, bei denen der rechnerische Umfang des Simulationsmodells der Abwicklungslänge der Innenseite des polygonalen Reaktors entspricht (siehe Abb. B.5). Hierdurch ist eine direkte Übertragung der im Versuch aufgeprägten Wärmestromdichte in das numerische Modell möglich.

Die Abbildung B.5 zeigt neben der Modellgeometrie auch einen Ausschnitt des numerischen Berechnungsnetzes als Ergebnis einer Konvergenzuntersuchung. Das Berechnungsgebiet besteht aus 36.674 Dreieckselementen, die mit Annäherung an die Reaktorwand (Haftbedingung) stark verfeinert sind. Die maximale Elementlänge beträgt in diesem Bereich ca. 1,6 mm. Die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Reaktors wird zum einen durch die erzwungene Strömung, zum anderen durch die durch Dichteunterschiede getriebene Strömung hervorgerufen. Es findet somit eine Überlagerung einer erzwungenen und einer freien Konvektion statt. Durch das Beaufschlagen der Reaktorwände mit einem Wärmestrom kommt es zunächst zu einem instationären Strömungsregime. Die Einschwingphase wurde auf der Basis einer instationären Simulation unter-

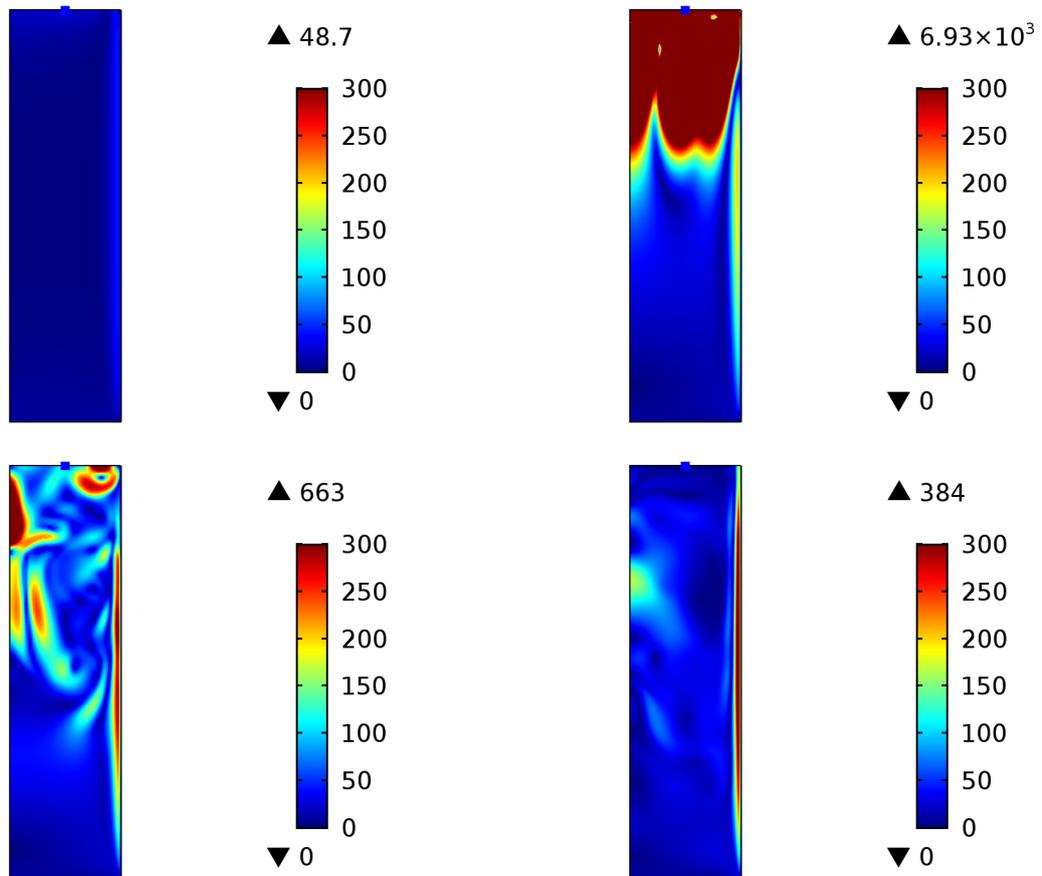


Abbildung B.6: Strömungsfeld in [m/d] einer zweidimensionalen, rotationssymmetrischen Strömungssimulation, links oben: Zeitpunkt  $t = 1$  min, rechts oben: Zeitpunkt  $t = 3$  min, links unten: Zeitpunkt  $t = 5$  min, rechts unten: Zeitpunkt  $t = 10$  min

sucht. Die Abbildung B.6 zeigt den Strömungszustand innerhalb des Reaktors für die Zeiten 1 min, 3 min, 5 min und 10 min nach Beginn der Wärmestromzuführung.

Zu Beginn beträgt die maximale Strömungsgeschwindigkeit ca. 50 m/d, was ca. der 6-fachen ungestörten Einströmgeschwindigkeit entspricht. Hervorgerufen wird diese Geschwindigkeitserhöhung durch die Haftbedingung an der Wand. In weiterer Folge wird das Strömungsregime vollständig chaotisch, bevor es nach ca. 10 min stationäre Verhältnisse erreicht. Nahe der Wand werden in einer schmalen Zone Geschwindigkeiten von bis zu 380 m/d erreicht, die vor dem Hintergrund der Massenerhaltung zur Ausbildung von Rückströmungen innerhalb des Reaktors führen. Bei der Interpretation der Entwicklung der Wandtemperatur auf der Innenseite des Reaktors ist die Instationarität der Strömung entsprechend zu berücksichtigen.

Zur Validierung des Versuchsstandes wurden folgende Versuchsrandbedingungen eingestellt:

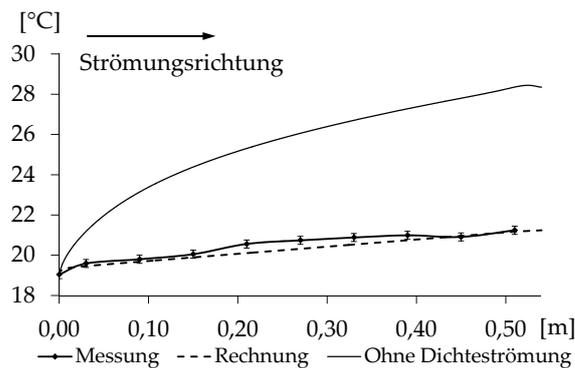


Abbildung B.7: Validierungsversuch 1: Vergleich der gemessenen und berechneten Wandtemperaturen über die vertikale Achse des Reaktors ( $u_0 = 8,0 \text{ m/d}$  und  $\dot{q} = 100 \text{ W/m}^2$ ), Vergleich Temperaturverlauf ohne Berücksichtigung einer Dichteströmung

- Validierungsversuch 1:  $u_0 = 8,0 \text{ m/d}$  und  $\dot{q} = 100 \text{ W/m}^2$
- Validierungsversuch 2:  $u_0 = 10,0 \text{ m/d}$  und  $\dot{q} = 100 \text{ W/m}^2$
- Validierungsversuch 3:  $u_0 = 2,6 \text{ m/d}$  und  $\dot{q} = 100 \text{ W/m}^2$

Die Abbildung B.7 zeigt den gemessenen sowie simulierten Temperaturverlauf entlang der inneren Reaktorwand bei quasi stationären Strömungs- und Temperaturverhältnissen für den Validierungsversuch 1. Es ist eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Temperaturen zu erkennen. Für jeden Messgeber ist die zu erwartende Messgenauigkeit symbolisch dargestellt. Einige der Temperatursensoren zeigen unter Einbeziehung der Messergebnisse der weiteren Validierungsversuche systematische Abweichungen, die auf ungenaue Kalibrierungen zurückgeführt werden. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang der Vergleich mit einer Strömungssimulationen, bei dem Strömungsänderungen infolge von Dichteunterschieden vernachlässigt wurden.

Auch für die Validierungsversuche 2 und 3 konnte eine gute Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und simulierten Temperaturverlauf erreicht werden, wobei sich mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit auseinanderdriftende Trends der Temperaturkurven erkennen lassen (vgl. Abb. B.8). Ein Grund hierfür wird in der Temperaturrandbedingung am einströmenden Modellrand gesehen, der in der numerischen Simulation eine unveränderbare Größe darstellt (Randbedingung 1.Art). Die Messung der Temperatur am Geber 11-8 zeigt für eine sehr geringe Geschwindigkeit eine Temperaturrückkopplung mit dem Reaktorbereich, so dass die gewählte Randbedingung ggf. zu 'starr' ist. Grundsätzlich konnte für den Versuchsstand zur Untersuchung des Wärmeübergangs von einem Geothermieabsorber zum durchströmten Aquifer eine gute Übereinstimmung mit den durchgeführten numerischen Simulationen festgestellt werden, so dass der Versuchsaufbau als validiert angesehen wird.

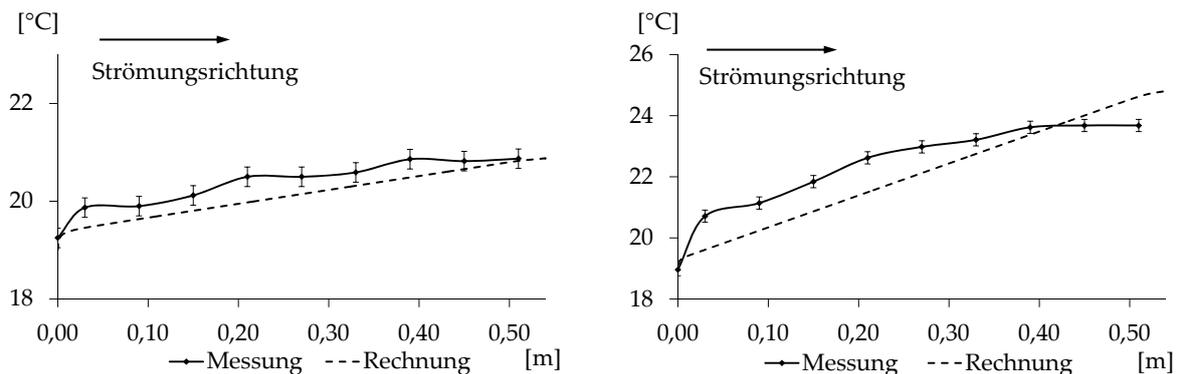


Abbildung B.8: Vergleich der gemessenen und berechneten Wandtemperaturen über die vertikale Achse des Reaktors, links: Validierungsversuch 2:  $u_0 = 10,0 \text{ m/d}$  und  $\dot{q} = 100 \text{ W/m}^2$ , rechts: Validierungsversuch 3:  $u_0 = 2,6 \text{ m/d}$  und  $\dot{q} = 100 \text{ W/m}^2$



Abbildung B.9: Temperatursensoren zur Messung der Temperatur innerhalb der Kugelpackung, links: Kugelhalbschale mit Vertiefung für den Sensor nach der Herstellung, mitte: Kugelhalbschalen mit eingelegtem Sensor, rechts: Kugel aus Kugelpackung zum Vergleich

**Poröses Medium** Das poröse Medium innerhalb des Reaktorbereiches wird durch eine regelmäßige Kugelpackung gebildet. Die Kugeln besitzen einen Durchmesser von 20 mm und bestehen aus einem hochmolekularen, thermoplastischen Kunststoff (POM). Der gewählte Kugeldurchmesser geht auf die Anforderung zurück, die Temperaturen innerhalb des porösen Mediums ohne die Störung des Strömungsfeldes zu messen (vgl. Abb. B.9). Diese Funktion wurde bis dato noch nicht genutzt.

Die Kugeln werden in dichtester Lagerung innerhalb des Reaktors angeordnet, so dass sich eine Porosität von  $n = 0,272$  ergibt. Hierzu wurde die Geometrie des Reaktors auf die Geometrie der Kugelpackung angepasst, so dass sichergestellt ist, dass alle äußeren Kugeln der 1., 3. Lage usw. direkten Kontakt mit der Reaktorwand besitzen. Diese Lagen bestehen aus jeweils 169 Kugeln, die Zwischenlagen 2, 4 usw. aus jeweils 147 Kugeln. Die gesamte Kugelpackung besteht aus 5225 Kugeln. Die Abbildung B.10 zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten Wandtemperatur für den Indexversuch bei Durchströmung der beschriebenen Kugelpackung in dichtester Lagerung. Die Simulation bildet eine Kolbenströmung (Potentialströmung) ab, wie sie üblicherweise der Simula-

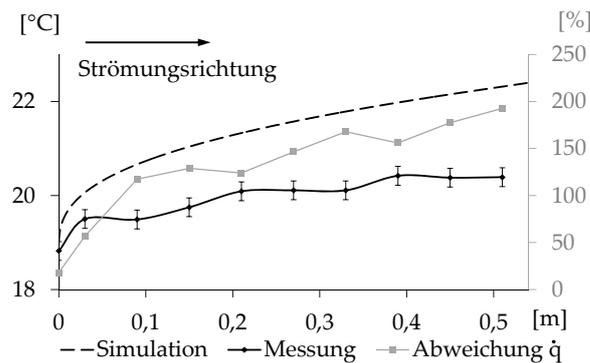


Abbildung B.10: Indexversuch: Vergleich der gemessenen und berechneten Wandtemperaturen  $T_w$  über die vertikale Achse des Reaktors ( $v_f = 11,0 \text{ m/d}$  und  $\dot{q} = 100 \text{ W/m}^2$ ) mit Kugelpackung in dichtester Lagerung

tion von Grundwasserströmungen zu Grunde gelegt wird. Hierbei werden vorhandene Grenzschichtentwicklungen nahe der Reaktorwand vernachlässigt.

Während sich im Versuch bis zum Ende des Reaktors bereits ein quasi stationärer Zustand eingestellt hat, prognostiziert die Simulation einen weiteren Temperaturanstieg. Das Simulationsergebnis unterschätzt den Wärmeübergang von der Reaktorwand an das poröse Medium am Ausstromrand des Reaktors um ca. 200%. Grundsätzlich führen zwei physikalische Phänomene zu der Abweichung zwischen dem Ergebnis der Simulation und dem Ergebnis der Messung:

- Die Vernachlässigung der Haftbedingung an der temperierten Reaktorwand führt zu einer Überschätzung des Wärmeübergangs
- Die Abbildung einer homogenen Permeabilität des porösen Mediums führt zu einer Unterschätzung des Wärmeübergangs

Für das untersuchte poröse Medium bilden sich am Übergang zwischen der Reaktorwand und der Kugelpackung durchgehende Strömungskanäle aus, so dass in diesem Bereich mit einer entsprechend hohen Permeabilität zu rechnen ist. Zur Untersuchung der Einflüsse der Phänomene die zur Abweichung zwischen dem Ergebnis der Simulation und dem der Messung führen, wurde ein numerisches Simulationsmodell lediglich dieses Strömungskanals erstellt. Innerhalb des Fluidgebietes wird eine freie, laminare Strömung simuliert, während die Kugeln sowie die Reaktorwand als Haftbedingung abgebildet sind.

Die Abbildung B.11 zeigt einen Ausschnitt des 54 cm langen Strömungskanals in der Draufsicht (links) sowie der Untersicht (rechts). Im Bereich des dreieckförmigen Zwickels wird eine gleichförmige Einströmgeschwindigkeit in Längsrichtung des Strömungskanals sowie eine gleichmäßige Eintrittstemperatur aufgeprägt. Am gegenüberliegenden Modellrand (nicht dargestellt) wird eine Druck- sowie Wärmeausstromrandbedingung berücksichtigt. An der Unterseite des Modells wird eine konstante Wärmestromdichte  $\dot{q}$  aufgeprägt. Folgende Fälle werden untersucht:

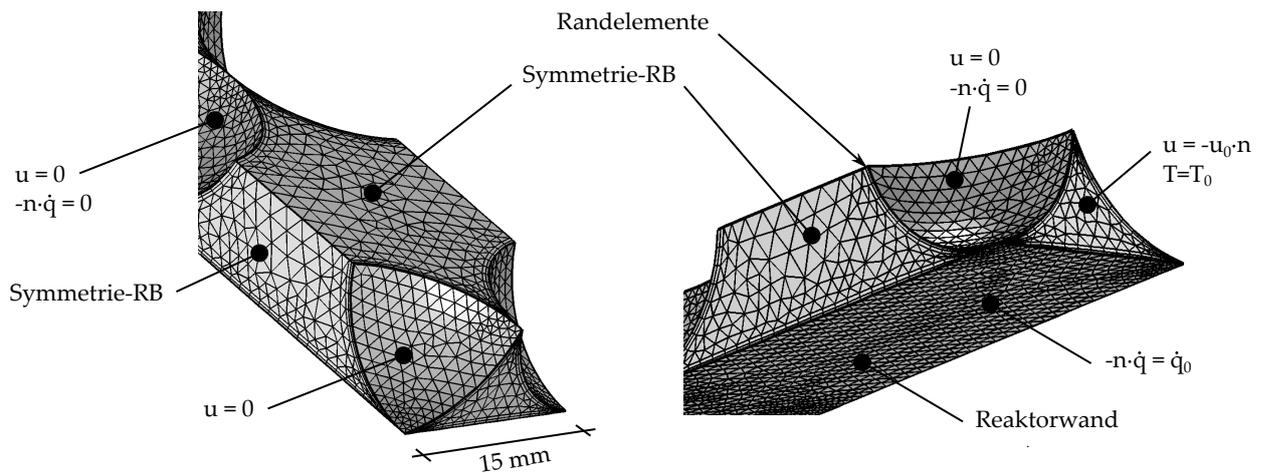


Abbildung B.11: Isometrische Darstellung Strömungskanal, links: Ansicht von oben, rechts: Ansicht von unten

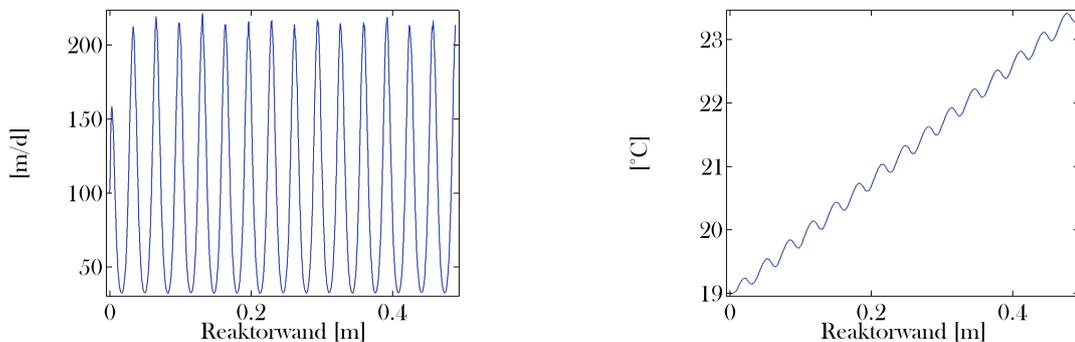


Abbildung B.12: Strömungskanal Fall b) 'Haftbedingung an der Reaktorwand', links: Längsentwicklung des Geschwindigkeitsprofils, rechts: Längsentwicklung des Temperaturprofils

- Fall a) keine Haftbedingung an der Reaktorwand
- Fall b) Haftbedingung an der Reaktorwand

Die Abbildung B.12 zeigt die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeit (links) sowie der Temperatur (rechts) über die Lauflänge der Reaktorwand.

Im Bereich der Kugeln findet eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit statt, während jeweils zwischen zwei Kugelpaaren die Strömungsgeschwindigkeiten am geringsten sind. Bereits nach der Passage des zweiten Kugelpaars ist kein Effekt aus der aufgeprägten Randbedingung mehr zu erkennen. Allerdings schwanken die maximalen Geschwindigkeiten im Bereich von 215 - 220 m/d, was auf das unregelmäßig generierte Berechnungsnetz zurückgeführt wird. Die Temperatur entwickelt sich in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit und nimmt im Mittel linear zu. Dieser Trend konnte in den durchgeführten Messungen nicht bestätigt werden. Der Vergleich des Fall a) „keine Haftbedingung an der Reaktorwand“ mit dem Fall b) „Haftbedingung an der Reaktor-

wand“ führt zu dem Schluss, dass der Einfluss der Haftbedingung auf den Wärmeübergang im einstelligen Prozentbereich liegt.

# Anhang C

## Anhang zu Kapitel 4.5

Eine TGTA nutzt Wärmeströme aus dem Untergrund sowie aus dem Tunnelklima. Untersuchungen am Tunnel Stuttgart-Fasanenhof haben ergeben, dass das Tunnelklima mit ca. 70 – 80% einen wesentlichen Anteil der extrahierten tunnelgeothermischen Energie hat. Der Beschreibung der Randbedingung „Tunnelklima“ kommt folglich eine besondere Bedeutung zu. Im Rahmen dieser Arbeit werden auf der Basis von Tunnelklimamessdaten von 13 Straßen- und Bahntunneln aus Deutschland und Österreich (siehe Tabelle C.1) Modelle zur Beschreibung dieser Randbedingung entwickelt, die auf dem Wärmeübergangsmechanismus der erzwungenen Konvektion fußt. Nachfolgend werden der verwendete Datenbestand sowie die Vorgehensweise zur Aufbereitung und Auswertung der Messdaten beschrieben.

Die Abbildung C.1 gibt eine Übersicht der Länge der einzelnen untersuchten Tunnelröhren und zeigt, ob es sich um einen Tunnel mit Richtungsröhren oder einen Tunnel mit Gegenrichtungsverkehr in einer Tunnelröhre handelt.

**Beschreibung Messdaten** Grundsätzlich ist zwischen den Messdaten der Bahntunnel und der Straßentunnel zu unterscheiden. Die Messdaten der Bahntunnel basieren zur Gänze auf Daten, die in Verbindung mit den in diesen Tunneln installierten Geothermieanlagen stehen. Dadurch erfolgt die Messdatenerfassung für diese Tunnel nicht systematisiert. Die Beschreibung und Auswertung dieser Daten erfolgt im Hauptteil dieser Arbeit. Die Messdaten der Straßentunnel repräsentieren einen Ausschnitt der kontinuierlichen Datenerfassung, die durch die Tunnelbetriebszentralen zur Steuerung und Regelung der Tunneltechnik verwendet werden. Die Art und Weise der Datenerfassung ist für deutsche Straßentunnel in den RABT [98] geregelt. Aus diesem Grund folgen die Messwertaufzeichnungen der Straßentunnel einer Systematik, die bei der Aufbereitung der Messdaten dieser Tunnel genutzt werden konnte. Die relevanten Daten zur Beschreibung der Randbedingung „Tunnelklima“ bilden die folgenden Messgrößen:

- Tunnellufttemperatur
- Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit
- (Tunnelluftfeuchtigkeit)

Die Erhebung der Messdaten der Straßentunnel erfolgte größtenteils durch ein direktes Auslesen der an den Tunneln gespeicherten Rohdaten, die in einer zeitlichen Auflösung von einer Minute vorliegen. Sämtliche Rohdaten wurden zur Auswertung in Stundenmittelwerte konvertiert. Die Messung der Tunnellufttemperatur erfolgt durch das an

Tabelle C.1: Übersicht Tunnelbauwerke

| Tunnelbezeichnung    | Bundesland        | Streckenbez. | Art           |
|----------------------|-------------------|--------------|---------------|
| Alte Burg            | Thüringen         | A71          | Straßentunnel |
| Berg Bock            | Thüringen         | A71          | Straßentunnel |
| Eichelberg           | Thüringen         | A71          | Straßentunnel |
| Einhorn              | Baden-Württemberg | B29          | Straßentunnel |
| Höllberg             | Thüringen         | A38          | Straßentunnel |
| Jagdberg             | Thüringen         | A4           | Straßentunnel |
| Lobdeburg            | Thüringen         | A4           | Straßentunnel |
| Pörzberg             | Thüringen         | B90          | Straßentunnel |
| Rennsteig            | Thüringen         | A71          | Straßentunnel |
| Schmücke             | Thüringen         | A71          | Straßentunnel |
| Hornberg             | Baden-Württemberg | B33          | Straßentunnel |
| Stuttgart-Fasanenhof | Baden-Württemberg | U6           | Bahntunnel    |
| Tunnel Jenbach       | Tirol             | 330 01       | Bahntunnel    |

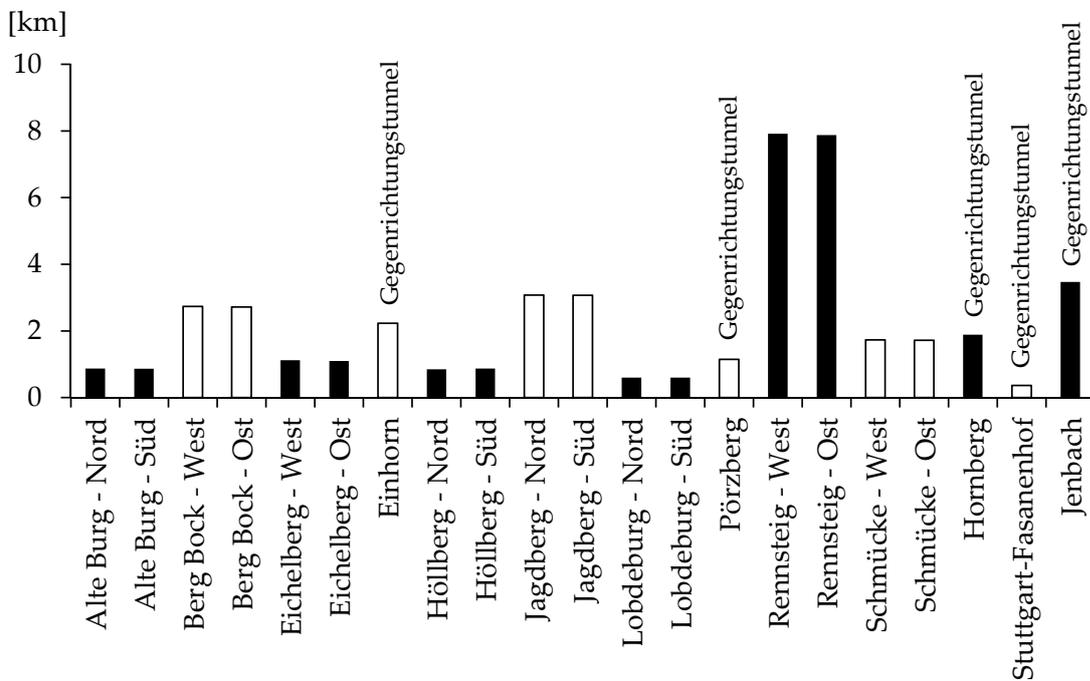


Abbildung C.1: Tunnellängen der untersuchten Tunnel je Tunnelröhre

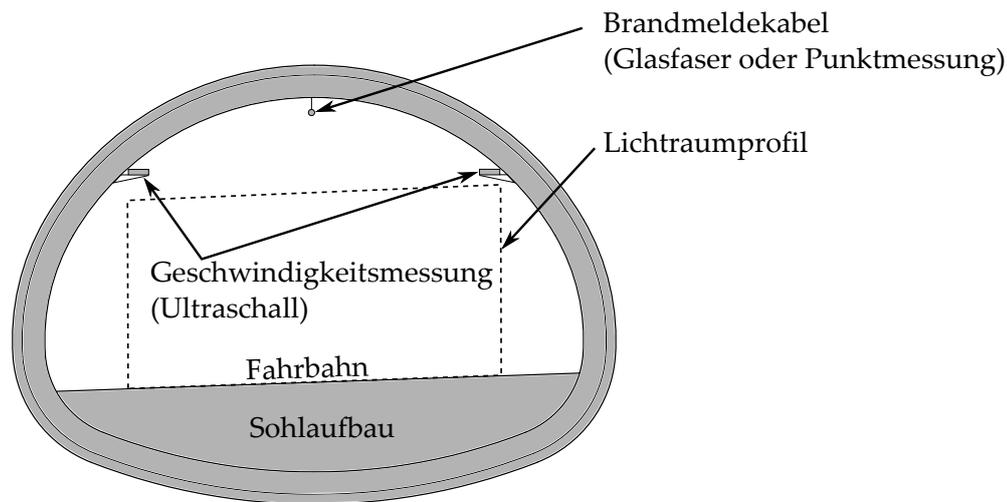


Abbildung C.2: Prinzipanordnung der Messstellen innerhalb eines Straßentunnelquerschnitts

der Tunnelfirste installierte Brandmeldekabel, die Messung der Tunnelluftströmung im Bereich vom Übergang der Ulmen zur Tunnelfirste (siehe Abb. C.2).

Für die meisten Tunnelbauwerke wurde das Jahr 2016 als Auswertezeitraum gewählt. Aufgrund der großen Datenmenge, die für jeden der betrachteten Tunnel aus dem Tunneldatenmanagementsystem extrahiert werden musste, konnte für einige Tunnel lediglich der Zeitraum August 2016 bis Januar 2017 berücksichtigt werden. Darüber hinaus standen für einige Tunnel auch weitere Messreihen aus Zeiten vor dem Jahr 2016 zur Verfügung. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturerfassungssysteme in den Tunneln war es nicht möglich, für jeden Tunnel die Daten der Brandmeldekabel auszulesen, so dass für einige Tunnel ausschließlich Tunnelluftströmungsmessdaten vorliegen. Des Weiteren wurden für die unterschiedlichen Tunnel die Messdaten der Brandmeldekabel bereits in unterschiedlich lange Brandabschnitte zusammengefasst und auch die Anordnung und Anzahl der Strömungsmessungen je Tunnelkilometer sind für die einzelnen Tunnel unterschiedlich. Aus diesem Grund existieren für die einzelnen Tunnel unterschiedliche Messstützstellen sowohl für die Temperatur- als auch die Strömungsmessung. Eine Zusammenschau der verfügbaren Daten gibt die Tabelle C.2.

Neben den Klimamessdaten der Tunnel wurden in die Auswertung automatische Fahrzeugzählungen aufgenommen, die durch ein Onlineportal der Bundesanstalt für Straßenwesen [28] in stündlicher Auflösung zur Verfügung gestellt werden. Für einige Tunnel konnten Fahrzeugzählstellen direkt mit den Tunnelbauwerken räumlich in Bezug gesetzt werden, andere Tunnel liegen außerhalb des Bereichs einer sinnvollen Zuordnung (siehe Tabelle C.3).

Tabelle C.2: Zusammenstellung der ausgewerteten Daten je Tunnelbauwerk

| Tunnelbez. | Strömung | Temperatur | Zeitraum                |
|------------|----------|------------|-------------------------|
| Alte Burg  | x        | -          | 23.08.2016 - 31.01.2017 |
| Berg Bock  | x        | -          | 21.08.2016 - 31.01.2017 |
| Eichelberg | x        | -          | 29.08.2016 - 31.12.2017 |
| Einhorn    | x        | x          | 13.03.2014 - 13.03.2015 |
| Höllberg   | x        | x          | 24.08.2016 - 31.01.2017 |
| Jagdberg   | x        | x          | 01.01.2016 - 04.12.2016 |
| Lobdeburg  | x        | x          | 29.08.2016 - 31.01.2017 |
| Pörzberg   | x        | x          | 01.01.2016 - 31.01.2017 |
| Rennsteig  | x        | x          | 01.01.2016 - 31.01.2017 |
| Schmücke   | x        | x          | 24.08.2016 - 31.01.2017 |
| Hornberg   | x        | x          | 06.11.2006 - 18.08.2011 |

Tabelle C.3: Zuordnung Tunnelbauwerke zu Verkehrszählstation, mittlere tägliche Verkehrsdichte 2016 (Tunnel Hornberg 2007-2010), Kfz = Kraftfahrzeuge, SV = Schwerverkehr

| Tunnelbezeichnung | Kfz/24h | SV/24h | Station            |
|-------------------|---------|--------|--------------------|
| Alte Burg         | 24092   | 3298   | Rennsteig          |
| Berg Bock         | 24111   | 3719   | Berg Bock          |
| Eichelberg        | 13937   | 2107   | Eichelberg         |
| Einhorn           | -       | -      | -                  |
| Höllberg          | 23728   | 5491   | Röstebachtalbrücke |
| Jagdberg          | 59031   | 10635  | Jagdberg           |
| Lobdeburg         | 59031   | 10635  | Jagdberg           |
| Pörzberg          | -       | -      | -                  |
| Rennsteig         | 24092   | 3297   | Rennsteig          |
| Schmücke          | 12804   | 1800   | Schmücke           |
| Hornberg          | 5000    | 1000   | Hornberg           |

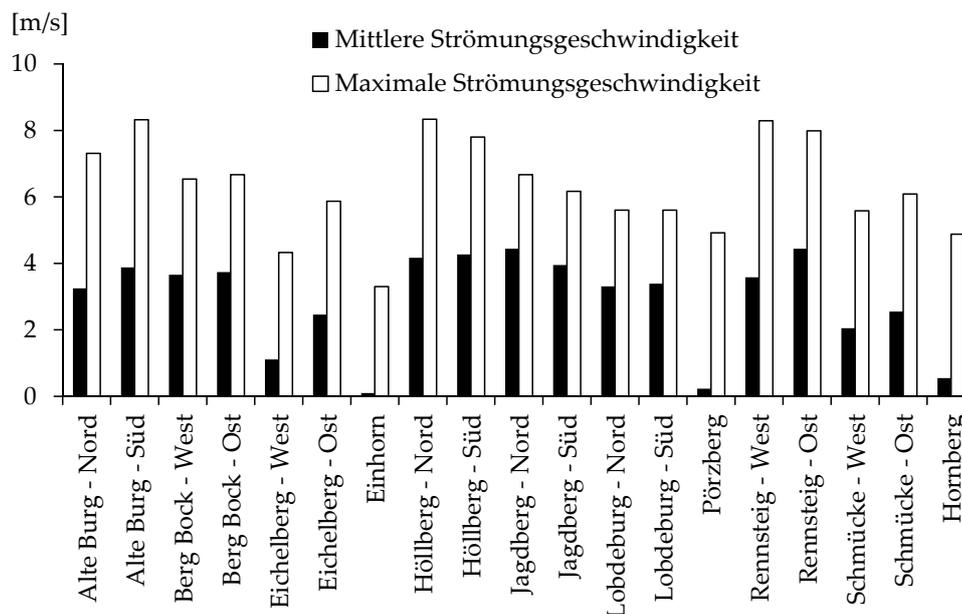


Abbildung C.3: Mittlere und maximale Luftströmungsgeschwindigkeiten bezogen auf den analysierten Messzeitraum

**Aufbereitung und Auswertung der Messdaten** Die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten erfolgt für alle Tunnelbauwerke nach der gleichen Systematik. Diese wird nachfolgend zunächst einführend beschrieben. Darüber hinaus werden zusammenfassende Ergebnisse der Auswertung dargestellt. Im Anschluss daran zeigt dieser Anhang die aufbereiteten Messdaten für die untersuchten Tunnel in Diagrammform.

**Luftströmungs- und Verkehrsmessdaten** Zur Analyse der Luftströmungsmessdaten wurden diese zunächst getrennt nach den untersuchten Tunnelröhren für einen exemplarischen Beobachtungszeitraum von 3 Wochen im Oktober sowie über die Weihnachtsfeiertage bzw. den Jahreswechsel aufgetragen. Hierdurch lässt sich qualitativ auf eine Abhängigkeit zwischen dem Schwerverkehr und der Strömungsgeschwindigkeit schließen. Während einer Arbeitswoche folgt die Strömungsgeschwindigkeit einem Tag-Nacht-Rhythmus, der durch das Wochenende, an dem ein Lkw-Fahrverbot gilt, unterbrochen wird. Die Messdaten der Strömungsgeschwindigkeit am Jahresende bestätigen diesen Zusammenhang und zeigen darüber hinaus, dass die Tunnelröhren eine natürliche Grundströmung besitzen, die unabhängig vom Verkehr ist. Hinweise hierauf liefern Messdaten mit negativen Vorzeichen, die bei Richtungsrohren eine Luftströmung entgegen der Fahrtrichtung anzeigen. Zur Bestätigung der augenscheinlichen Perioden der Luftströmung wurde eine Schnelle Fourier-Transformation (FFT) für die Messdaten durchgeführt. Diese zeigt die zwei Hauptperioden Woche und Tag, sowie zahlreiche Nebenperioden. Eine sinnvolle Auswertung der Strömungsamplituden ist durch die hohe Anzahl der Nebenfrequenzen nicht möglich.

Nicht für alle der untersuchten Tunnelbauwerke liegen stündlich aufgelöste Verkehrszählungen vor. So wurden für den Tunnel Alte Burg die Messdaten des Tunnels Renn-

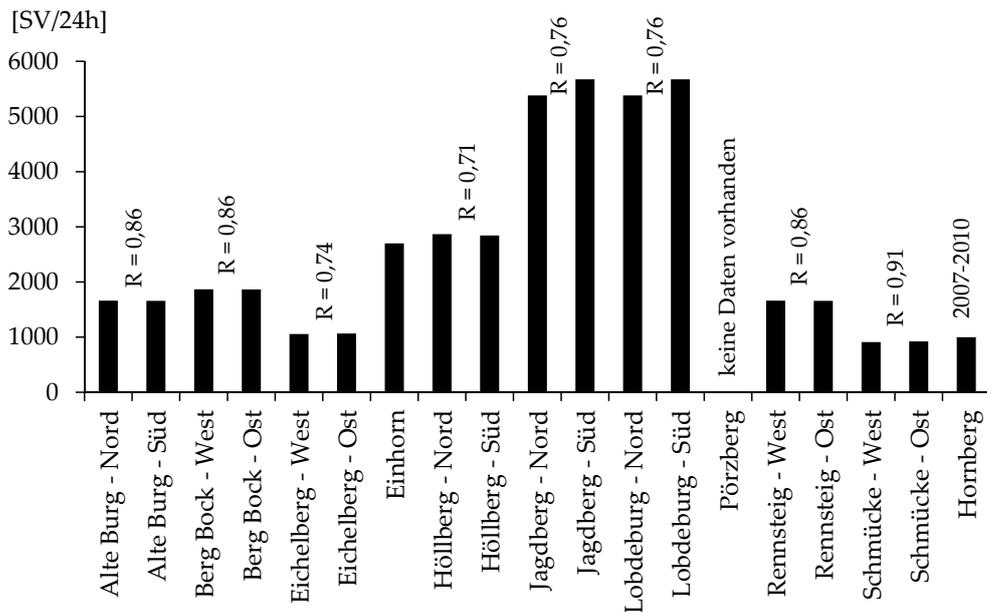


Abbildung C.4: Verkehrsdichte des Schwerverkehrs pro Tag (Stand: 2016, Hornberg 2007-2010), Bestimmtheitsmaß einer linearen Regression der Schwerverkehrsdichten beider Tunnelröhren

steig und für den Tunnel Lobdeburg die Messdaten des Tunnels Jagdberg übernommen. Dies ist möglich, da zwischen den jeweiligen Tunneln von keiner wesentlichen Veränderung der Verkehrsdichte ausgegangen werden kann. Für den Tunnel Hornberg liegen lediglich gemittelte Daten über die Verkehrsdichte aus den Jahren 2007 – 2010 vor, die in der Auswertung berücksichtigt wurden. Die Aufbereitung der Verkehrsdaten erfolgt in Anlehnung an die Diagramme der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit für drei charakteristische Wochen im Oktober sowie über die Weihnachtsfeiertage bzw. den Jahreswechsel. Zur Veranschaulichung ist zusätzlich zu dem Schwerverkehr auch die Ganglinie der gesamten Kfz aufgetragen. Die Verkehrsdaten wurden wie die Tunnelluftströmung einer FFT unterzogen, die mit der Tunnelluftströmung vergleichbare Ergebnisse liefert. Die über den Tagesverlauf summierten und über das Jahr gemittelten Schwerverkehrsdichten je Tunnelröhre (siehe Abbildung C.4) zeigen für die Tunnel mit Richtungsröhren nahezu identische Werte.

Eine direkte Aussage über diesen Zusammenhang liefert eine Korrelation der stündlichen Schwerverkehrsdichten der einzelnen Tunnelröhren gegeneinander, dessen Bestimmtheitsmaß einer linearen Regression in Abbildung C.4 angegeben ist. Zur Ableitung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit und der Schwerverkehrsdichte wurde für jede Tunnelröhre die Strömungsgeschwindigkeit über der Verkehrsdichte aufgetragen und über eine lineare Regression angenähert. Hierzu wurden ausschließlich die Zeiträume mit einem Schwerverkehrsanteil sowie Strömungsgeschwindigkeiten in Fahrtrichtung (bei Richtungstunneln) berücksichtigt. In einer Zusammenschau zeigt sich ab einer Schwerverkehrsdichte > 50 SV/24h eine gute lineare Korrelation zur Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit. Für Zeiträume,

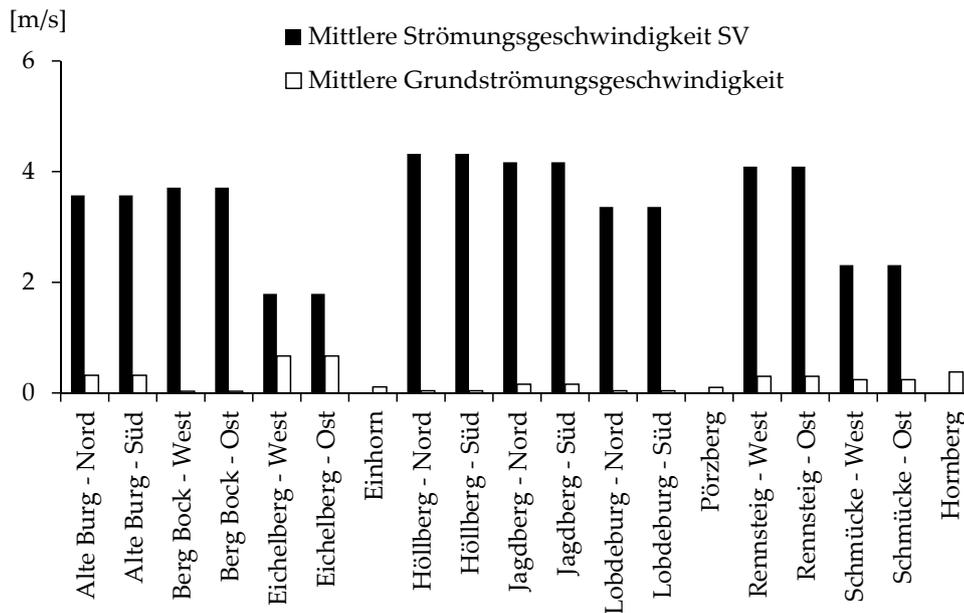


Abbildung C.5: Über den Auswertezeitraum gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten getrennt nach Grundströmung und Fahrzeug induzierter Strömung, für Gegenrichtungsröhren ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen

in denen die Schwerverkehrsdichte unter 50 SV/24h liegt, kann auf der Basis der zur Verfügung stehenden Messdaten kein abschließendes Modell zur Beschreibung der Tunnelluftströmung abgeleitet werden. Hierzu sind weitere Messdaten der klimatischen Verhältnisse an den Tunnelportalen zu erheben. Für die Prognose des thermischen Potentials von TGTAn konnte allerdings ein Zusammenhang zwischen der Schwerverkehrsdichte und der Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit auf der Basis eines Potenzgesetzes hergestellt werden, der bis zur endgültigen, physikalisch korrekten Beschreibung der Strömungsverhältnisse innerhalb eines Straßentunnels genutzt werden kann. Entsprechende Auswertungen sind in Diagrammform angegeben. Im Hauptteil dieser Arbeit wird für Tunnel mit Richtungsröhren eine Modellvorstellung entwickelt, die eine Trennung der von den Fahrzeugen induzierten Strömung von der Grundströmung einer Tunnelröhre erlaubt. Diese Modellvorstellung wurde für die entsprechenden Tunnel ausgewertet. Für den Anteil des Schwerverkehrs an der Tunnelluftströmung erfolgt die Visualisierung der Daten über einen exemplarischen Zeitraum von 3 Wochen im Monat Oktober, die Grundströmung wird über den ausgewerteten Gesamtzeitraum dargestellt. Die Abbildung C.5 zeigt die über den Auswertezeitraum gemittelten Strömungsanteile, getrennt nach Grundströmung und Fahrzeug induzierter Strömung.

**Temperaturmessdaten** Die Temperaturmessdaten der einzelnen Tunnelröhren werden zunächst über den gesamten Auswertezeitraum in Diagrammform dargestellt. Im Anschluss erfolgt die Darstellung in Anlehnung an die Strömungs- und Verkehrsdaten für einen exemplarischen Beobachtungszeitraum von 3 Wochen im Oktober, sowie über

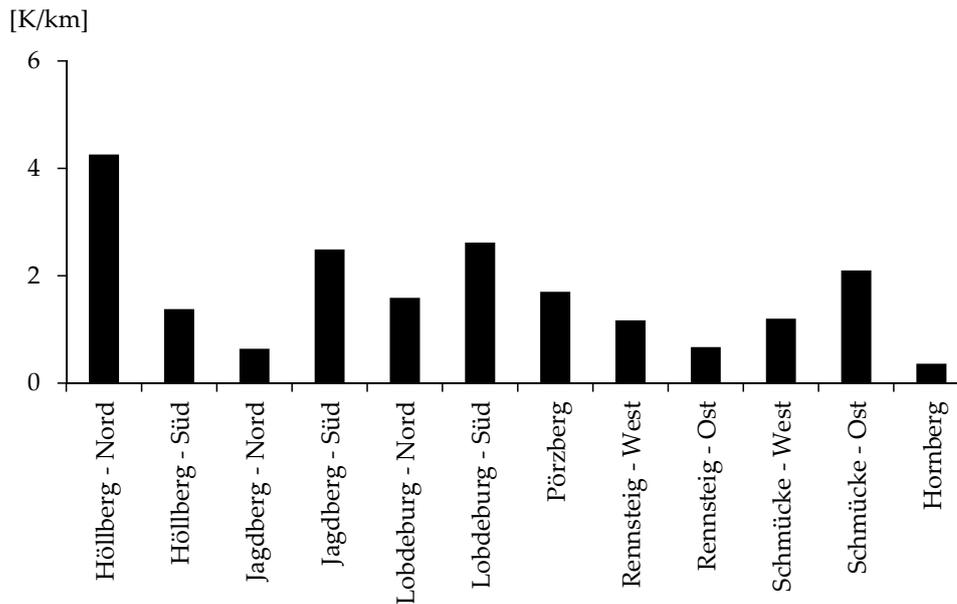


Abbildung C.6: Über den Auswertezeitraum gemittelte Temperaturgradienten der Tunnellufttemperatur in Längsrichtung des Tunnels

die Weihnachtsfeiertage bzw. den Jahreswechsel. Eine FFT der Temperaturmessdaten liefert sowohl für die untersuchten Tunnel mit Richtungsrohren, als auch für die Tunnel mit Gegenrichtungsrohren eine tägliche Periode. Die Temperaturmessdaten wurden des Weiteren über die Tunnellängsachse in stündlicher Auflösung aufgetragen und ausgewertet. Hierzu wird ein exemplarisches Diagramm für jede Tunnelröhre gezeigt, das den Temperaturverlauf zu einer willkürlich ausgewählten Stunde des Auswertzeitraums darstellt. Für alle ausgewerteten Tunnel existieren Videos, die den Temperaturverlauf über den gesamten Betrachtungszeitraum visualisieren. Für Tunnel mit Richtungsrohren zeigt sich hierbei grundsätzlich eine mit der Fahrtrichtung zunehmende Tunnellufttemperatur. Der Verlauf der Stundenmittelwerte der Tunnellufttemperatur über die Tunnellängsachse wurde über eine lineare Regression angenähert. Die Steigung dieser Regression wird zusammen mit dem entsprechenden Bestimmtheitsmaß in Diagrammform wiedergegeben. Die über den Auswertzeitraum gemittelten Temperaturgradienten je Tunnelröhre zeigt die Abbildung C.6.

Das für die Tunnelluftströmung entwickelte Gedankenmodell zur Trennung der durch die Fahrzeuge hervorgerufenen Strömung von der Grundströmung eines Tunnels, wurde auch auf den Temperaturgradienten der untersuchten Tunnel angewendet. Das Ergebnis dieser Analyse wird in Diagrammform für den ausgewerteten Zeitraum wiedergegeben. Die Abbildung C.7 zeigt zusammenfassend die über den Auswertzeitraum gemittelten Temperaturgradienten der Tunnellufttemperatur in Längsrichtung des Tunnels, getrennt nach den Anteilen aus Schwerverkehr und sonstigen Einflüssen.

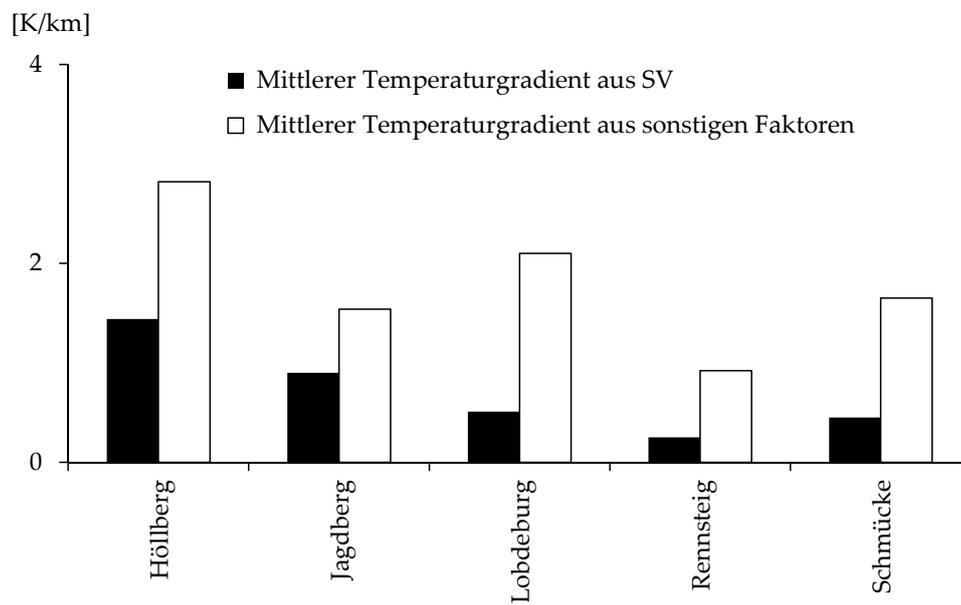


Abbildung C.7: Über den Auswertzeitraum gemittelte Temperaturgradienten der Tunnellufttemperatur in Längsachse des Tunnels getrennt nach den Anteilen aus Schwerverkehr und sonstigen Einflüssen



## Tunnel Alte Burg



|                                       |   |                           |                   |
|---------------------------------------|---|---------------------------|-------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Thüringen                                       | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 2                 |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | A71   | <u>Länge i.M.:</u>        | 870 m             |
| <u>Gradiente:</u>                     | 2,5% Norden                                     | <u>Überdeckung:</u>       | k.A.              |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | 24092   | <u>Luftquerschnitt</u>    | 59 m <sup>2</sup> |
|                                       | <small>(Daten von Rennsteig übernommen)</small> |                           |                   |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | nein  |                           |                   |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja  | 23.08.2016 - 31.01.2017   |                   |



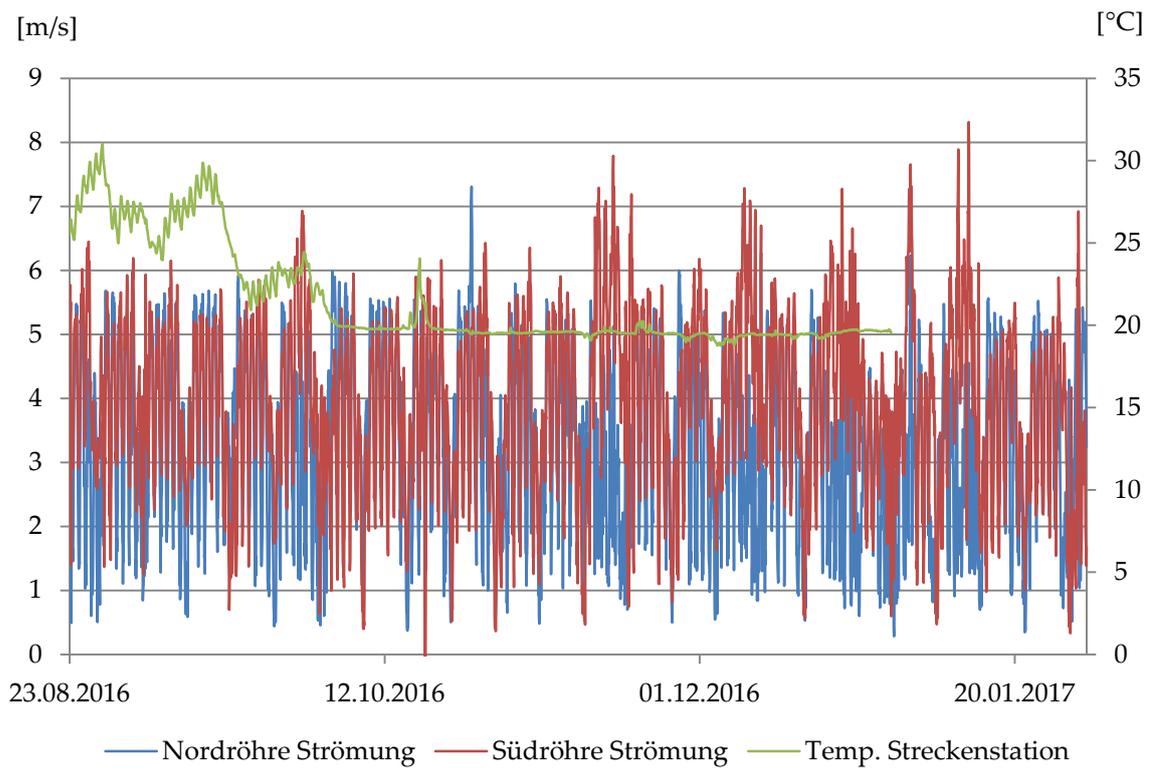


Abbildung C. 8: Tunnelluftströmung Nord- und Südröhre, Temperaturverlauf Streckenstation

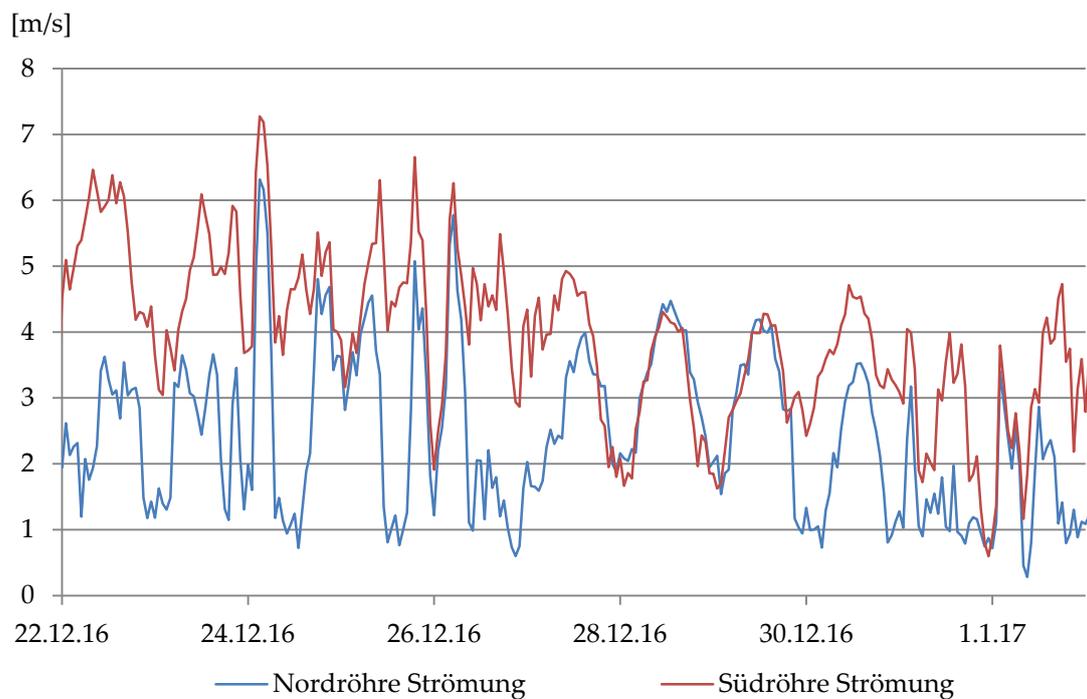


Abbildung C. 9: Tunnelluftströmung Nord- und Südröhre über Weihnachten

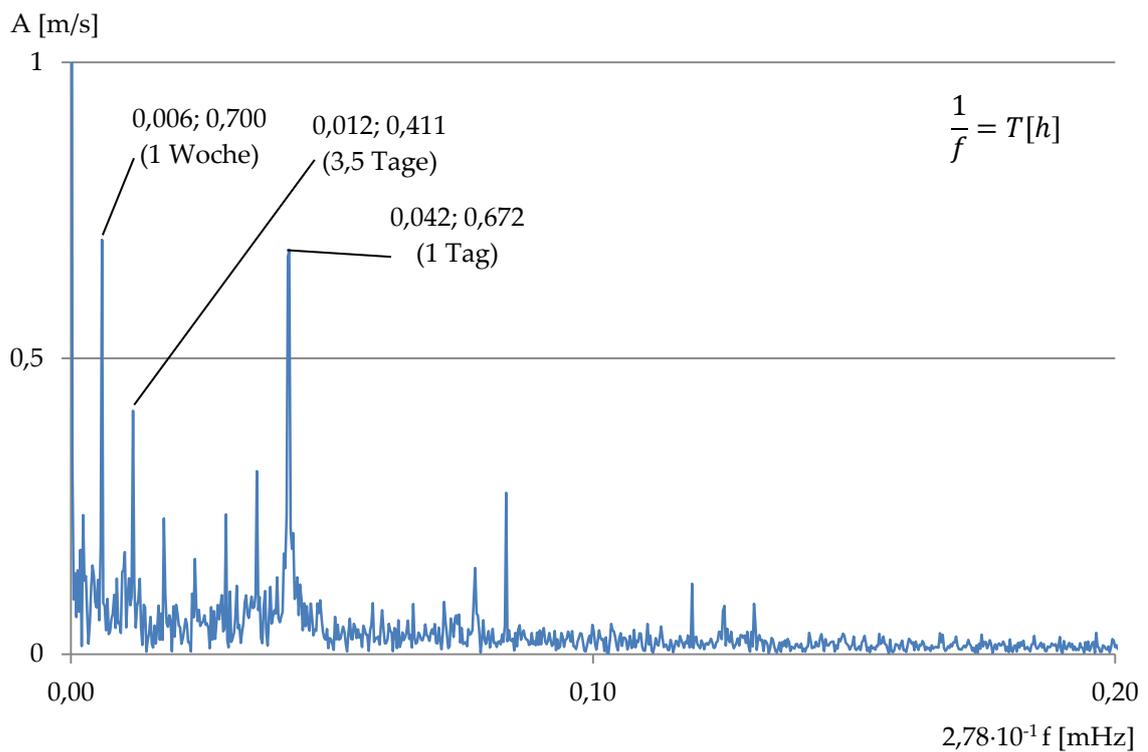


Abbildung C. 10: FFT - Tunnelluftströmung Nordröhre

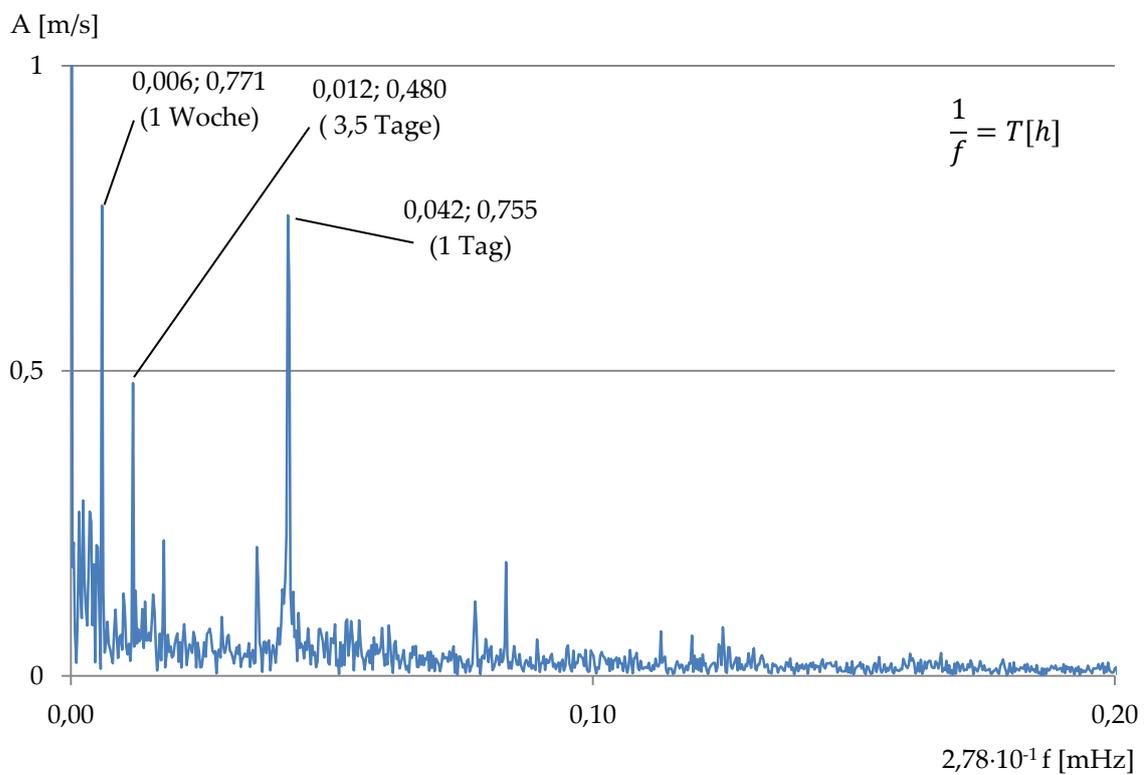


Abbildung C. 11: FFT - Tunnelluftströmung Südröhre

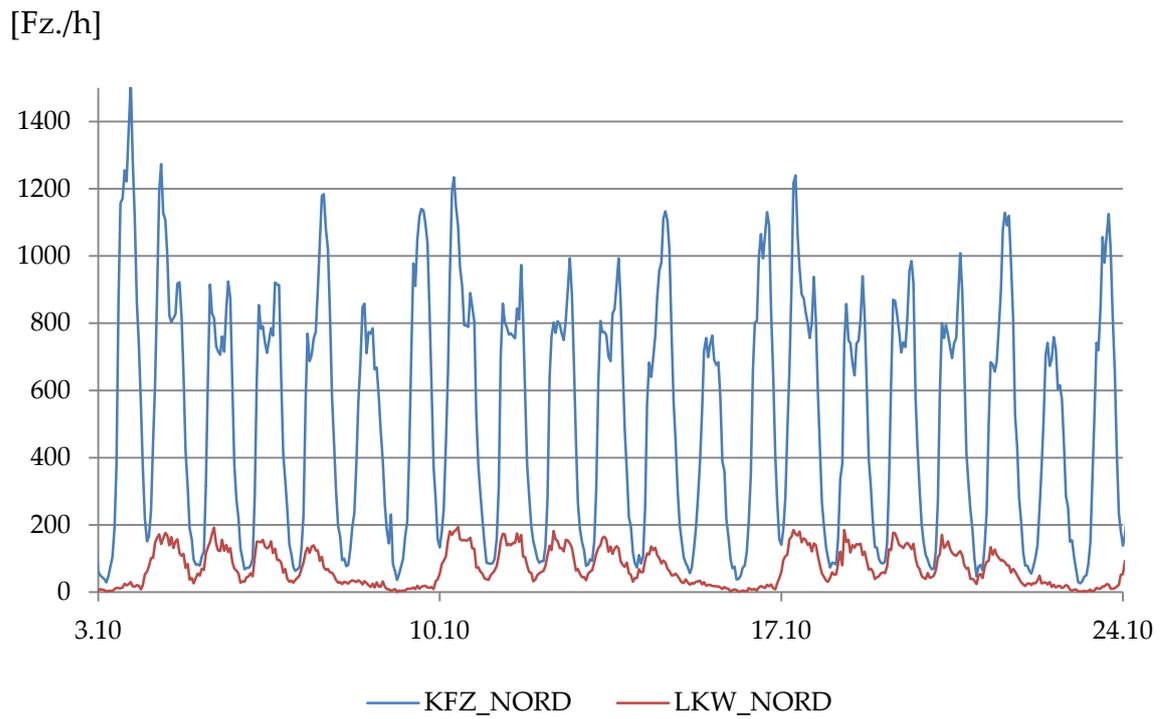


Abbildung C. 12: Verkehrsdaten Nordröhre

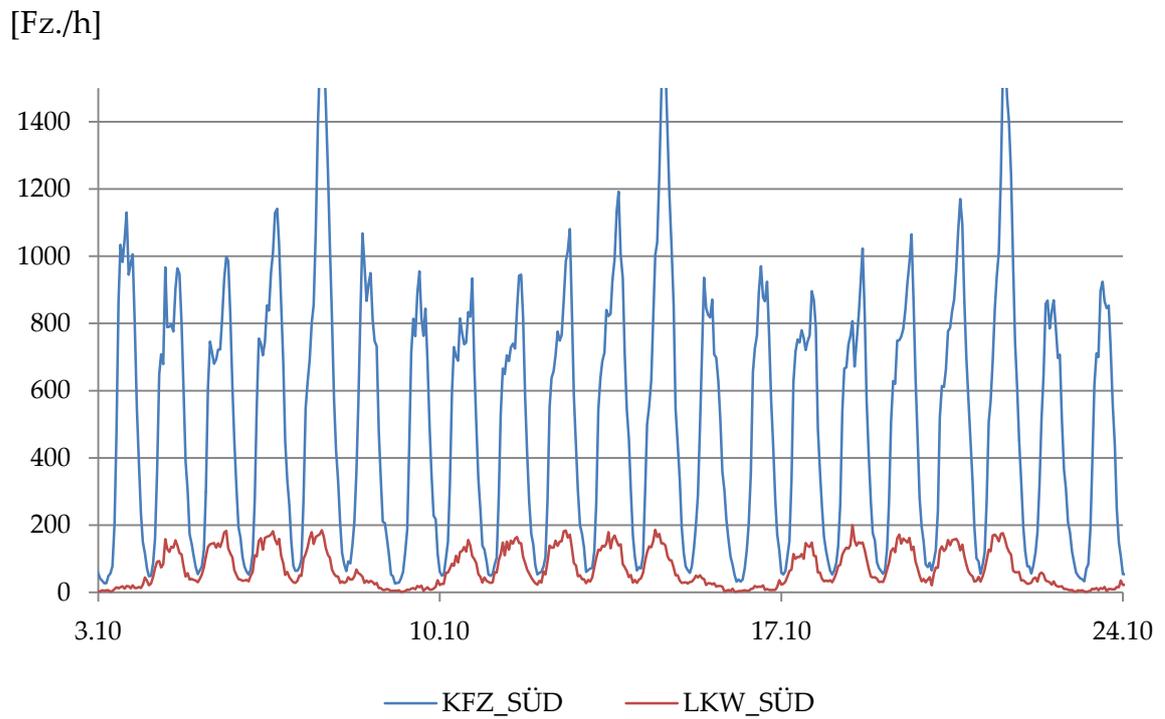


Abbildung C. 13: Verkehrsdaten Südröhre

---

[Fz./h]

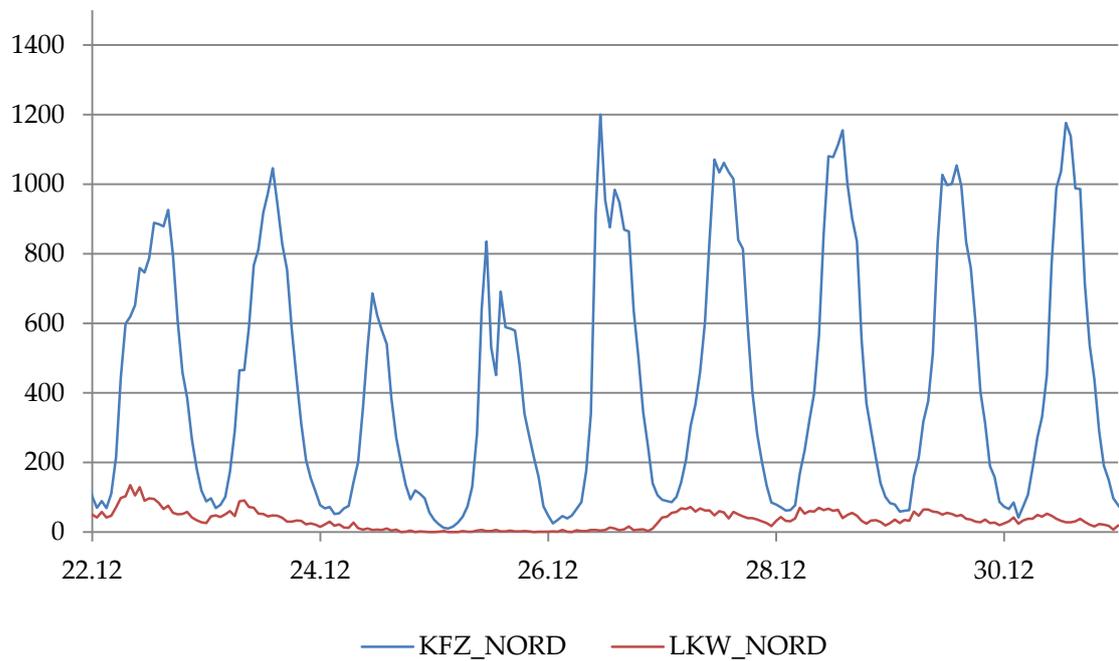


Abbildung C. 14: Verkehr über Weihnachten in Nordröhre

[Fz./h]

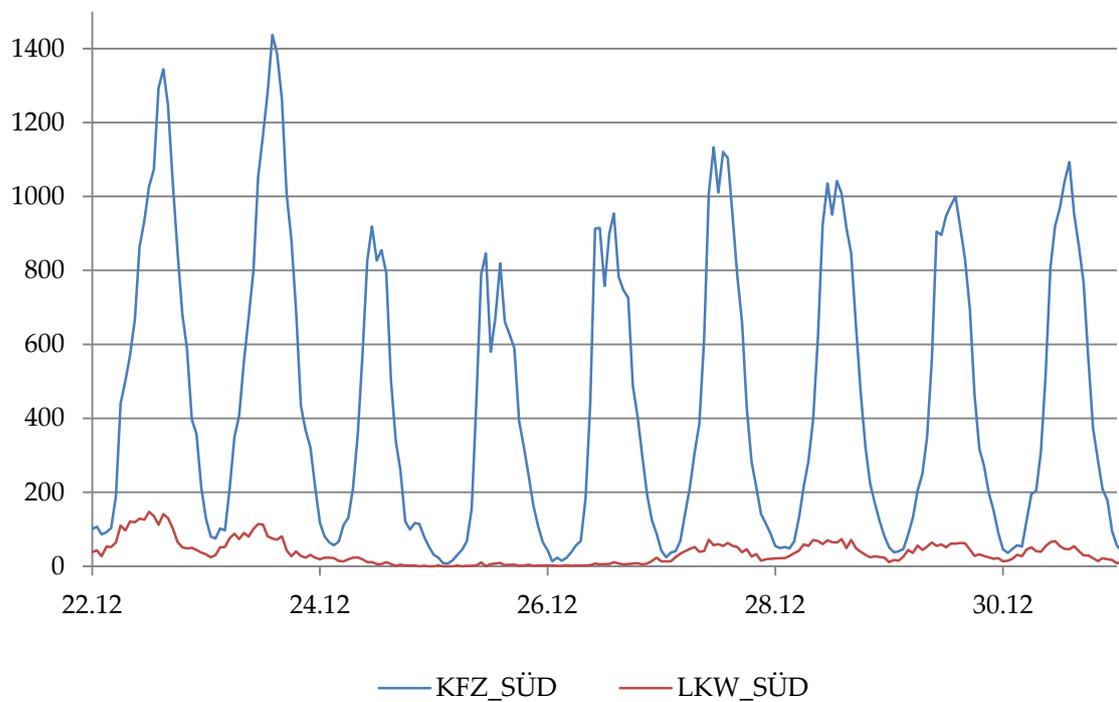


Abbildung C. 15: Verkehr über Weihnachten in Südröhre

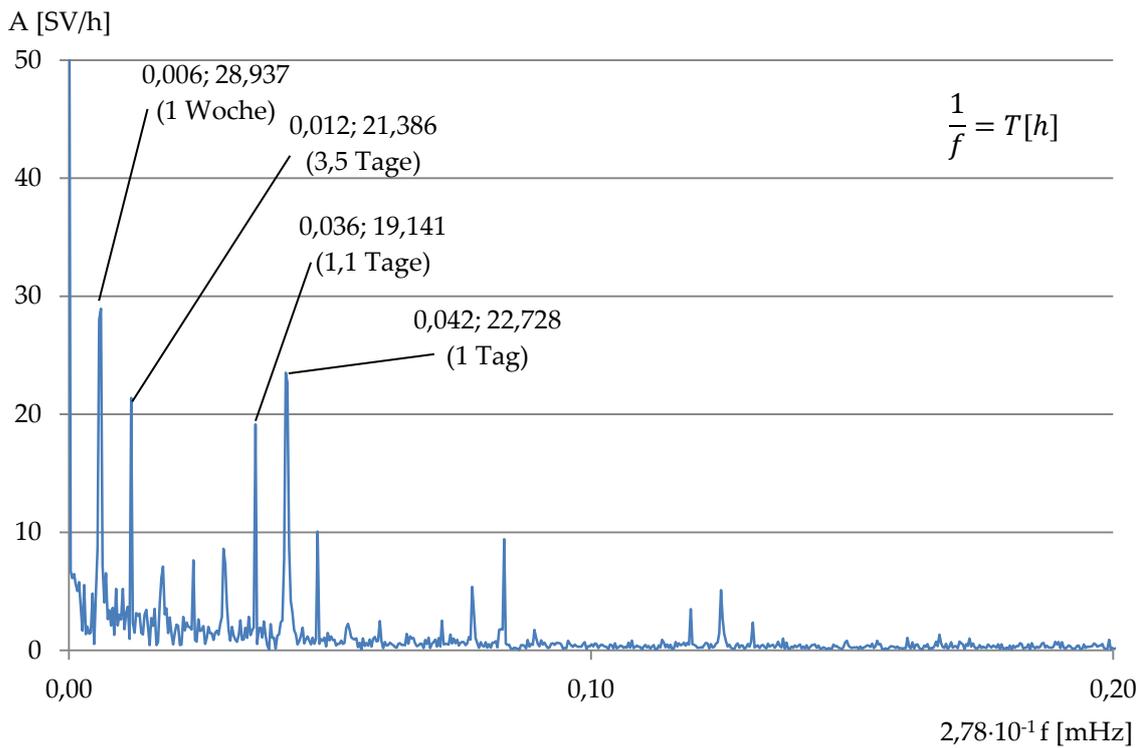


Abbildung C. 16: FFT - Schwerverkehr Nordröhre

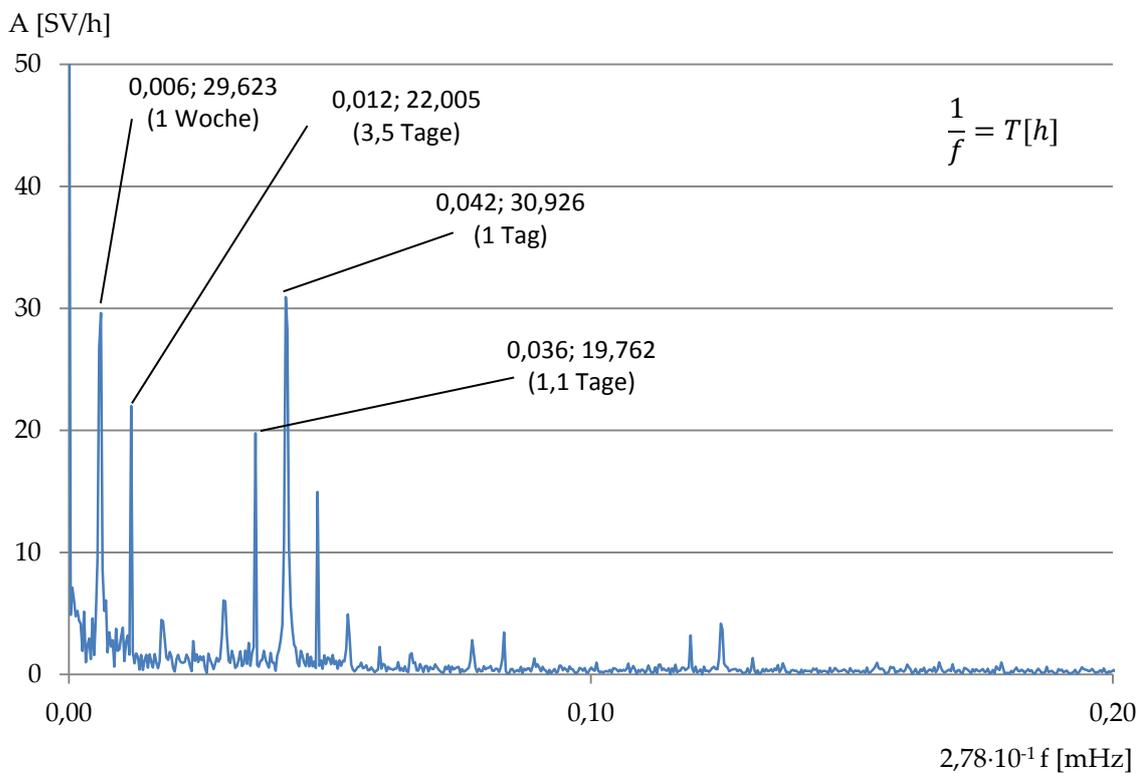


Abbildung C. 17: FFT - Schwerverkehr Südröhre

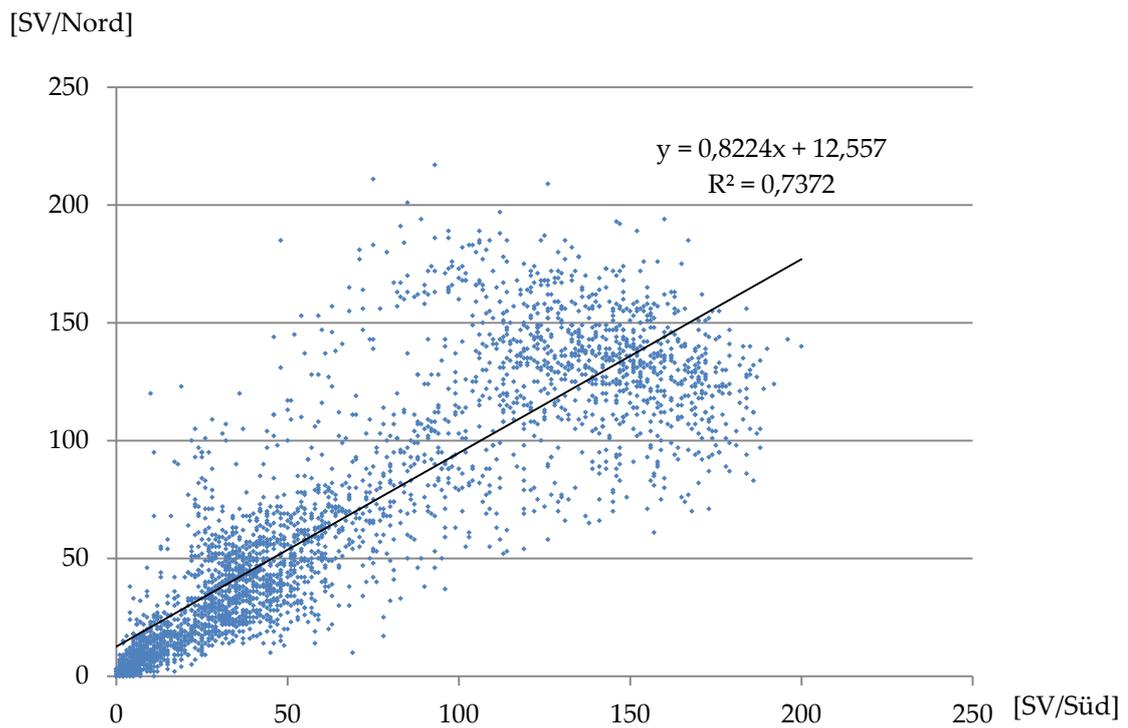


Abbildung C. 18: Korrelation Schwerverkehr Südröhre gegen Nordröhre

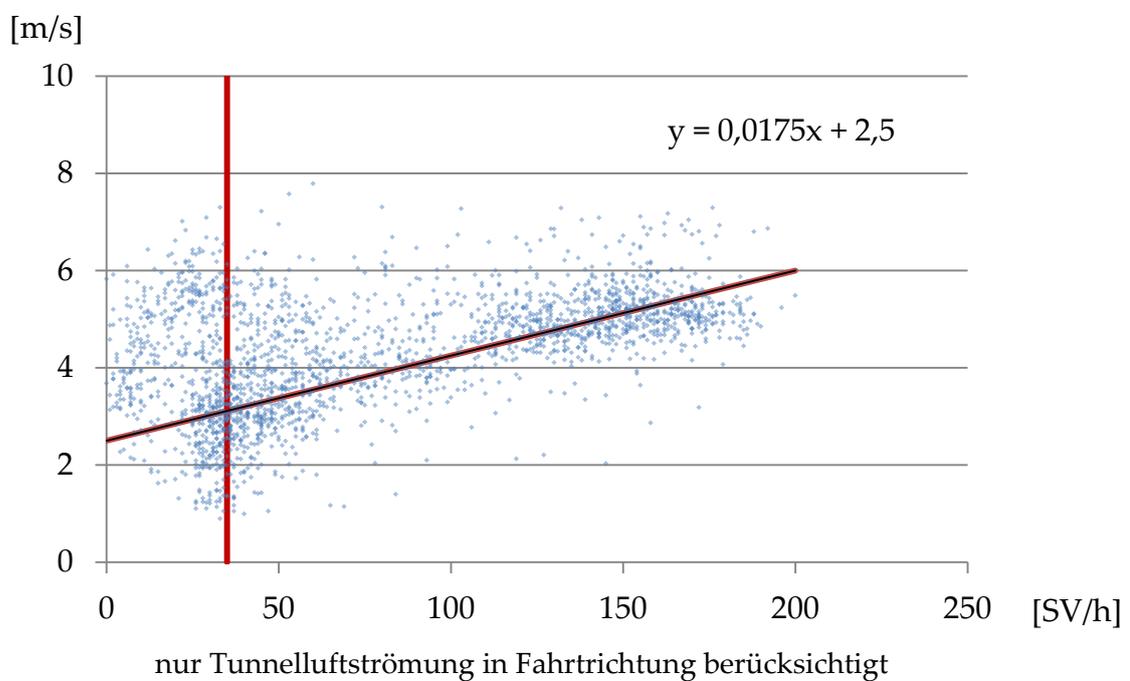


Abbildung C. 19: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Süd, ohne Berücksichtigung der Wochenenden

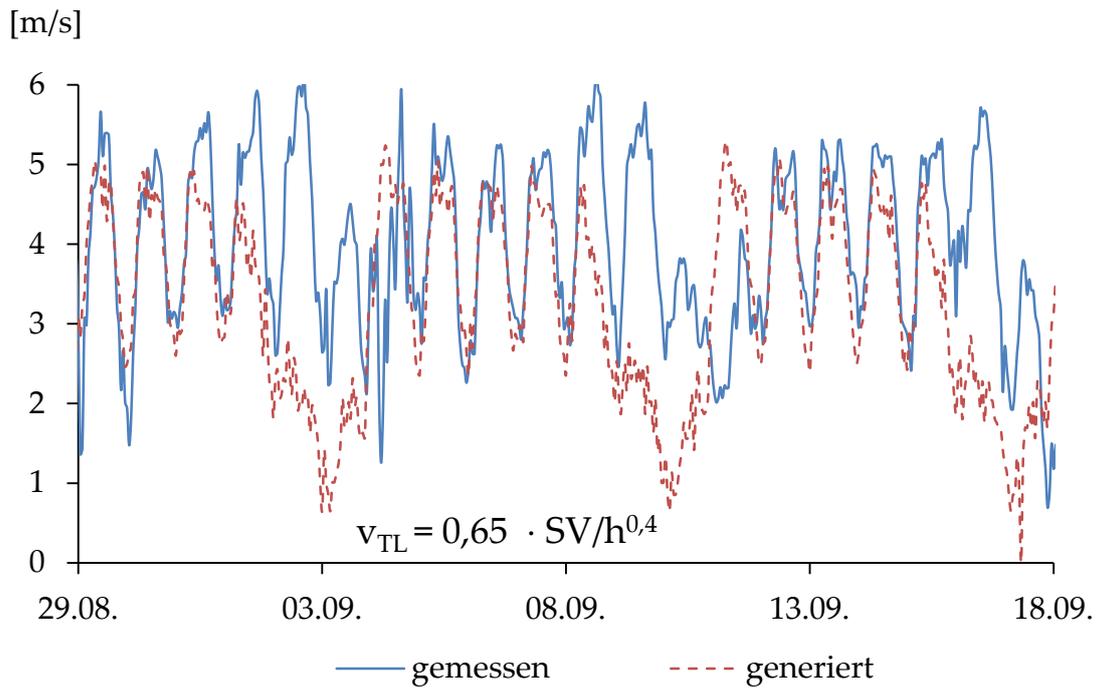


Abbildung C. 20: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Südöhre

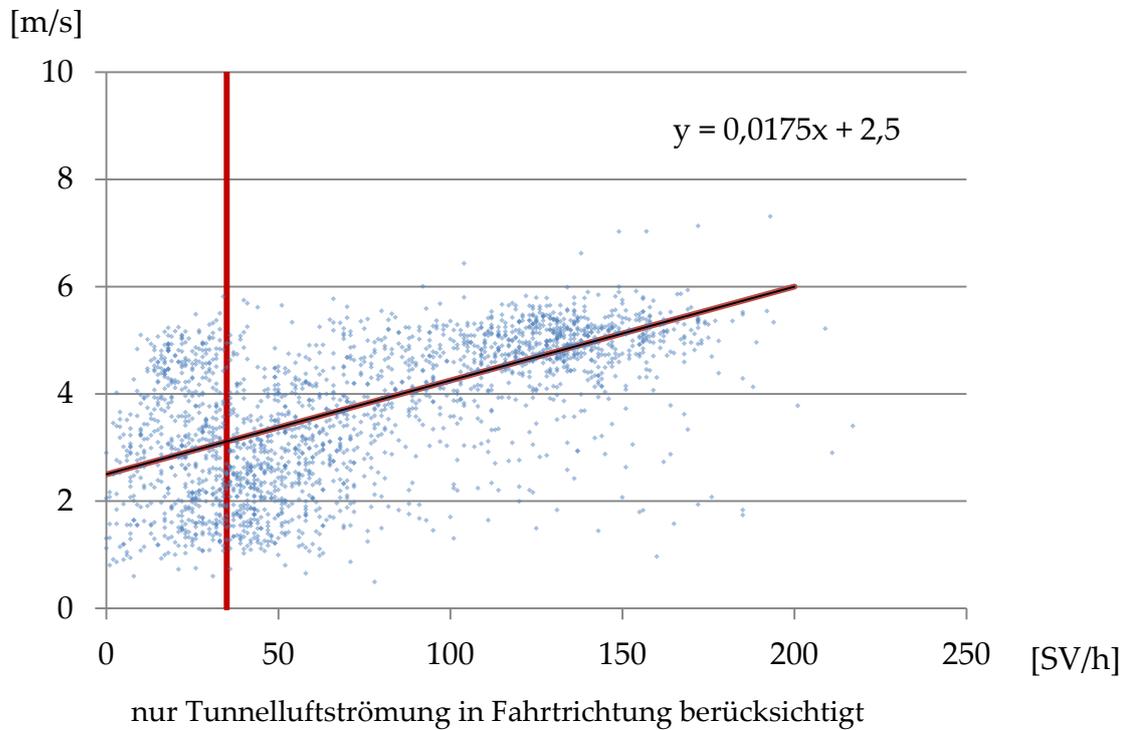


Abbildung C. 21: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Nord, ohne Berücksichtigung der Wochenenden

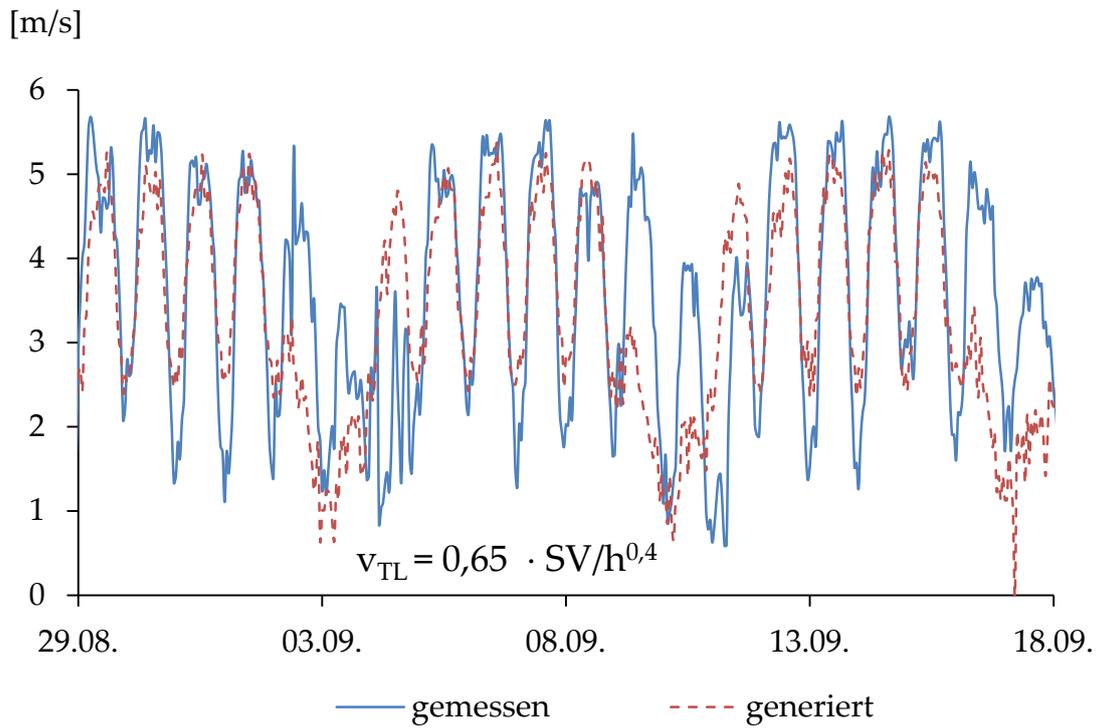


Abbildung C. 22: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Nordröhre

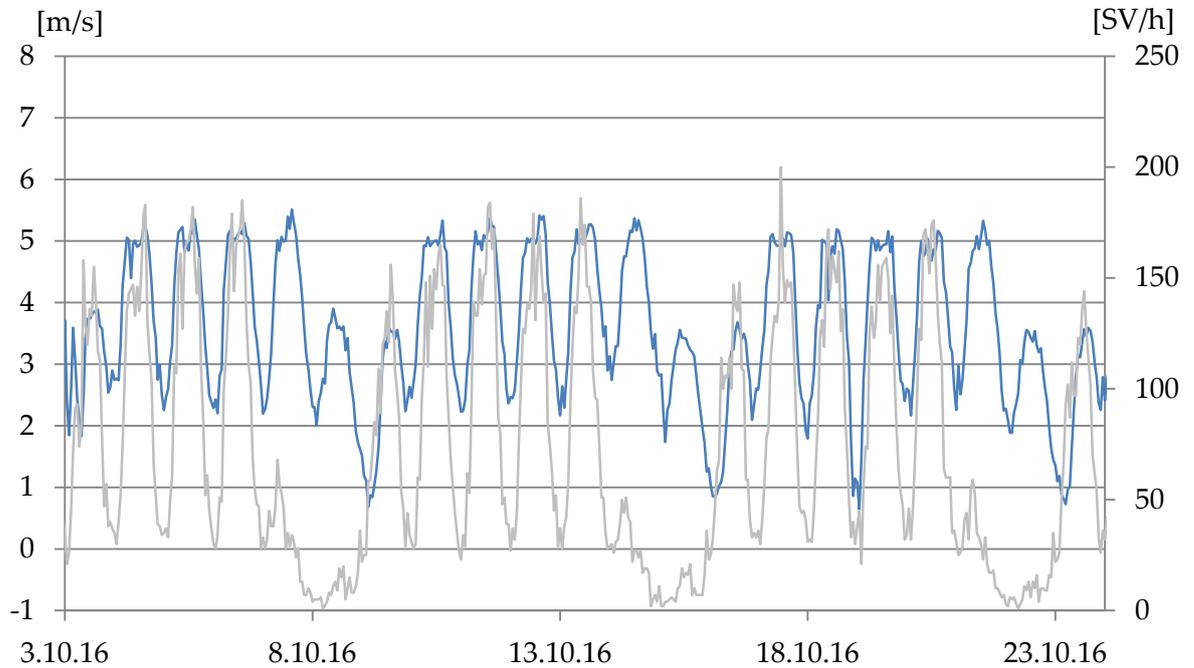


Abbildung C. 23: Anteil Schwerverkehr an Tunnelluftströmung

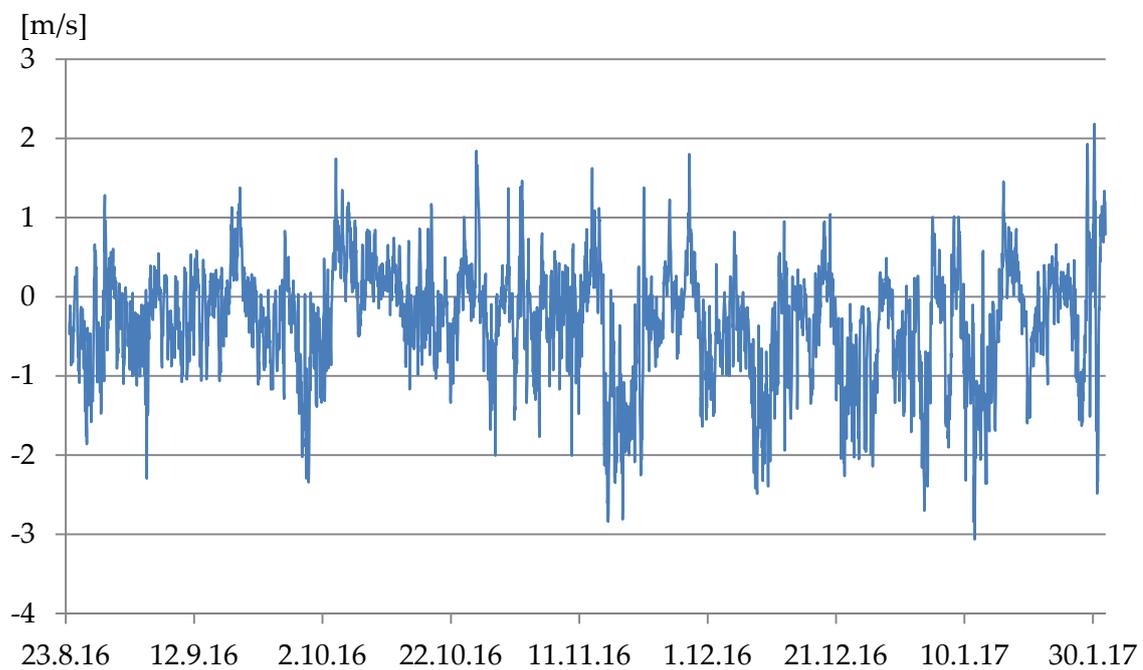


Abbildung C. 24: Grundströmung

## Tunnel Berg Bock



|                                       |            |                           |                   |
|---------------------------------------|------------|---------------------------|-------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Thüringen  | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 2                 |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | A71        | <u>Länge i.M.:</u>        | 2728 m            |
| <u>Gradiente:</u>                     | 1,0% Süden | <u>Überdeckung:</u>       | k.A.              |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | 24111      | <u>Luftquerschnitt</u>    | 59 m <sup>2</sup> |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | nein       |                           |                   |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja         | 21.08.2016 - 31.01.2017   |                   |



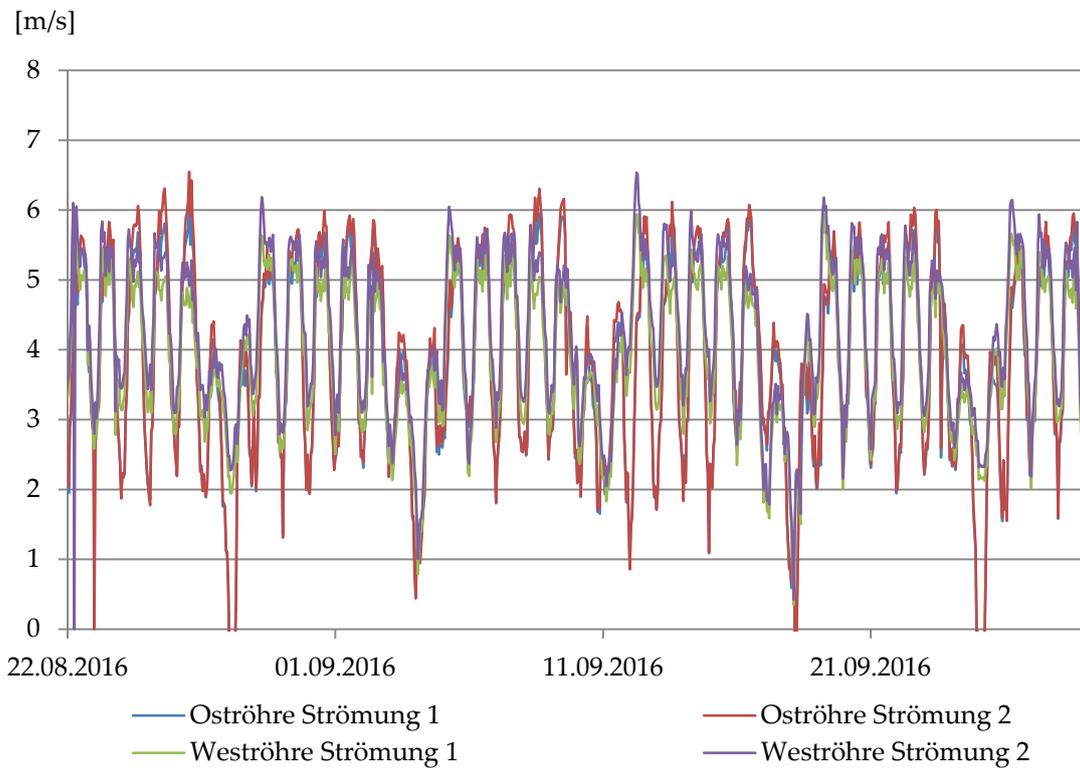


Abbildung C. 25: Tunnelluftströmungsmessung Oströhre- und Weströhre

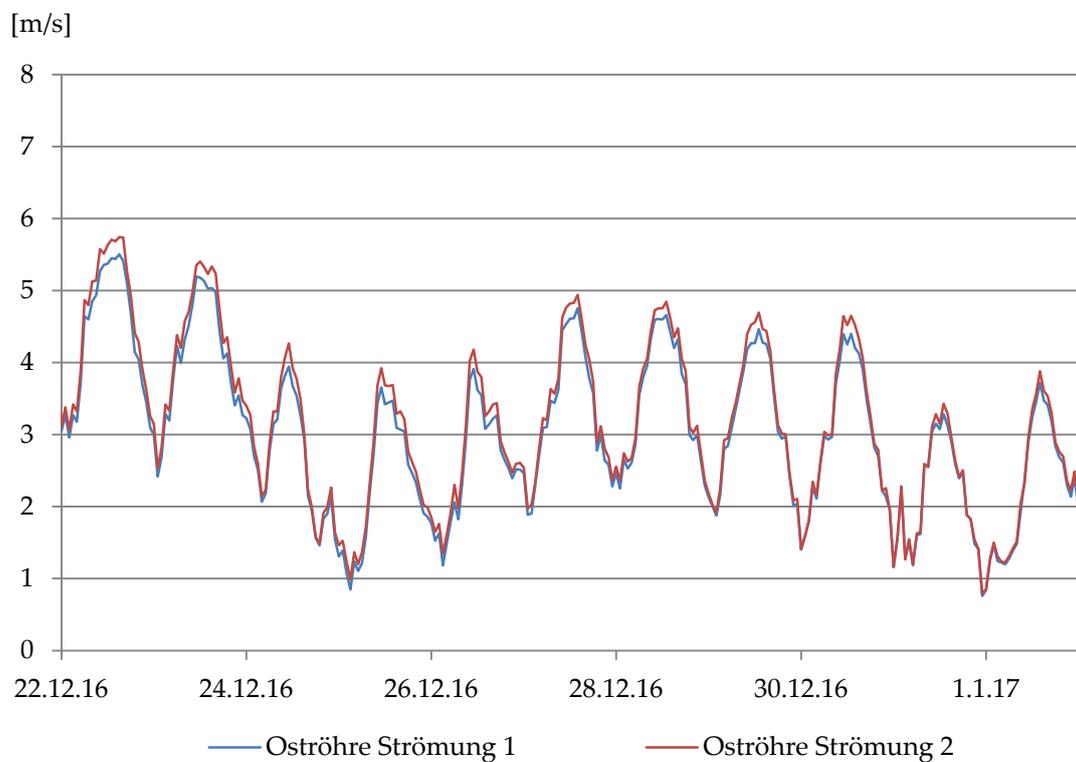


Abbildung C. 26: Tunnelluftströmung Oströhre über Weihnachten

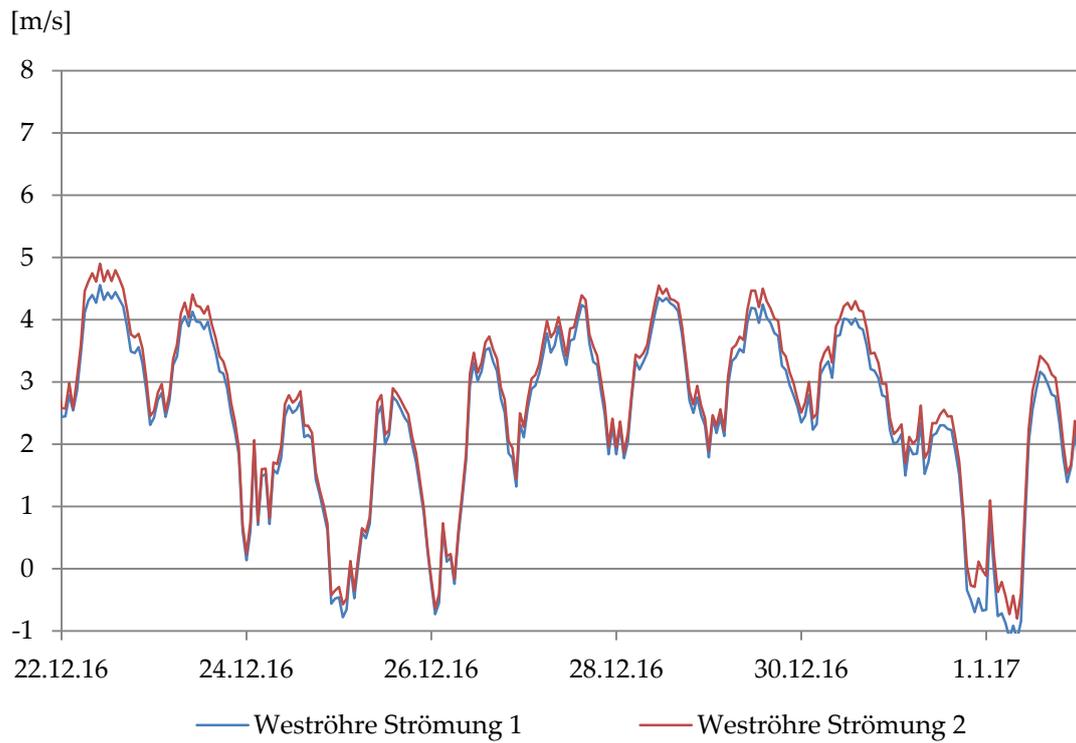


Abbildung C. 27: Tunnelluftströmung Oströhre über Weihnachten

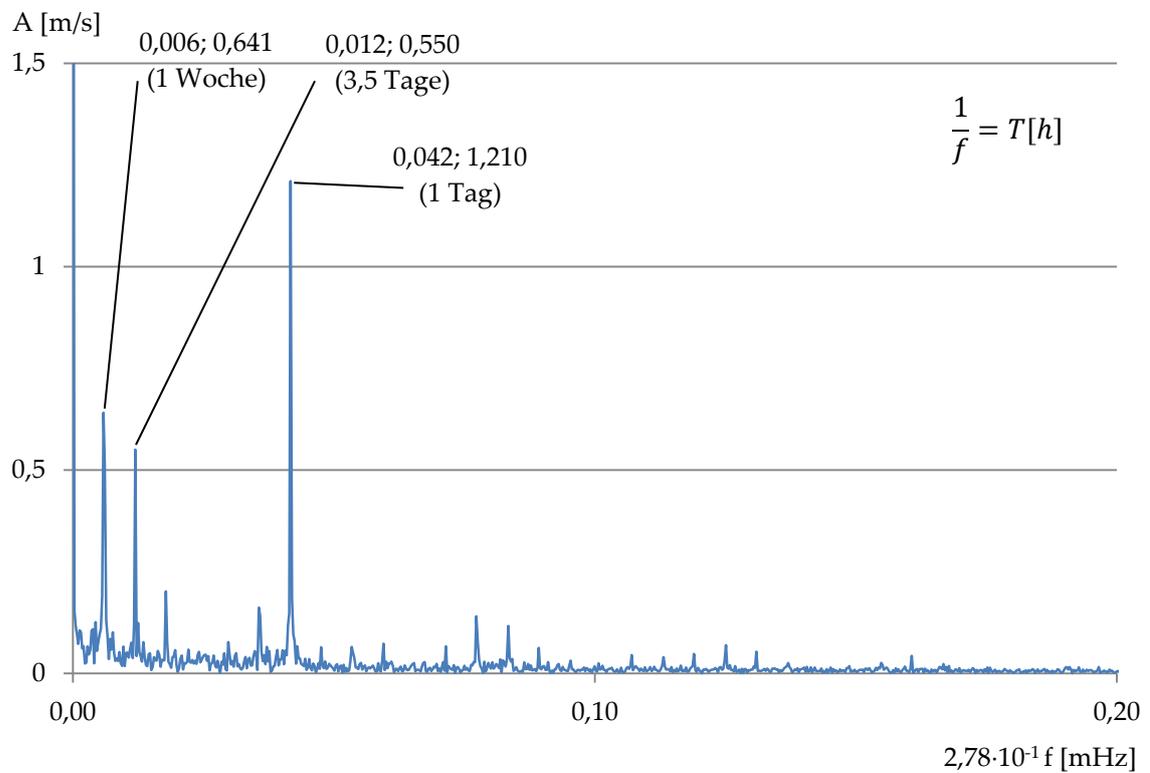


Abbildung C. 28: FFT – Tunnelluftströmung Oströhre

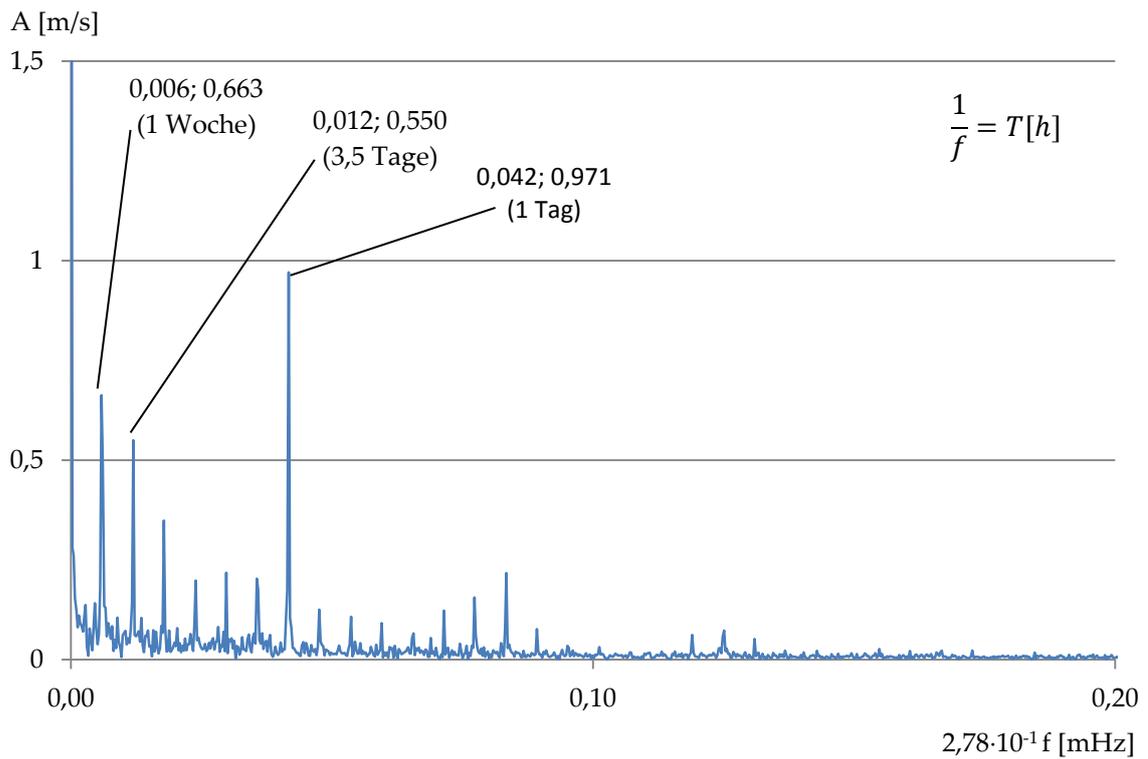


Abbildung C. 29: FFT - Tunnelluftströmung Weströhre

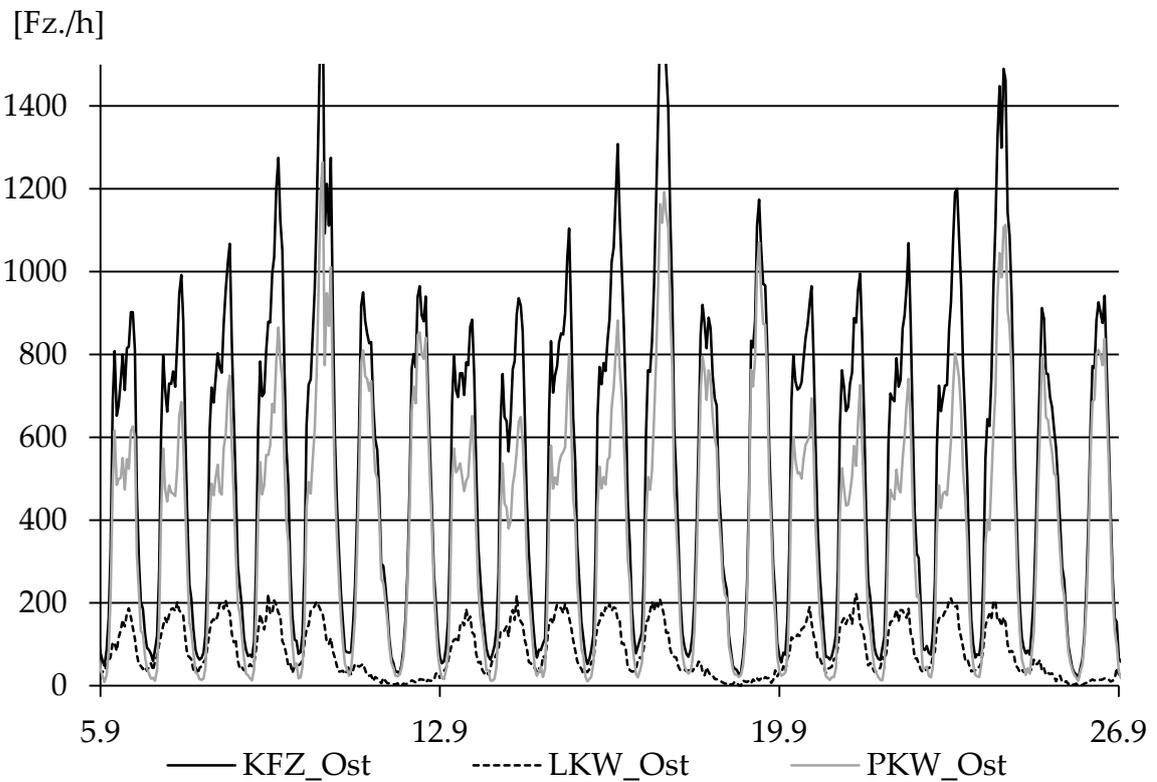


Abbildung C. 30: Verkehrsdaten Oströhre

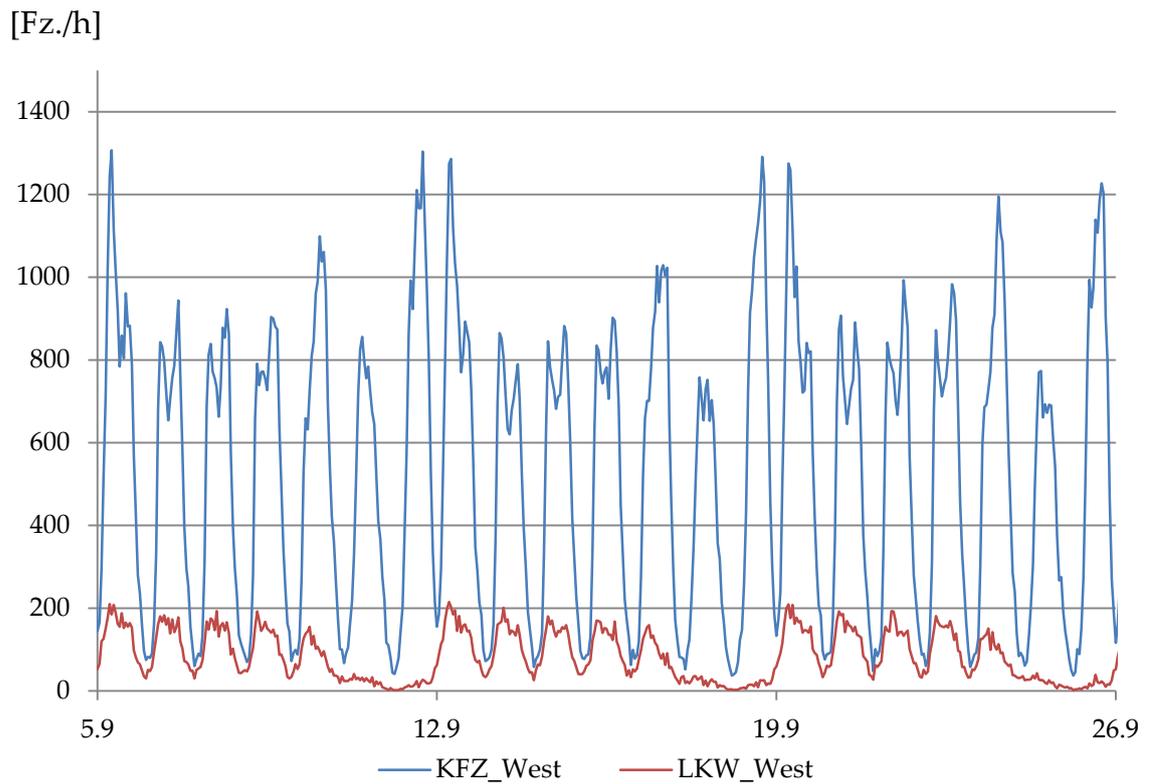


Abbildung C. 31: Verkehrsdaten Weströhre

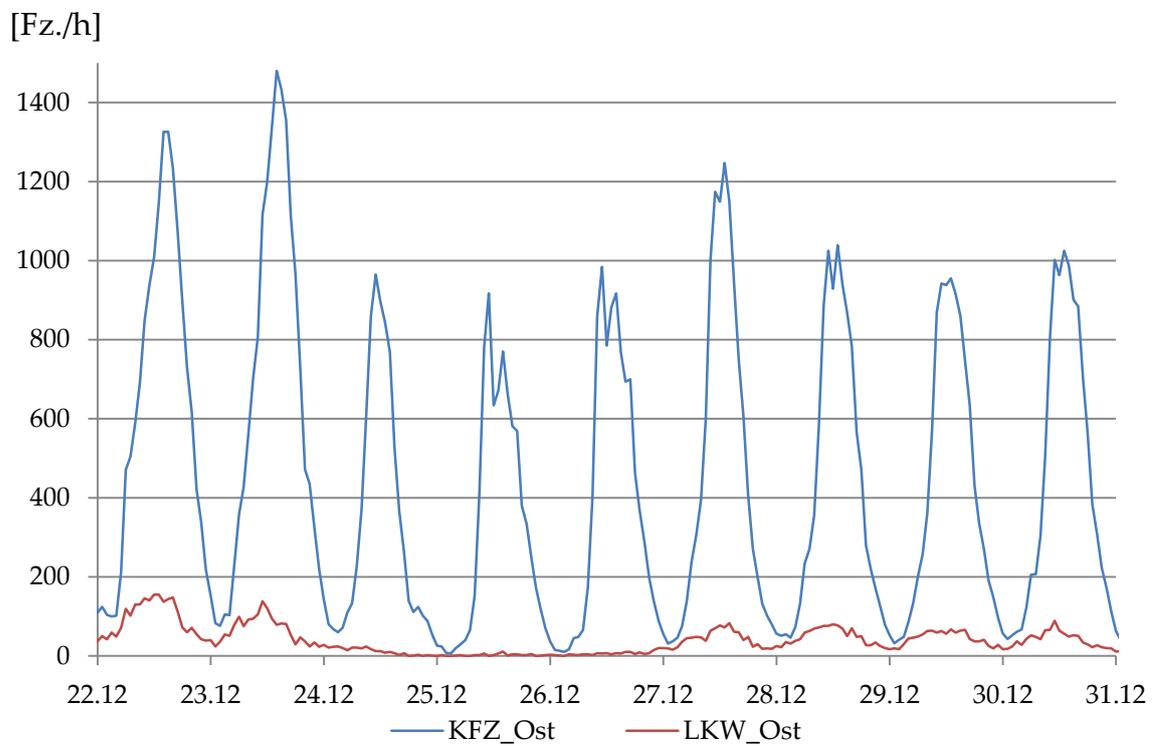


Abbildung C. 32: Verkehr über Weihnachten Oströhre

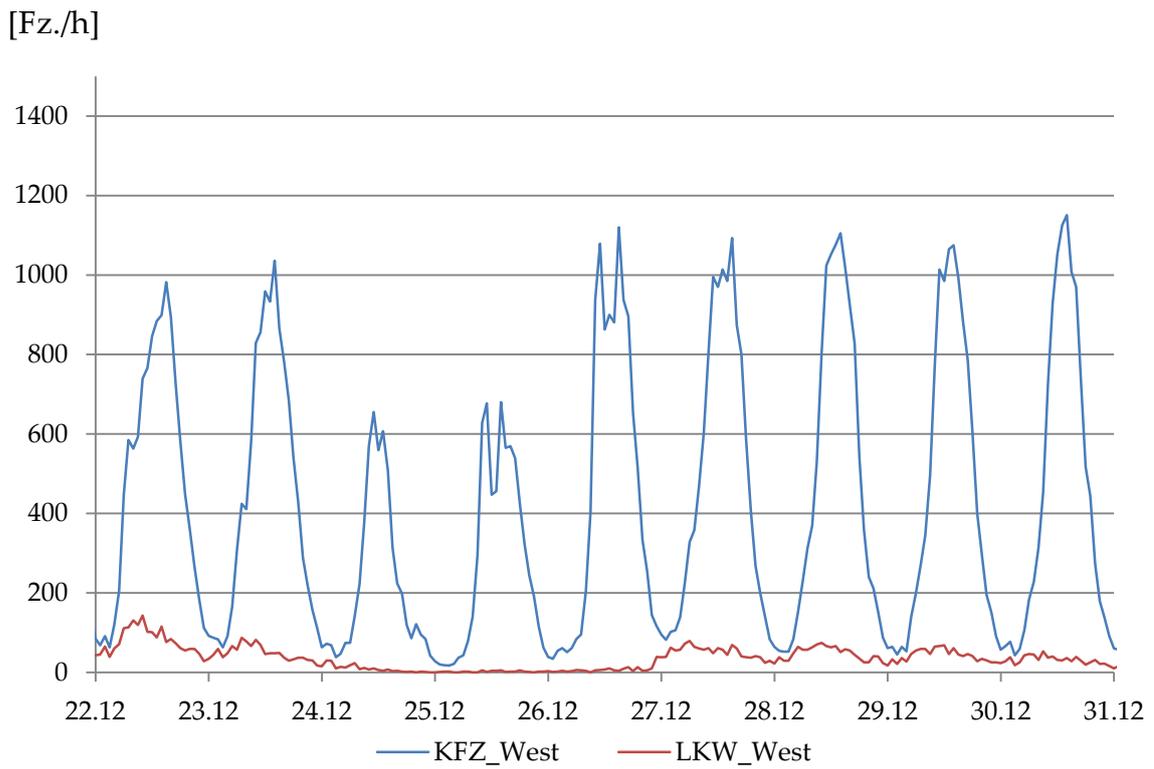


Abbildung C. 33: Verkehr über Weihnachten Weströhre

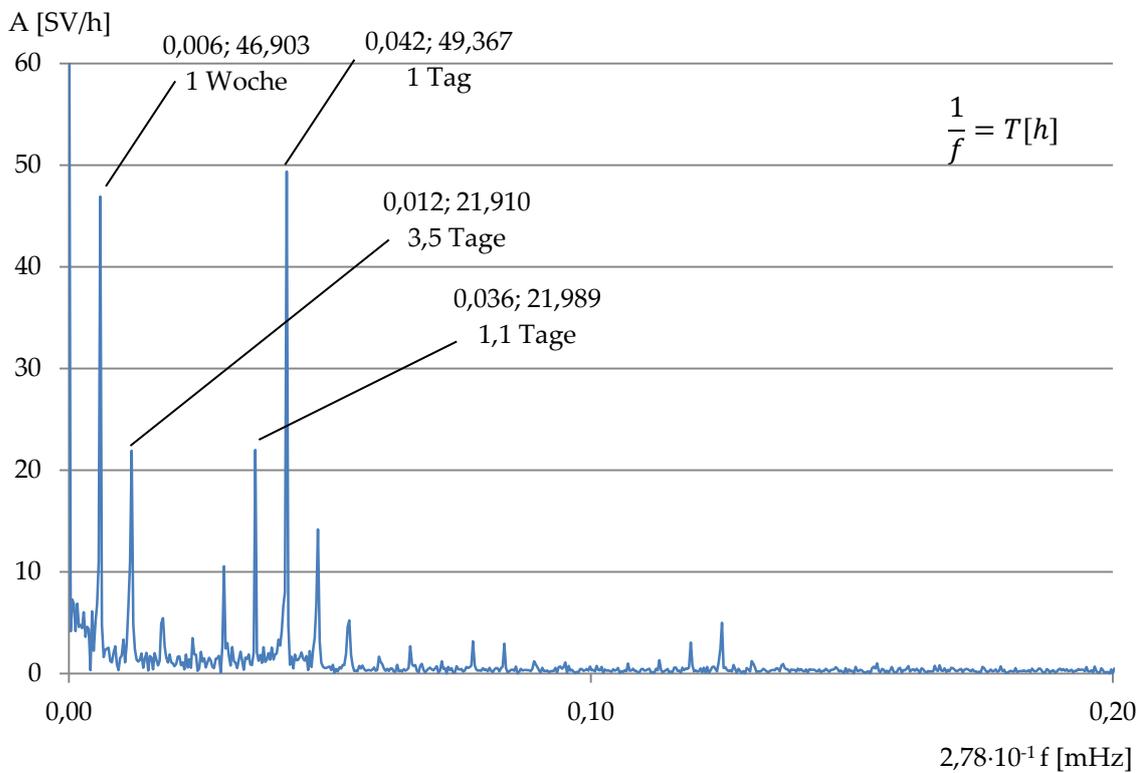


Abbildung C. 34: FFT - Schwerverkehr Osttröhre

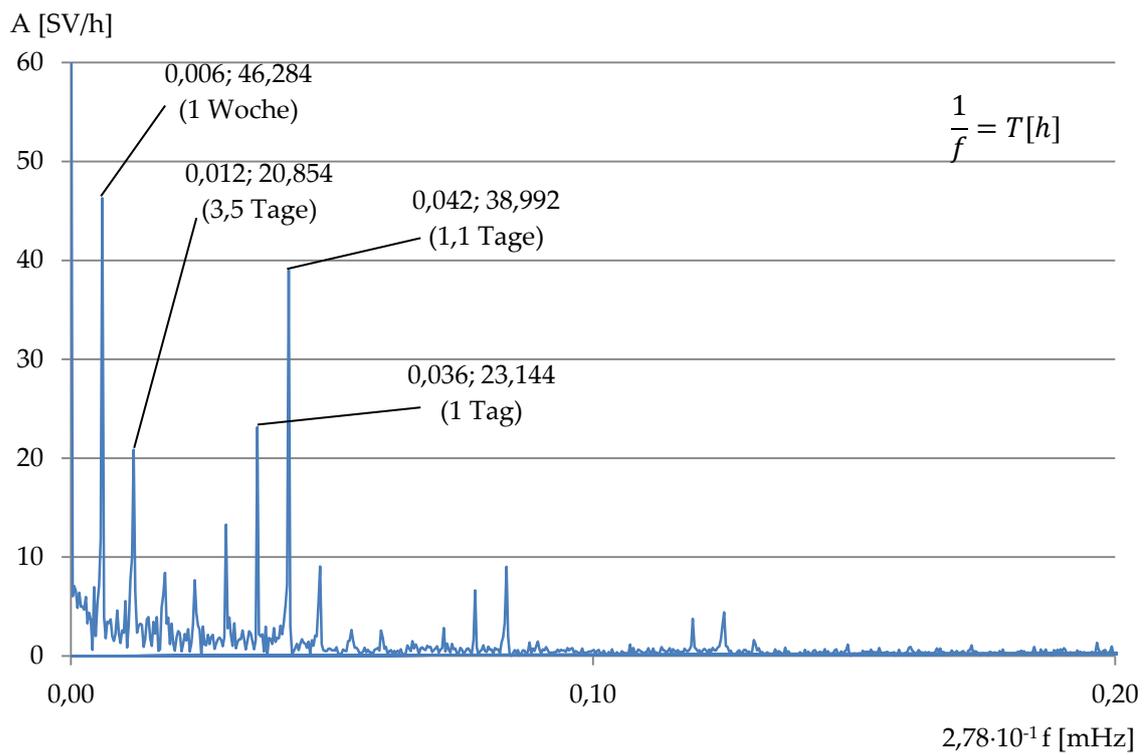


Abbildung C. 35: FFT - Schwerverkehr Weströhre

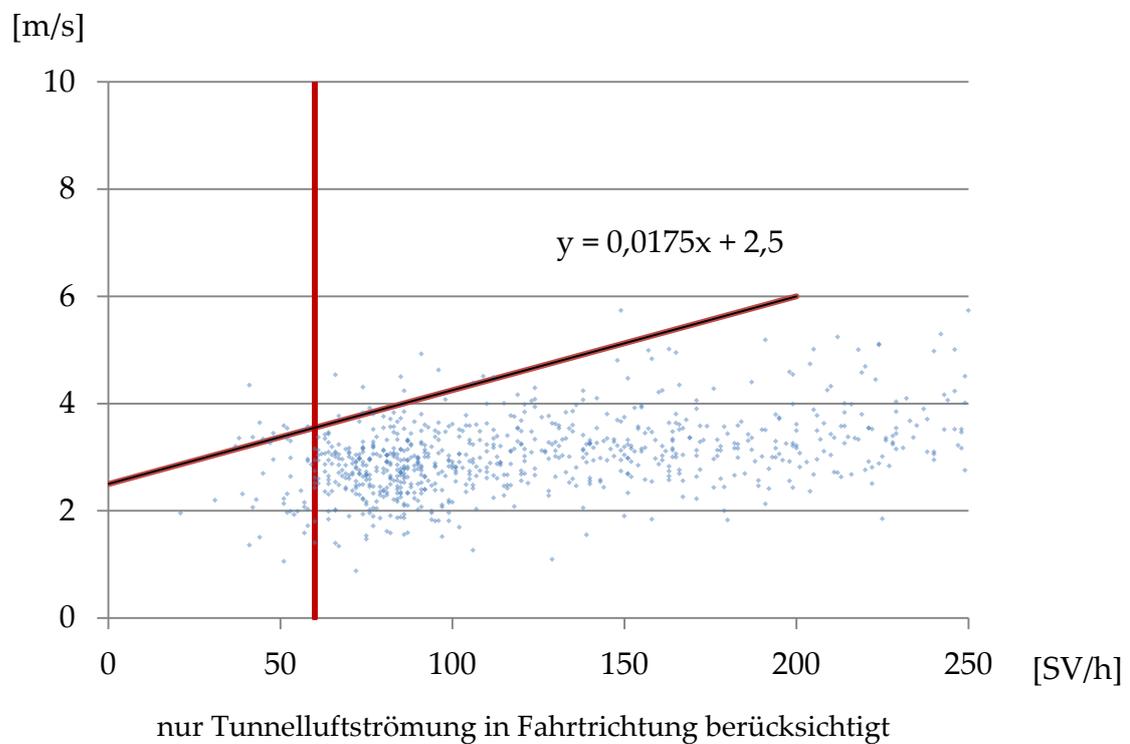


Abbildung C. 36: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Oströhre

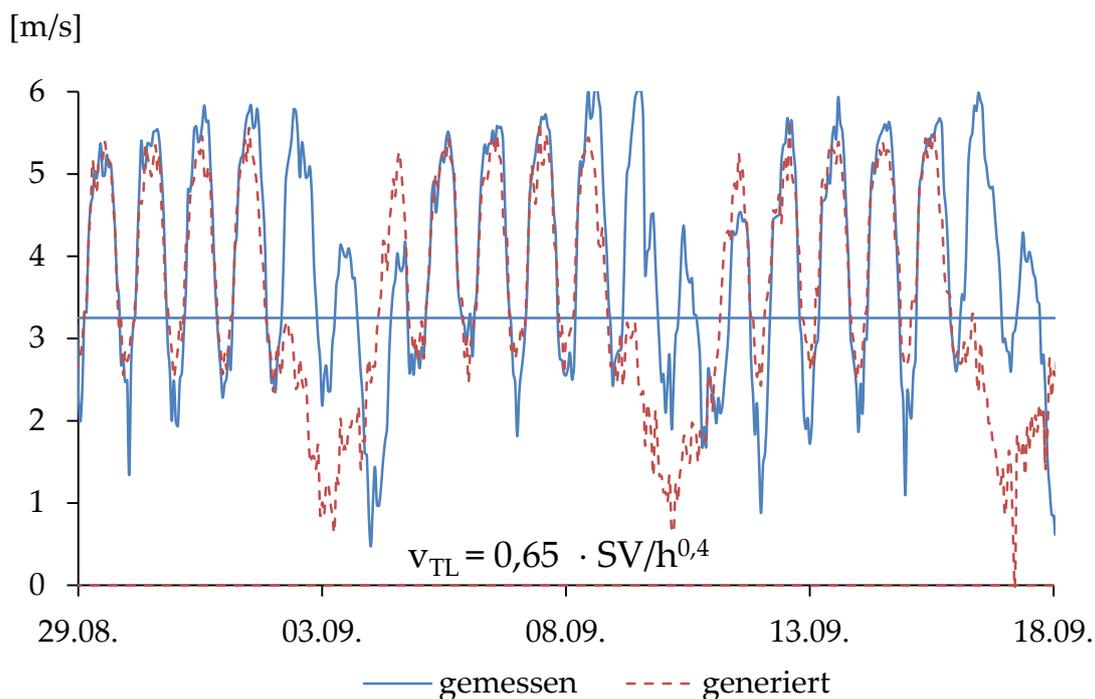


Abbildung C. 37: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Oströhre

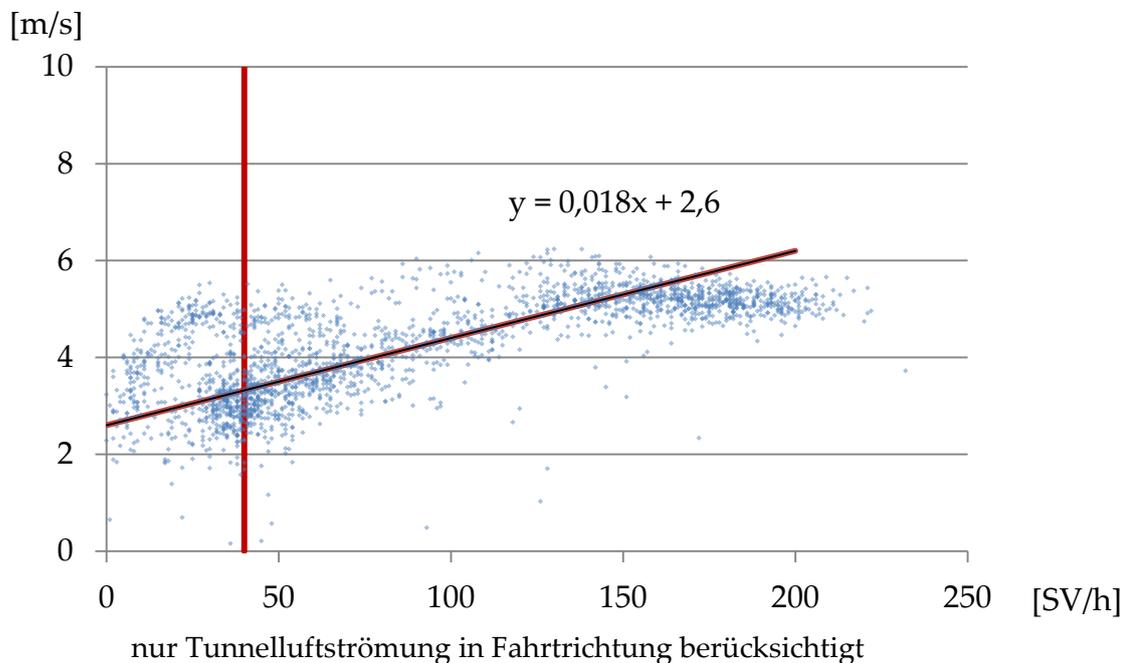


Abbildung C. 38: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Weströhre

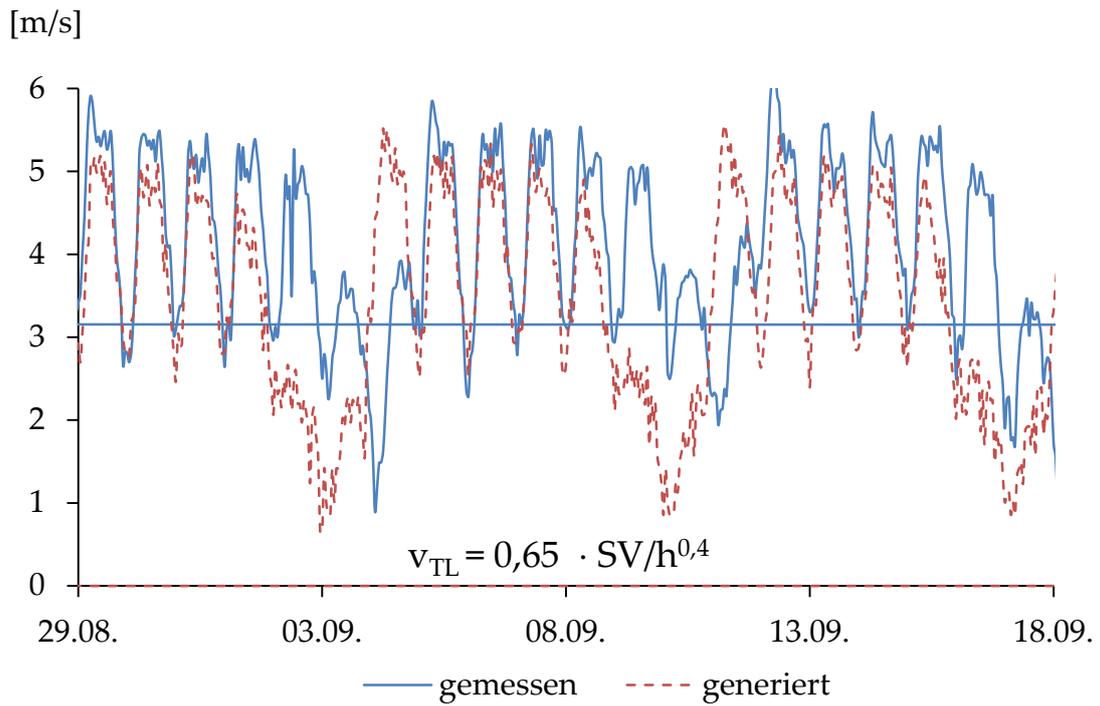


Abbildung C. 39: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Weströhre

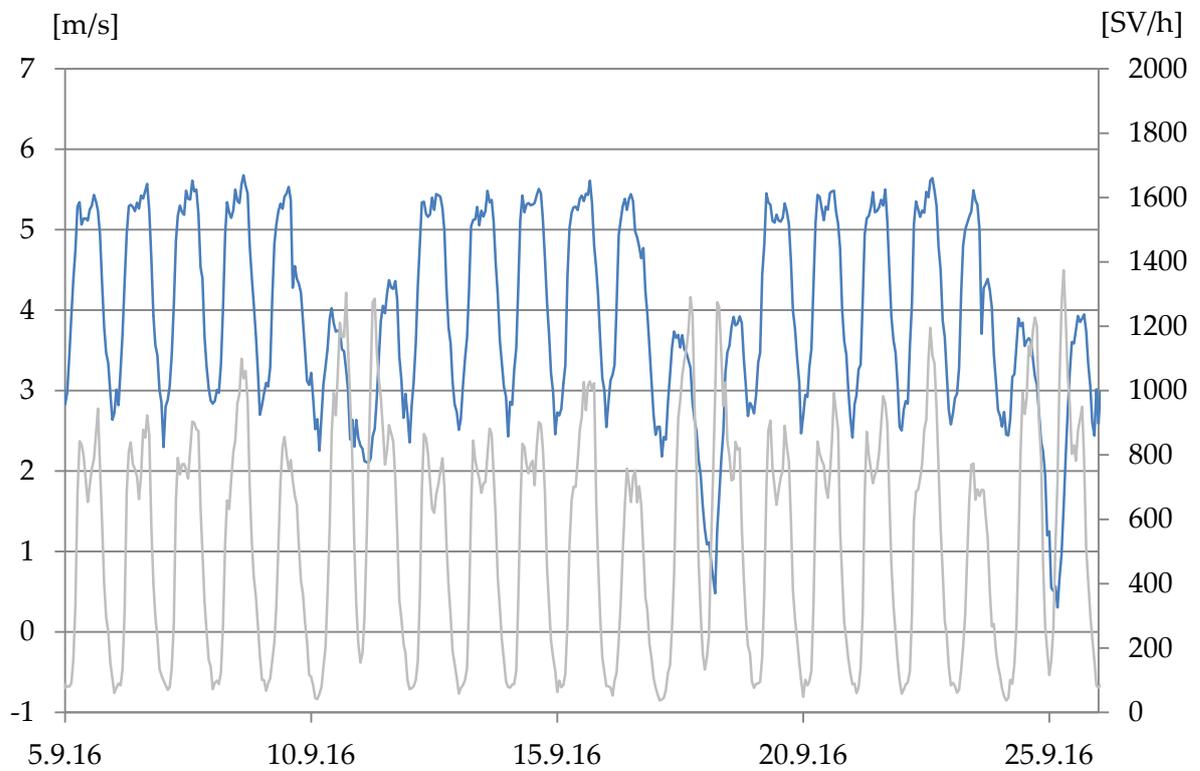


Abbildung C. 40: Anteil Schwerverkehr an Tunnelluftströmung

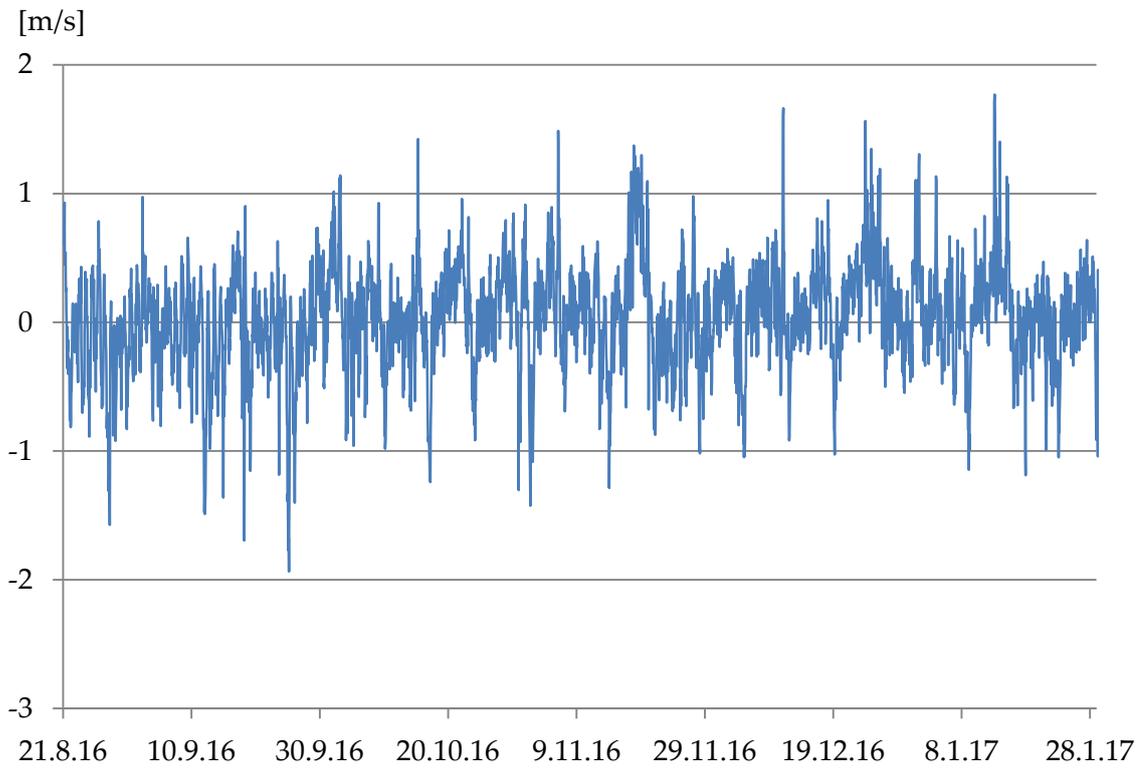
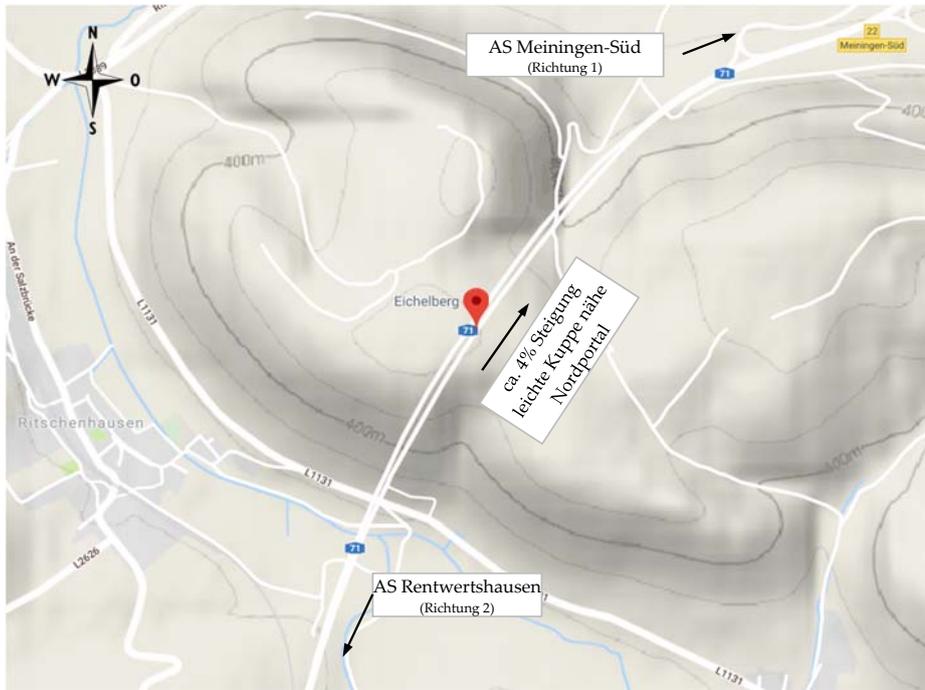


Abbildung C. 41: Grundströmung

## Tunnel Eichelberg



|                                       |           |                           |                         |
|---------------------------------------|-----------|---------------------------|-------------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Thüringen | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 2                       |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | A71       | <u>Länge i.M.:</u>        | 1110 m                  |
| <u>Gradiente:</u>                     | 4% Norden | <u>Überdeckung:</u>       | 100 m                   |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | 13937     | <u>Luftquerschnitt</u>    | 59 m <sup>2</sup>       |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | nein      |                           |                         |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja        |                           | 29.08.2016 - 31.12.2017 |



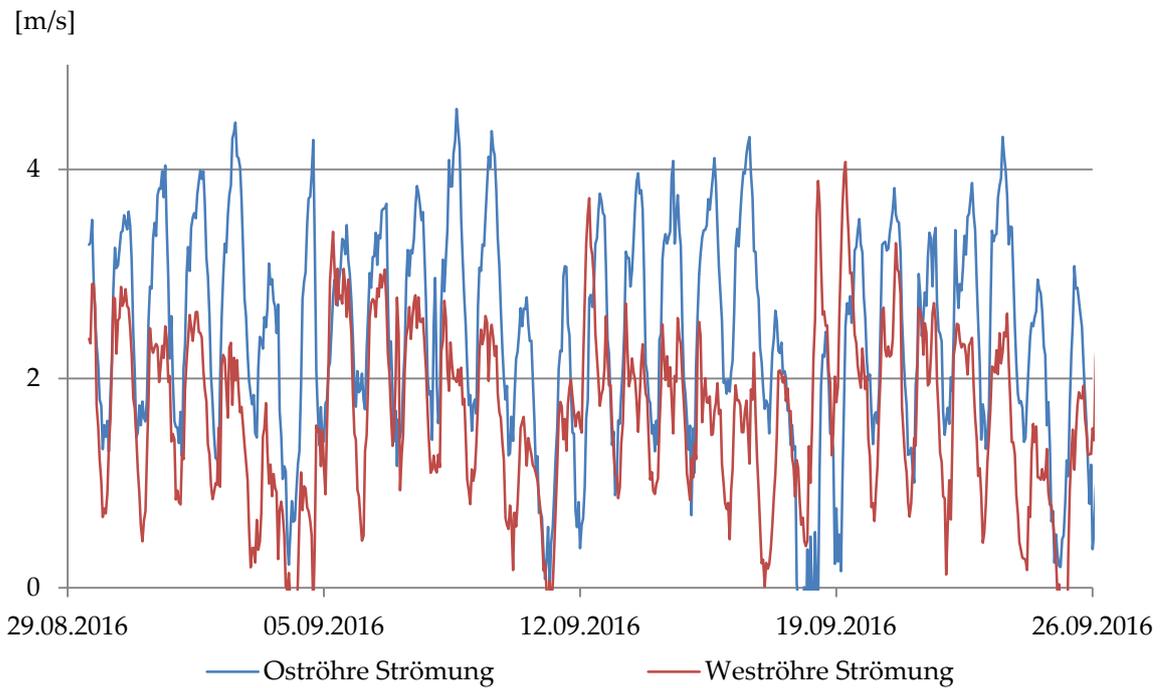


Abbildung C. 42: Tunnelluftströmung Oströhre- und Weströhre

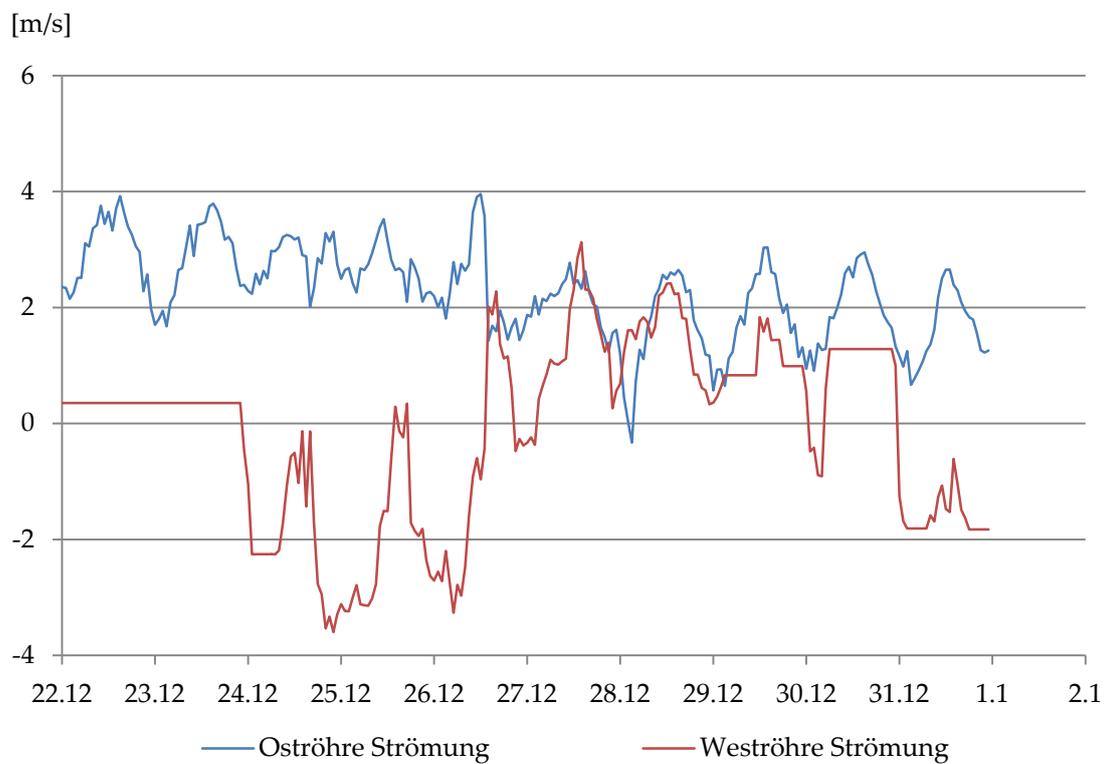


Abbildung C. 43: Tunnelluftströmung Oströhre- und Weströhre über Weihnachten

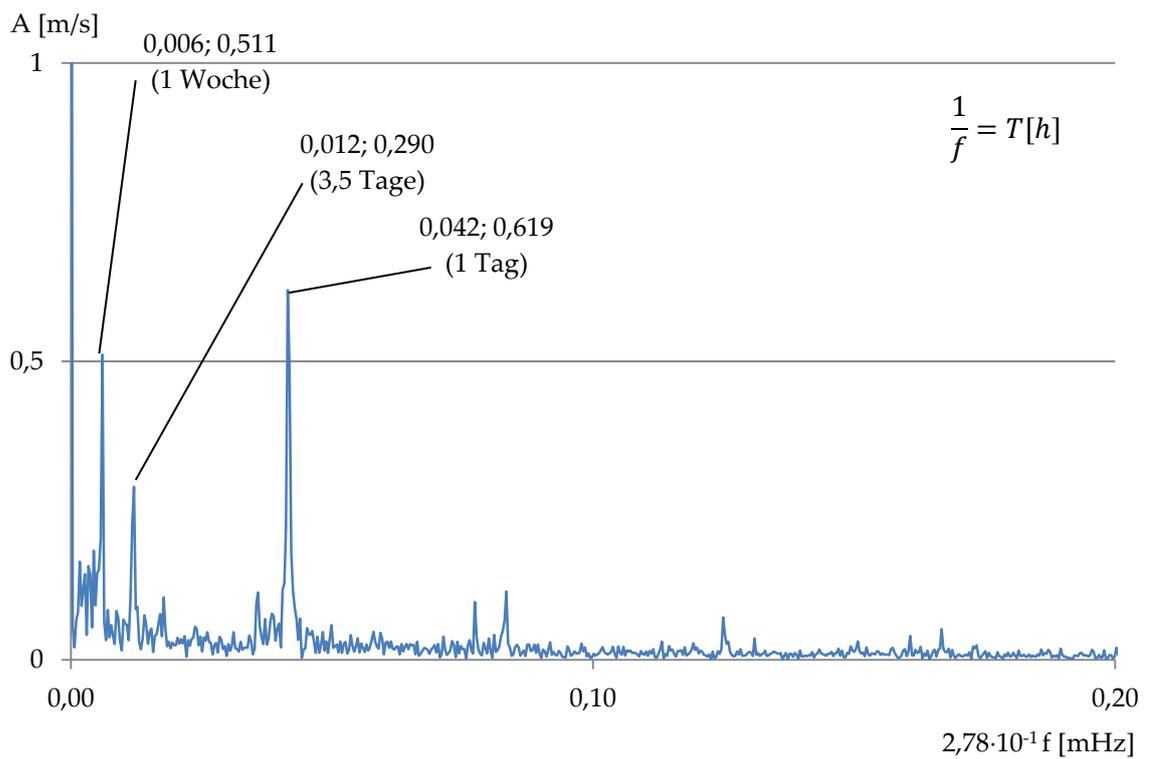


Abbildung C. 44: FFT - Strömung Oströhre

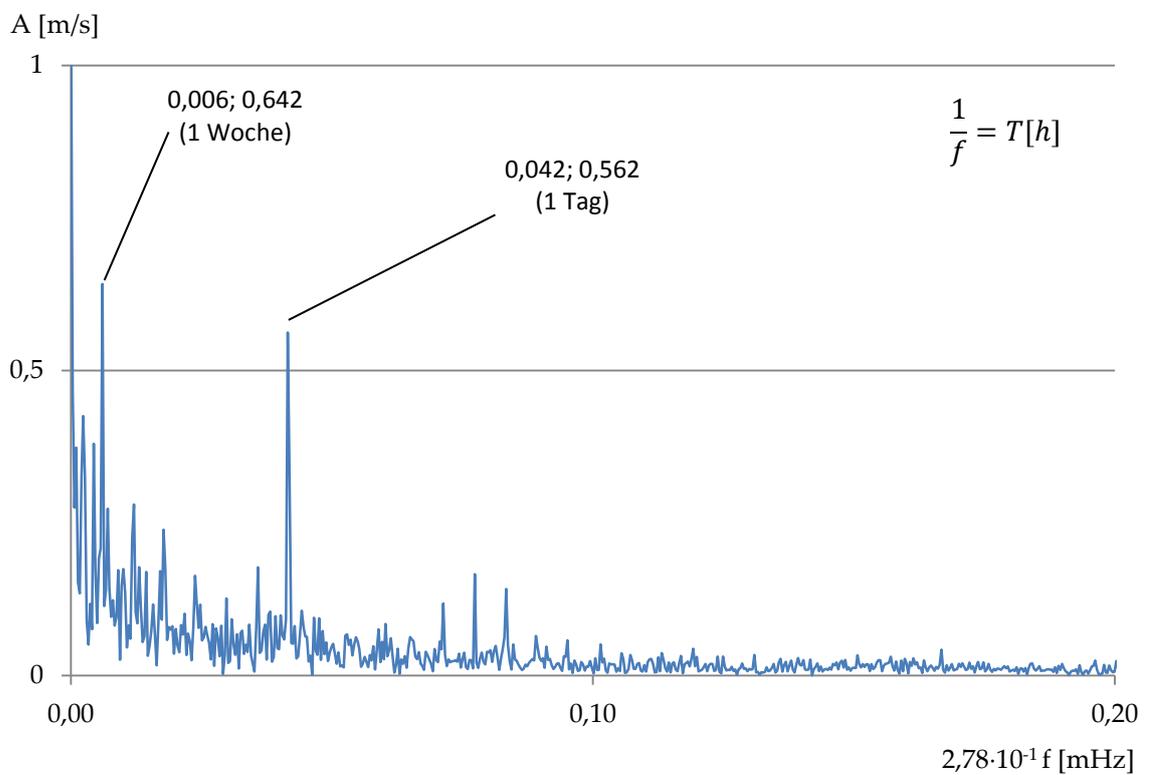


Abbildung C. 45: FFT - Strömung Südröhre

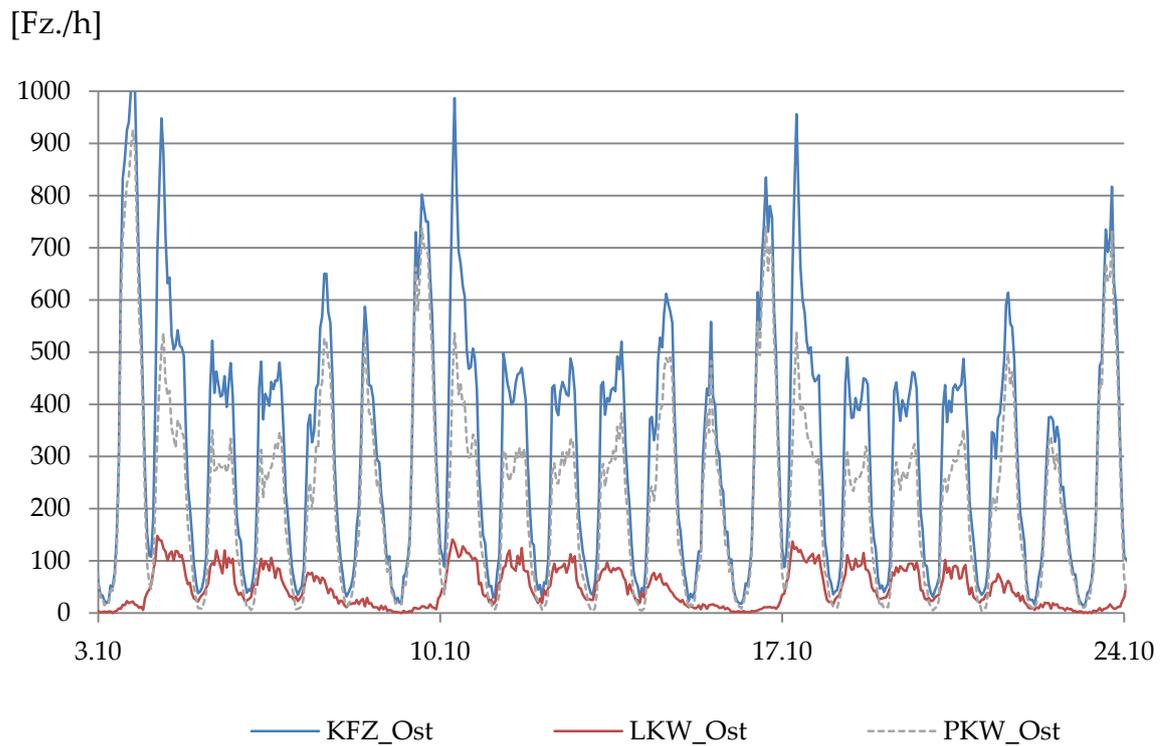


Abbildung C. 46: Verkehrsdaten Oströhre

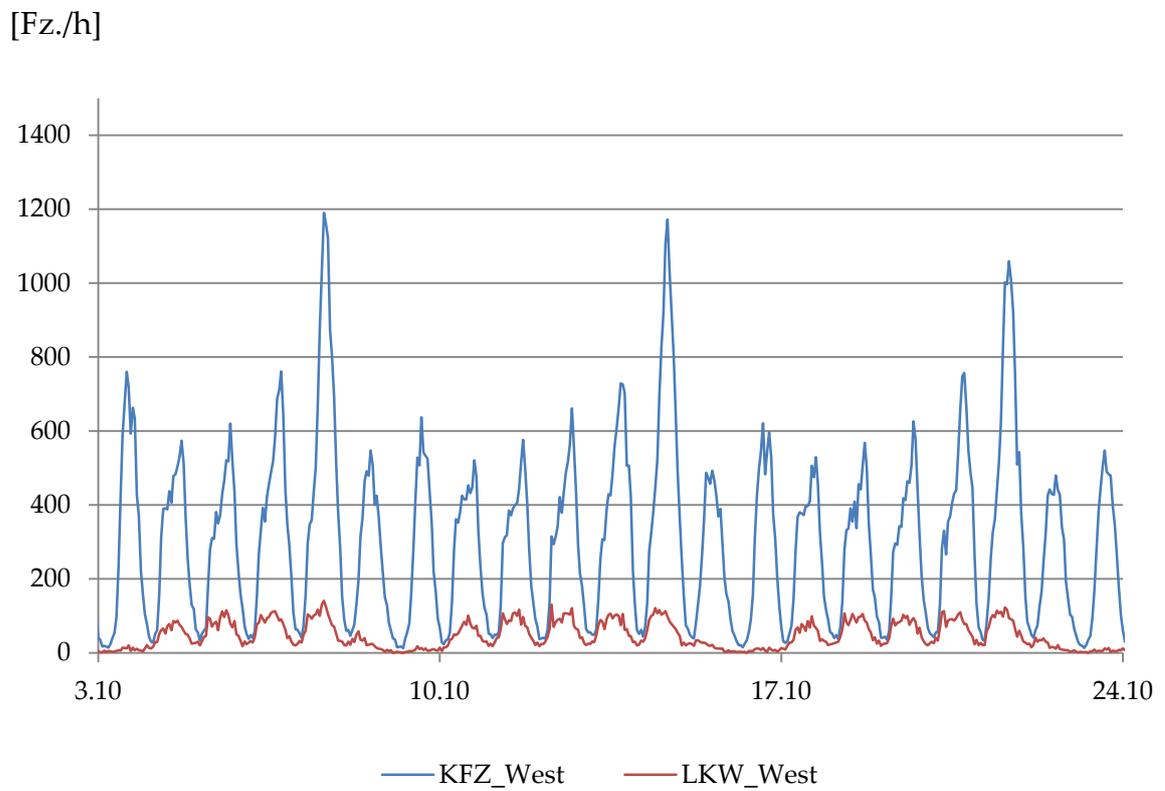


Abbildung C. 47: Verkehrsdaten Süd

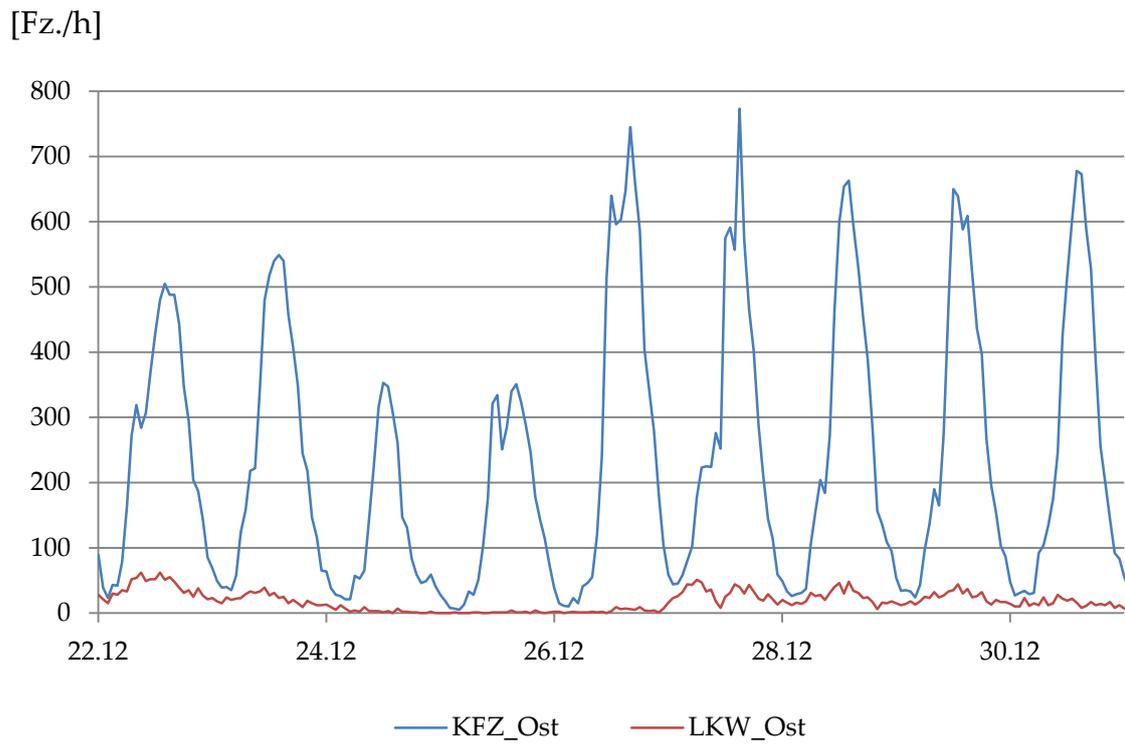


Abbildung C. 48: Verkehr über Weihnachten Oströhre

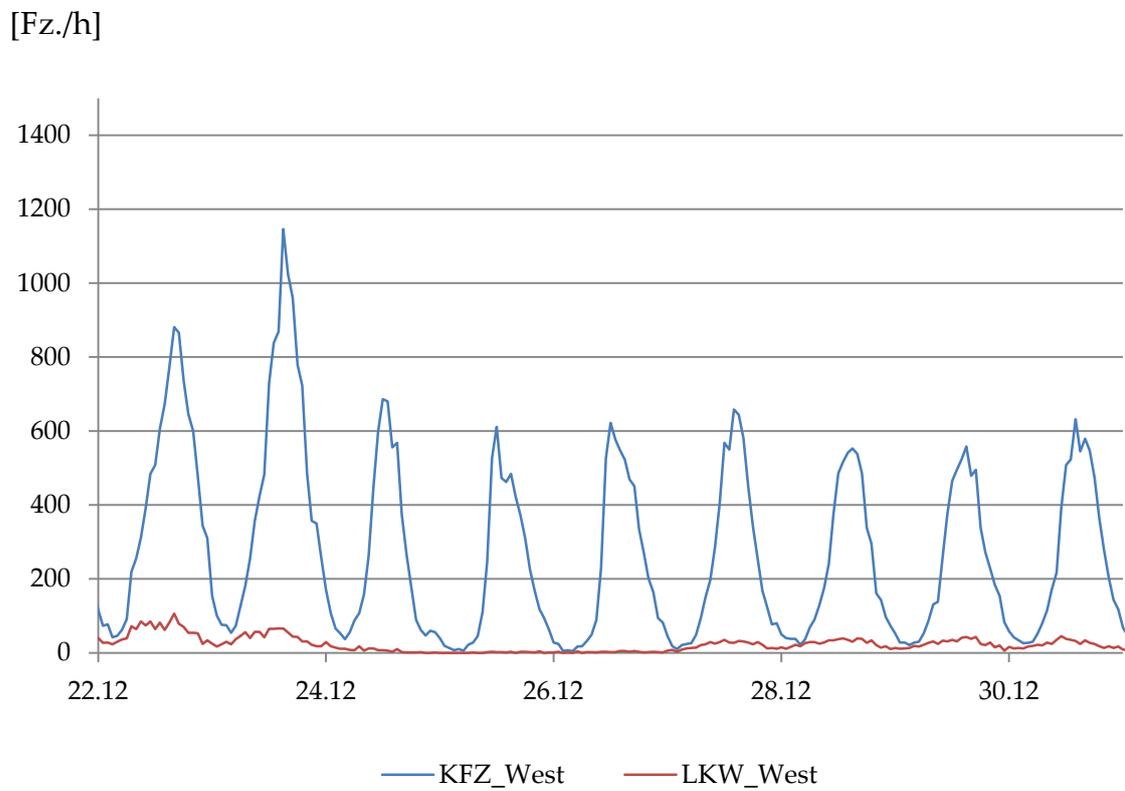


Abbildung C. 49: Verkehr über Weihnachten West

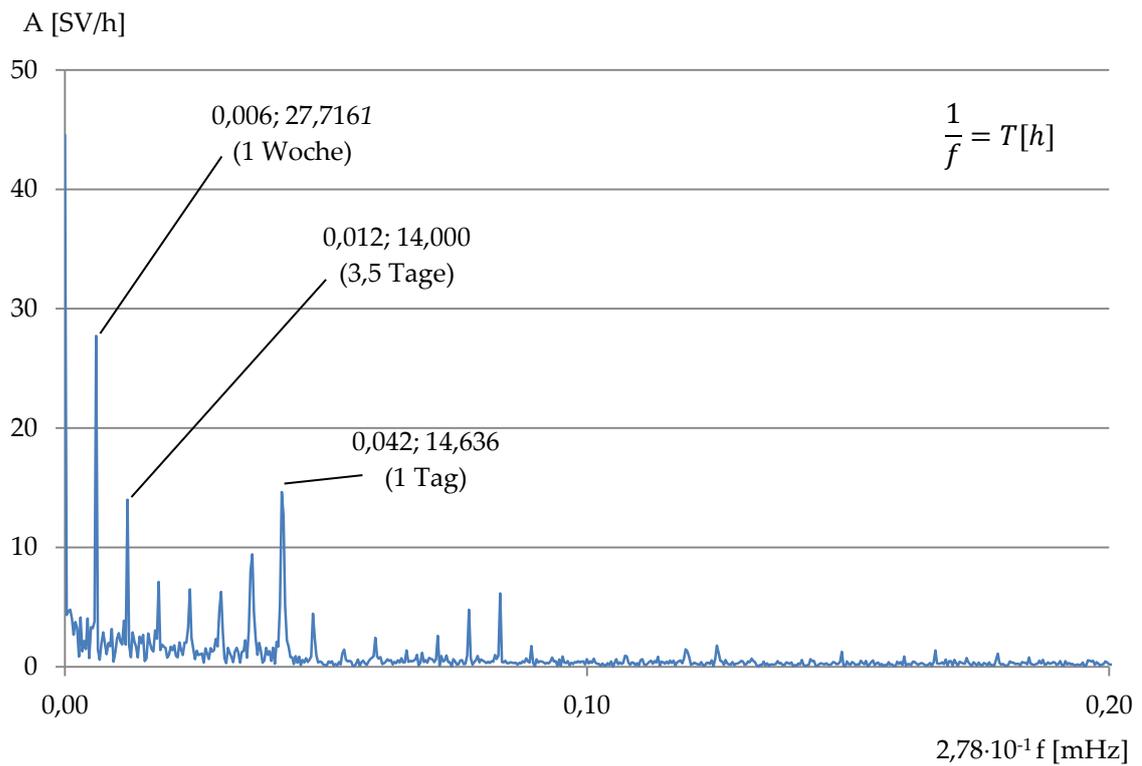


Abbildung C. 50: FFT - Schwerverkehr Oströhre

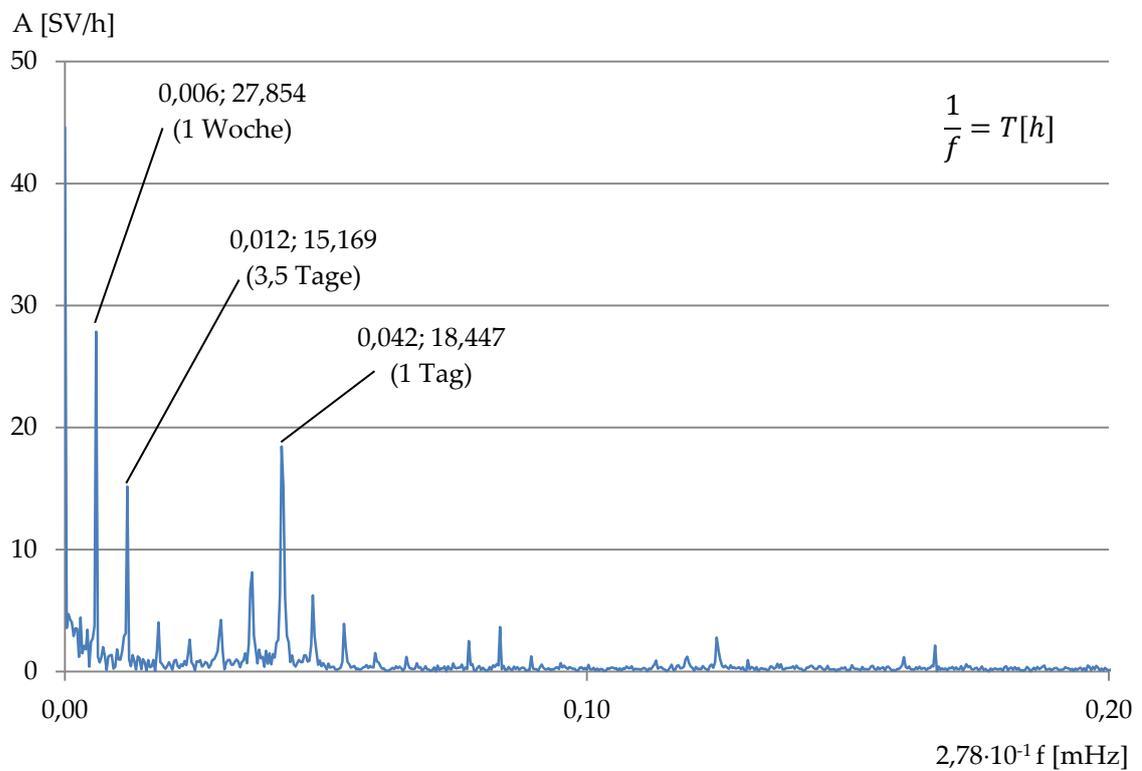


Abbildung C. 51: FFT - Schwerverkehr Weströhre

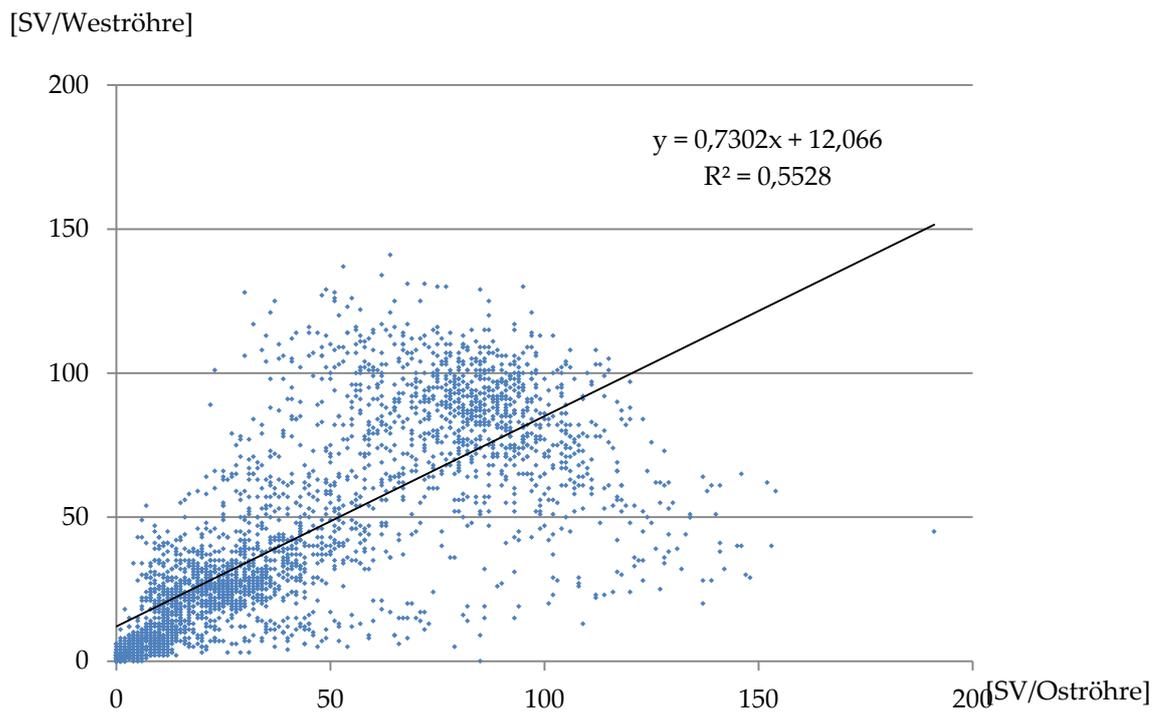


Abbildung C. 52: Korrelation Schwerverkehr Oströhre gegen Weströhre

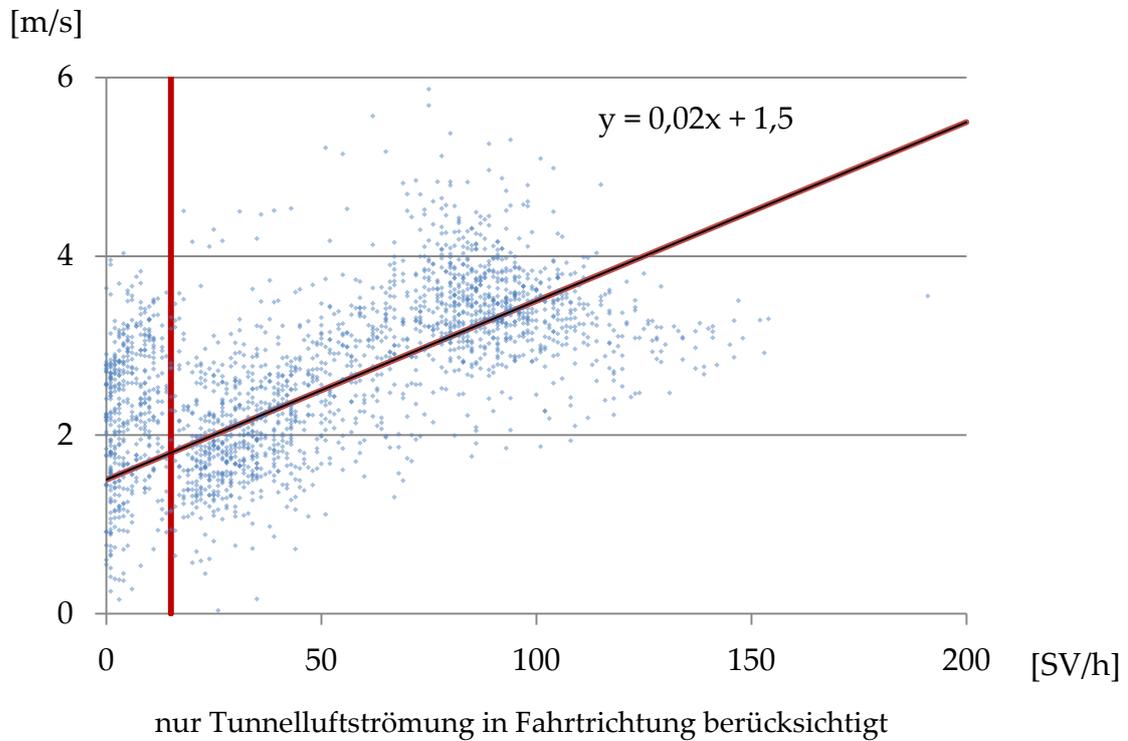


Abbildung C. 53: Korrelation Schwerverkehr gegen Oströhre

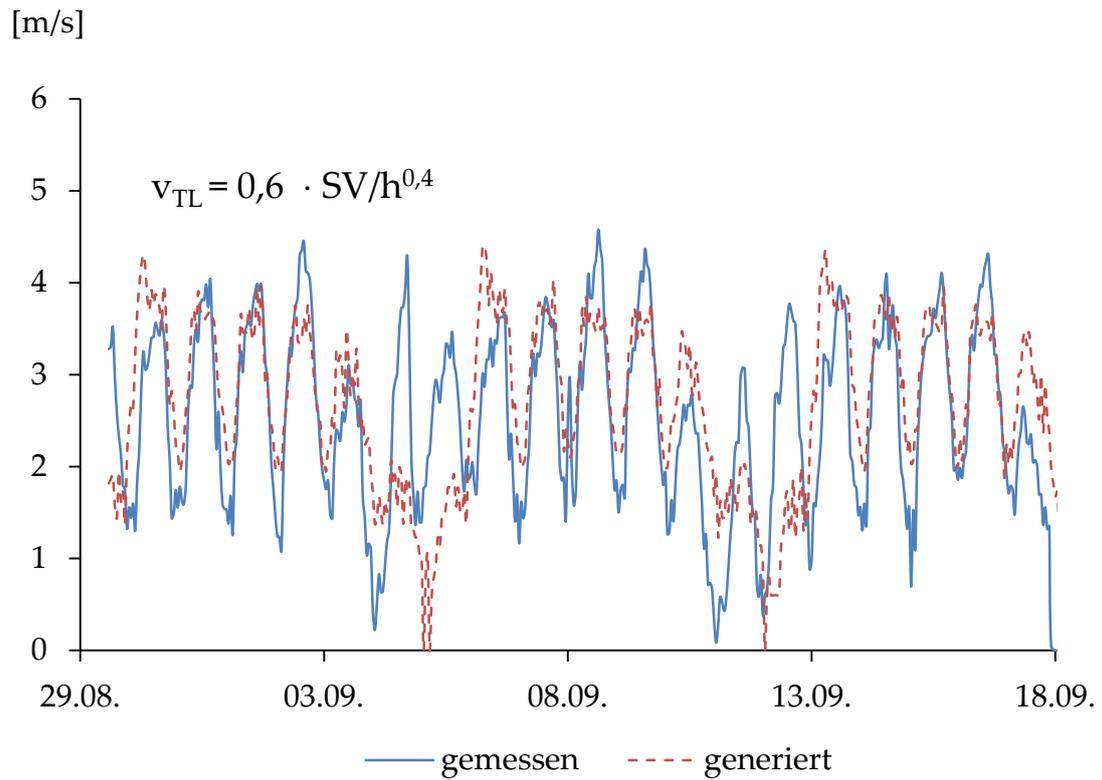


Abbildung C. 54: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Oströhre

Für die Weströhre können keine aussagekräftigen Korrelationen gefunden werden.

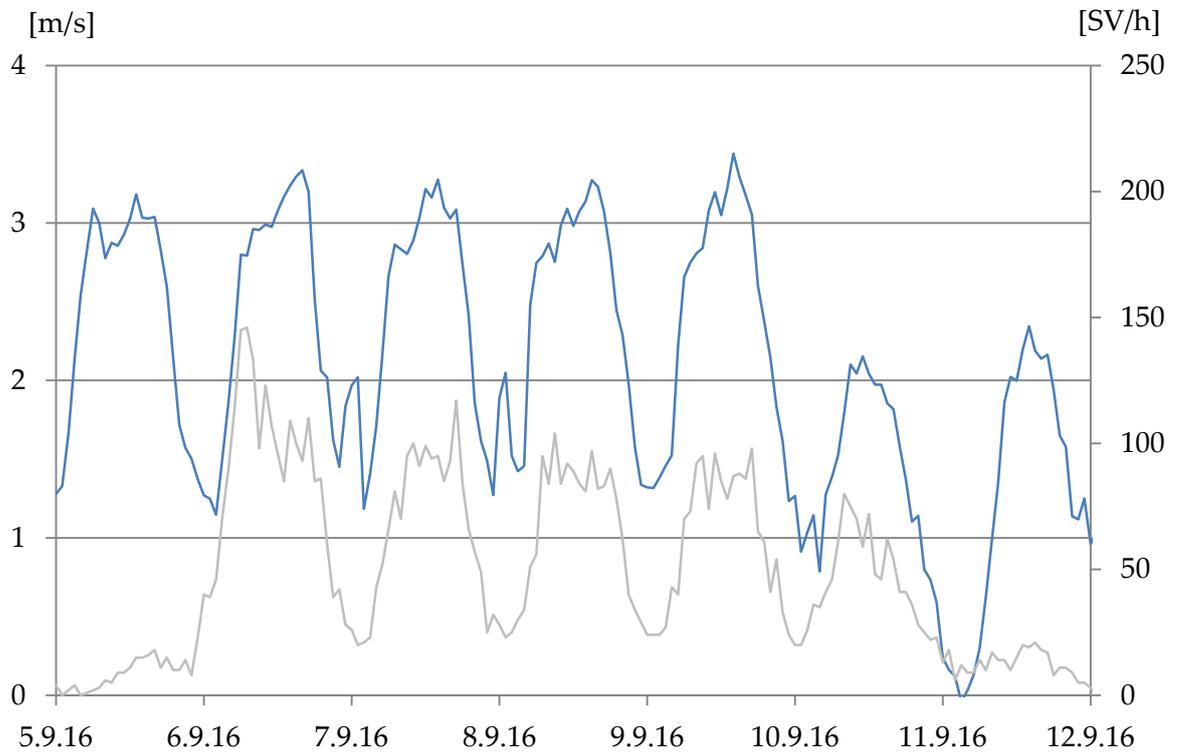


Abbildung C. 55: Anteil Schwerverkehr an Tunnelluftströmung

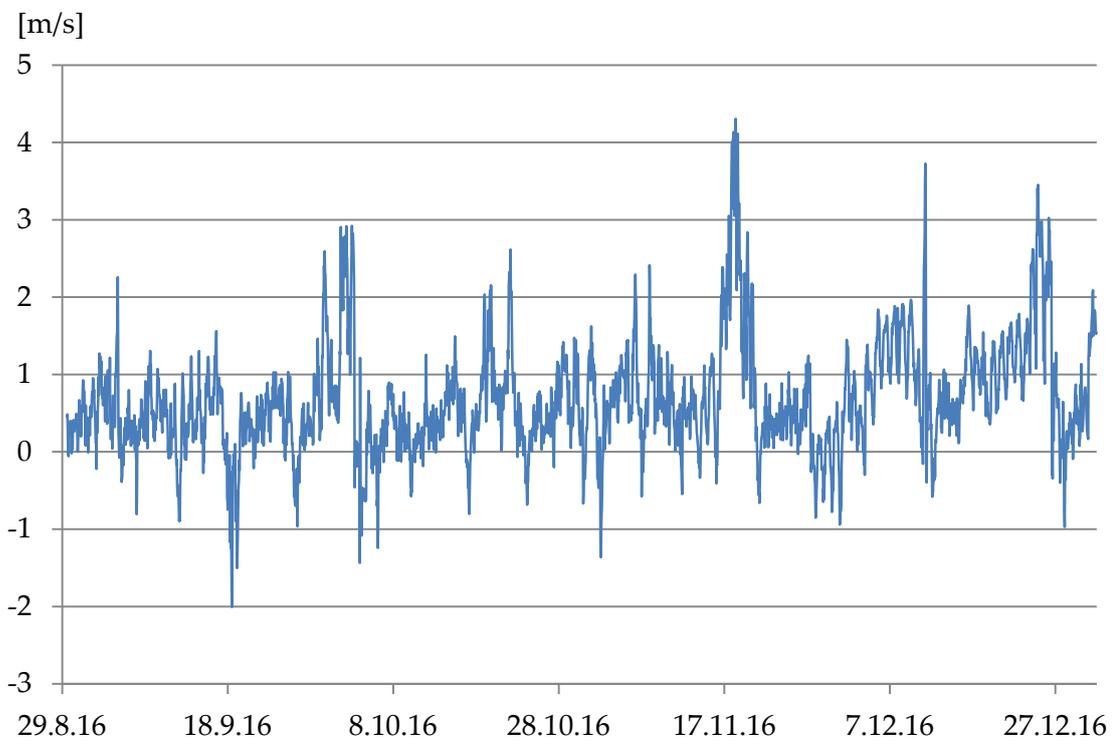
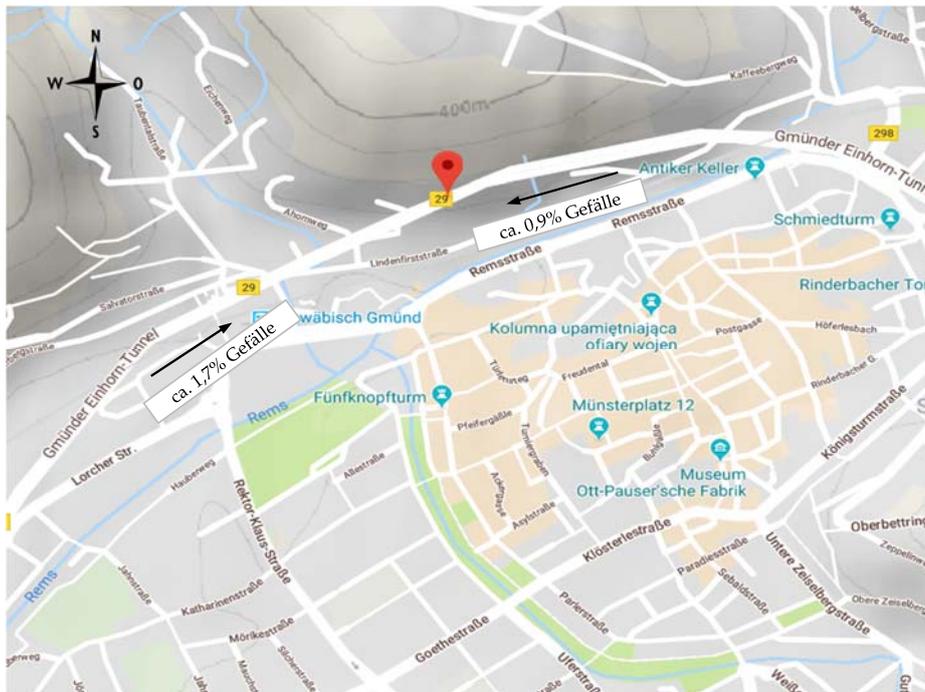


Abbildung C. 56: Grundströmung

### Tunnel Einhorn



|                                       |           |                           |                         |
|---------------------------------------|-----------|---------------------------|-------------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    |           | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 1                       |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | B29       | <u>Länge i.M.:</u>        | 2230 m                  |
| <u>Gradiente:</u>                     | ~1% Wanne | <u>Überdeckung:</u>       | 125 m                   |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | k.A.      | <u>Luftquerschnitt</u>    | 48 m <sup>2</sup>       |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | ja        |                           | 13.03.2014 - 13.03.2015 |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja        |                           | 13.03.2014 - 13.03.2015 |



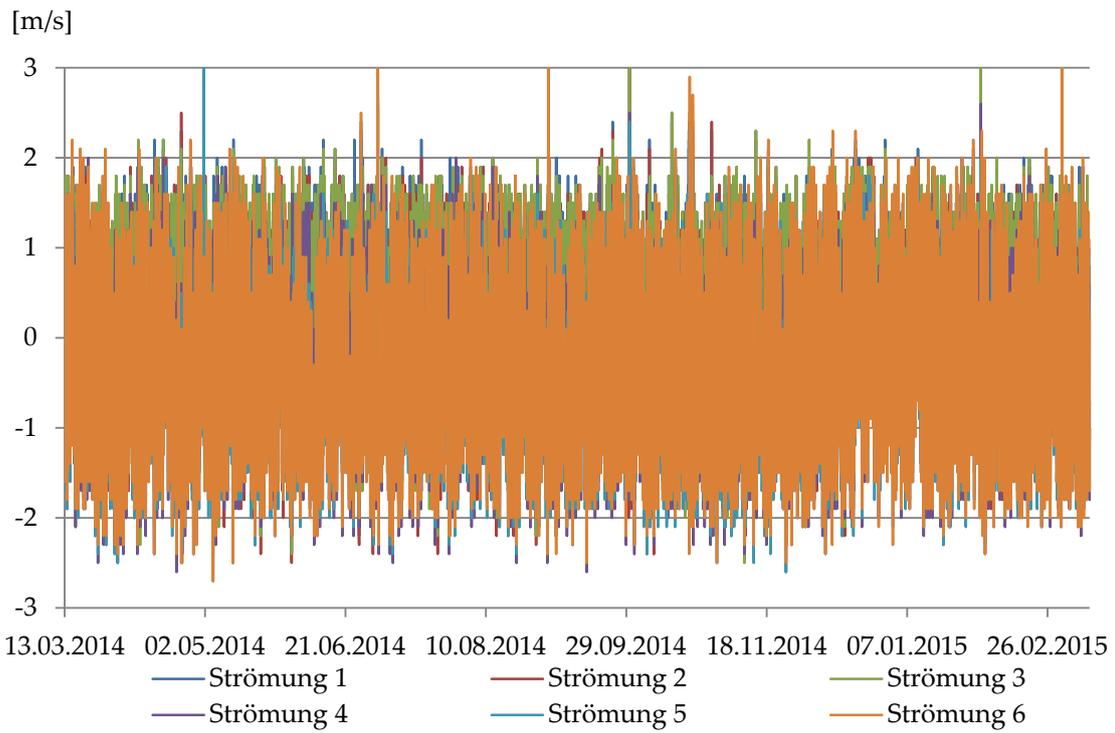


Abbildung C. 57: Tunnelluftströmung

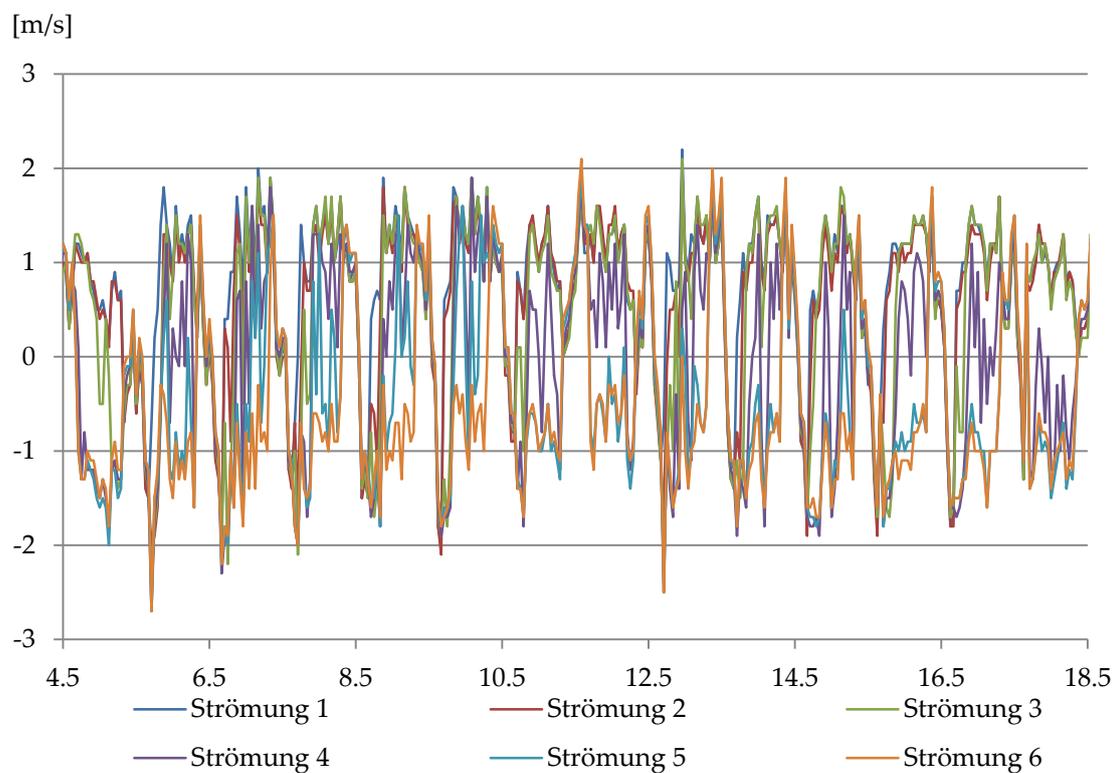


Abbildung C. 58: Tunnelluftströmung im Wochengang

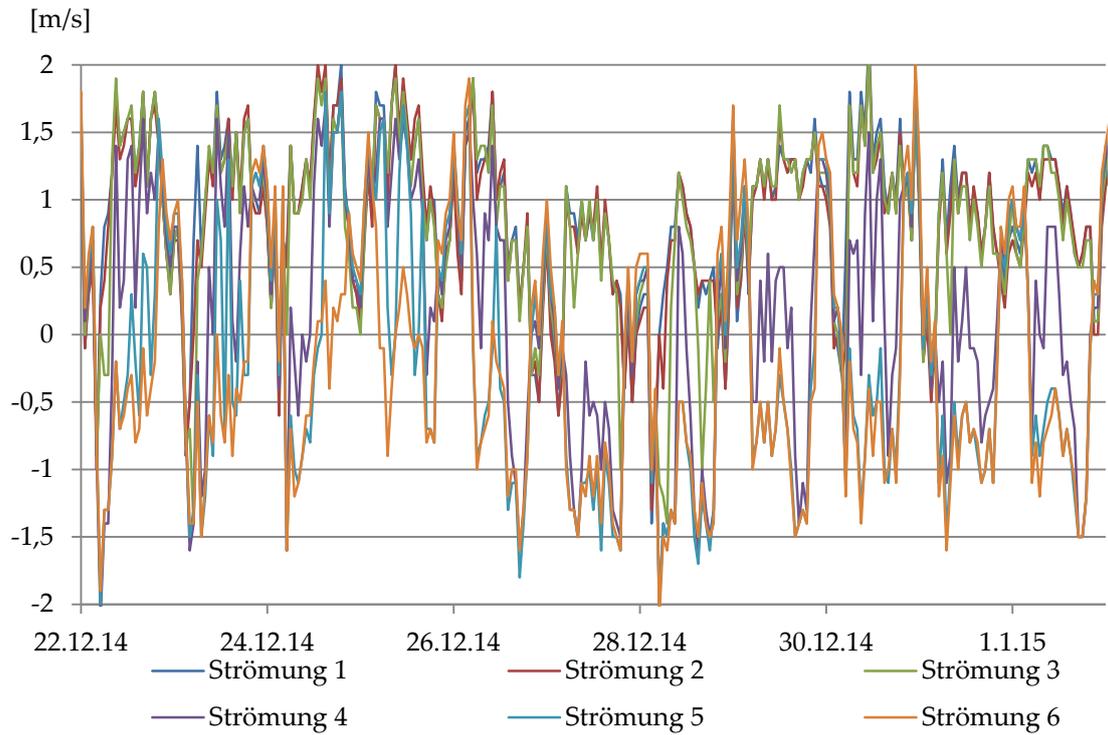


Abbildung C. 59: Tunnelluftströmung über Weihnachten

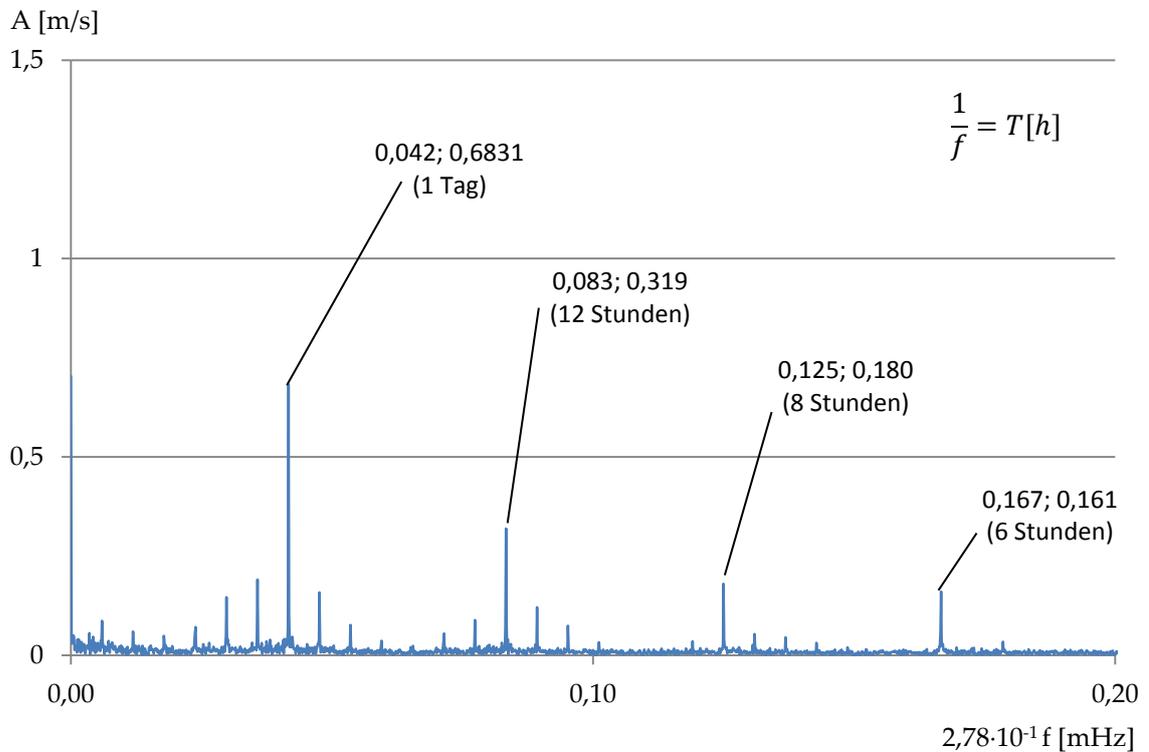


Abbildung C. 60: FFT - Tunnelluftströmung

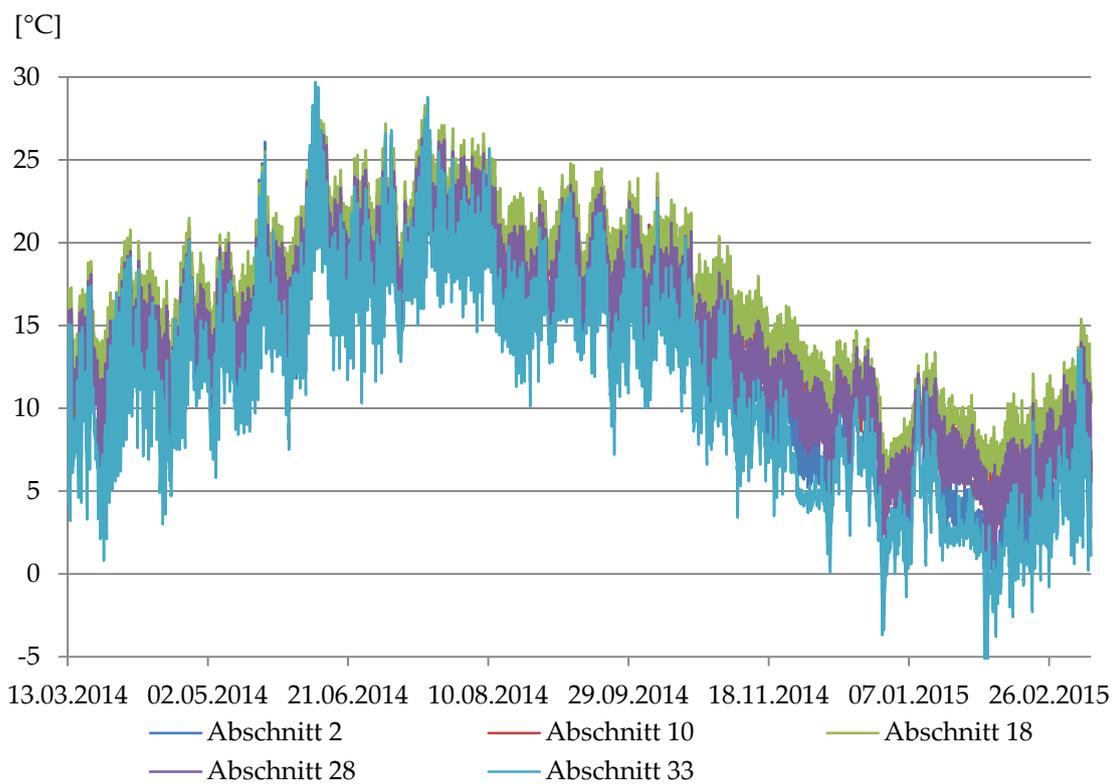


Abbildung C. 61: Temperaturverlauf im Jahresgang

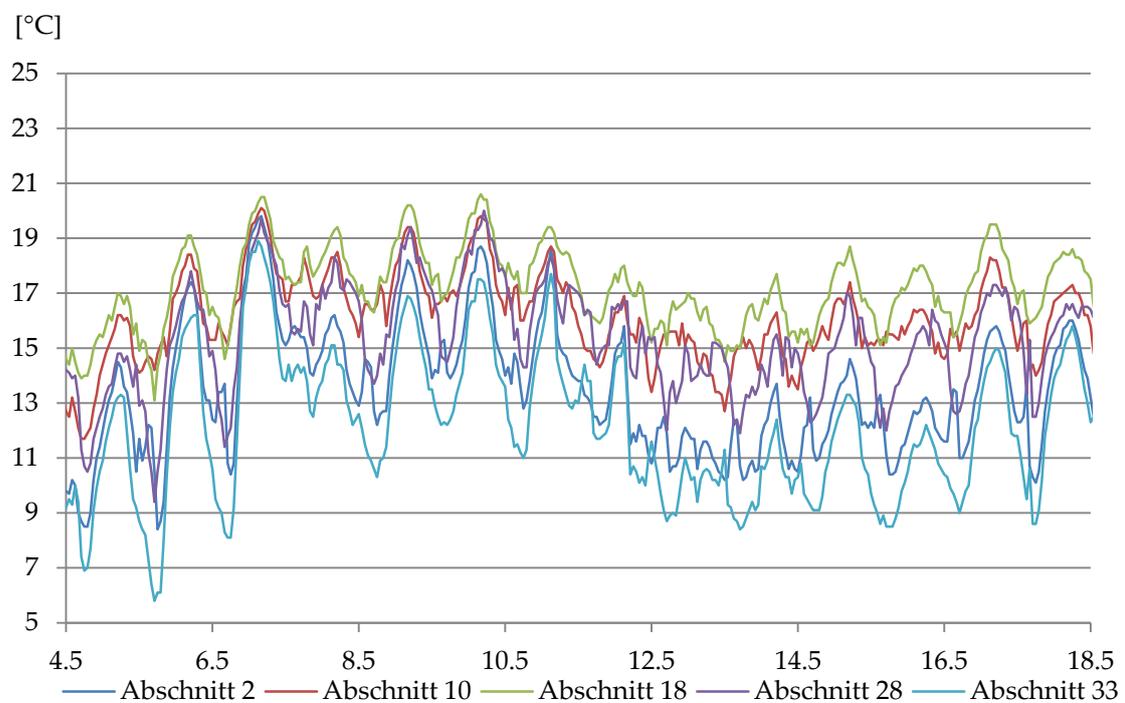


Abbildung C. 62: Temperaturverlauf im Tagesgang

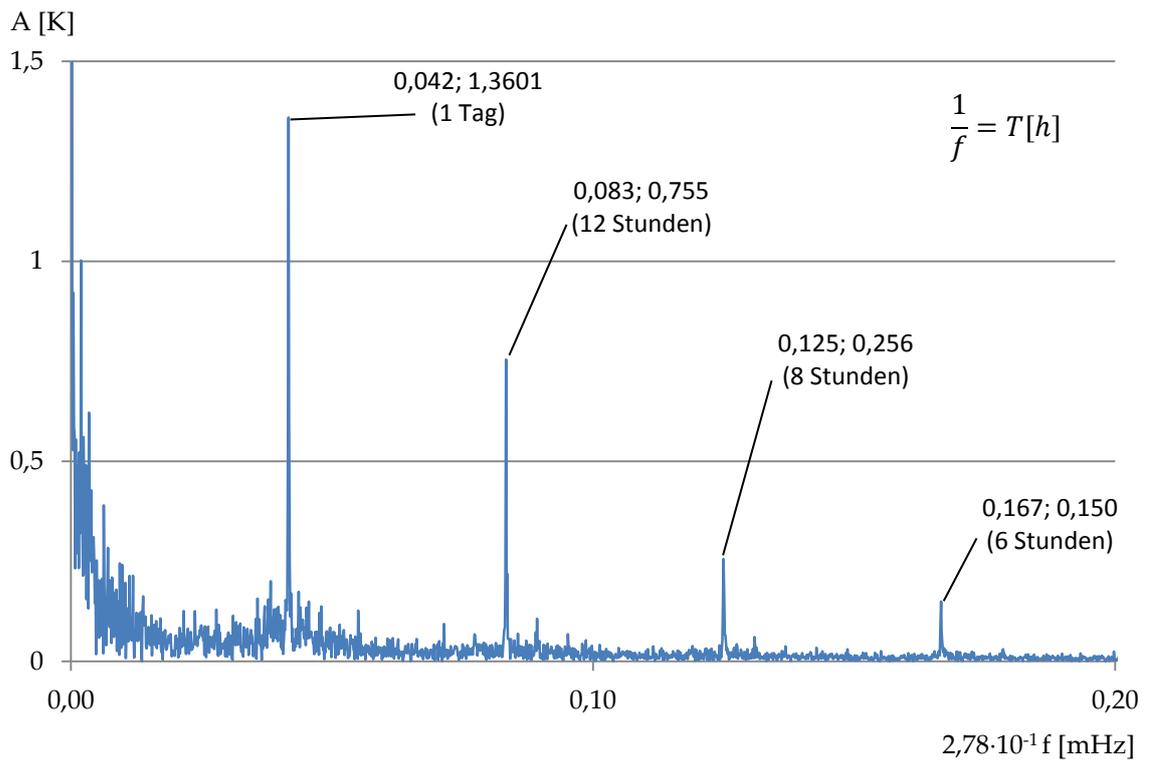


Abbildung C. 63: FFT - Tunnellufttemperatur

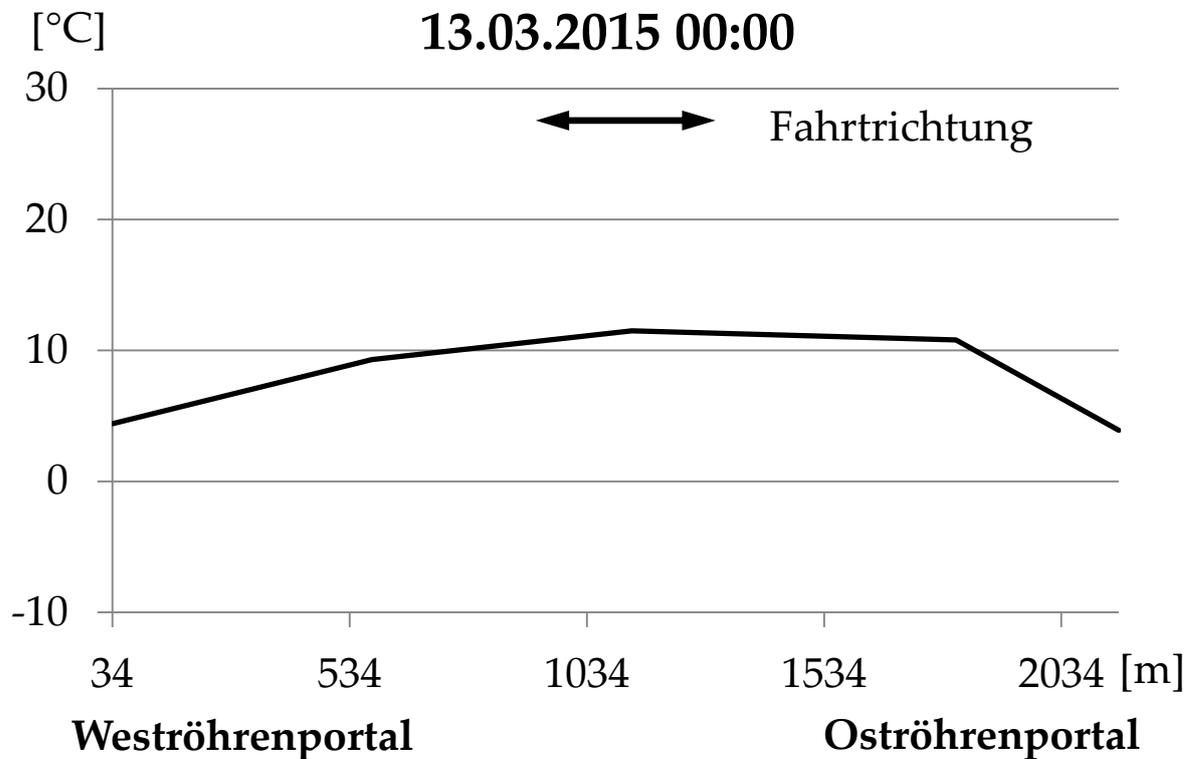


Abbildung C. 64: Temperaturverteilung entlang der Tunnelröhre, exemplarisch

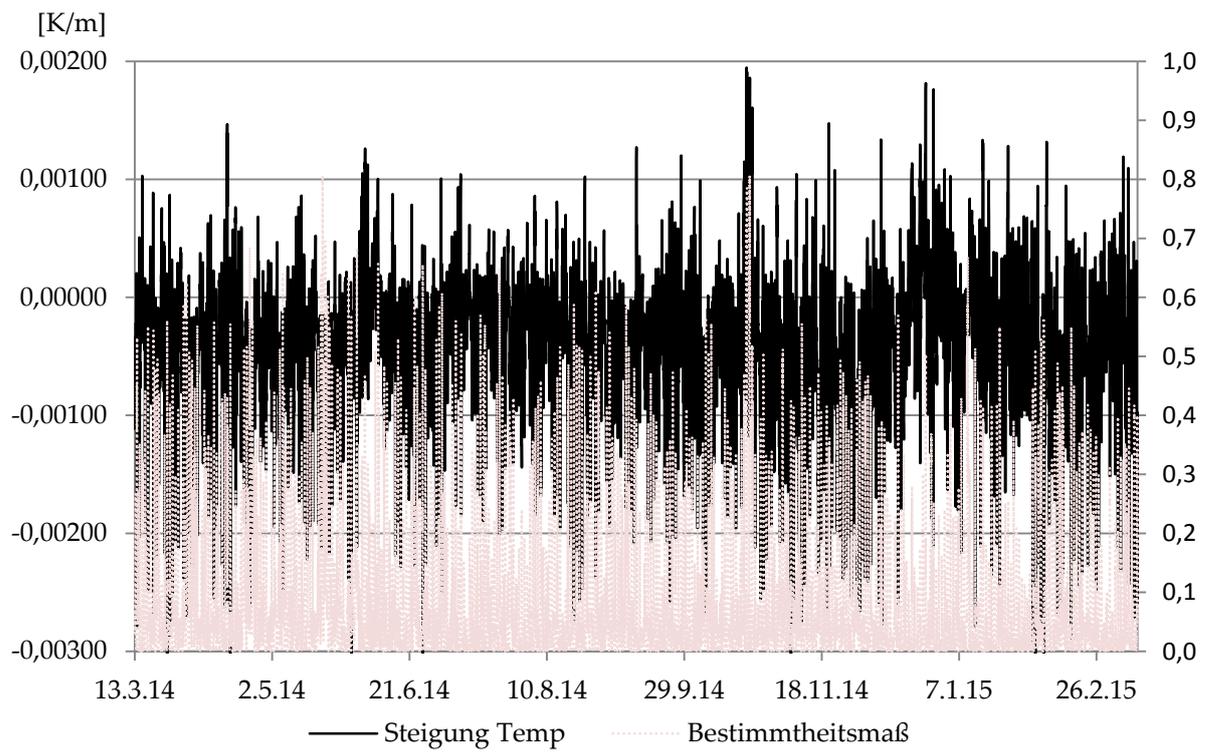
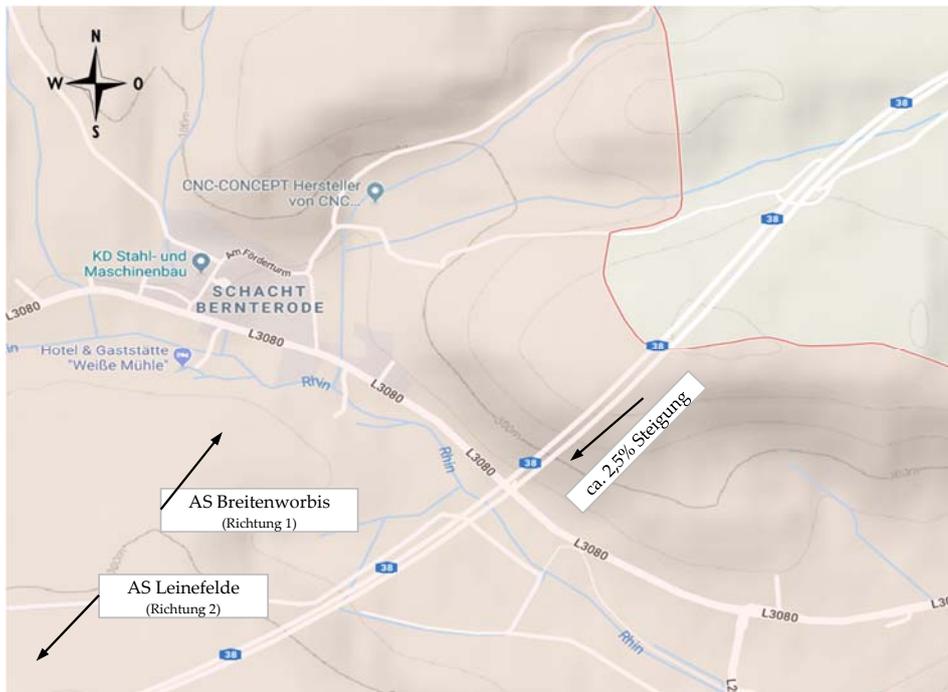


Abbildung C. 65: Steigung der Temperaturgradienten im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

### Tunnel Höllberg



|                                       |            |                           |                         |
|---------------------------------------|------------|---------------------------|-------------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Thüringen  | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 2                       |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | A38        | <u>Länge i.M.:</u>        | 862 m                   |
| <u>Gradiente:</u>                     | 2,5% Süden | <u>Überdeckung:</u>       | 30 m                    |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | 23728      | <u>Luftquerschnitt</u>    | 29 m <sup>2</sup>       |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | ja         |                           | 24.08.2016 - 31.01.2017 |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja         |                           | 24.08.2016 - 31.01.2017 |



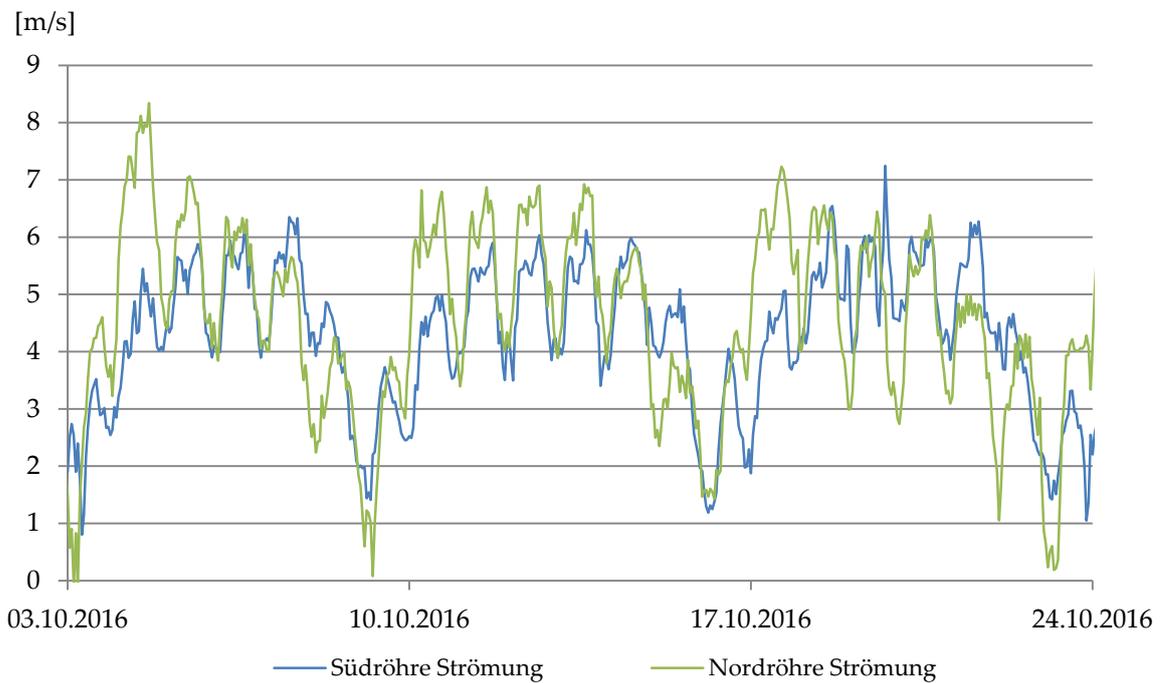


Abbildung C. 66: Tunnelluftströmung Süd- und Nordröhre

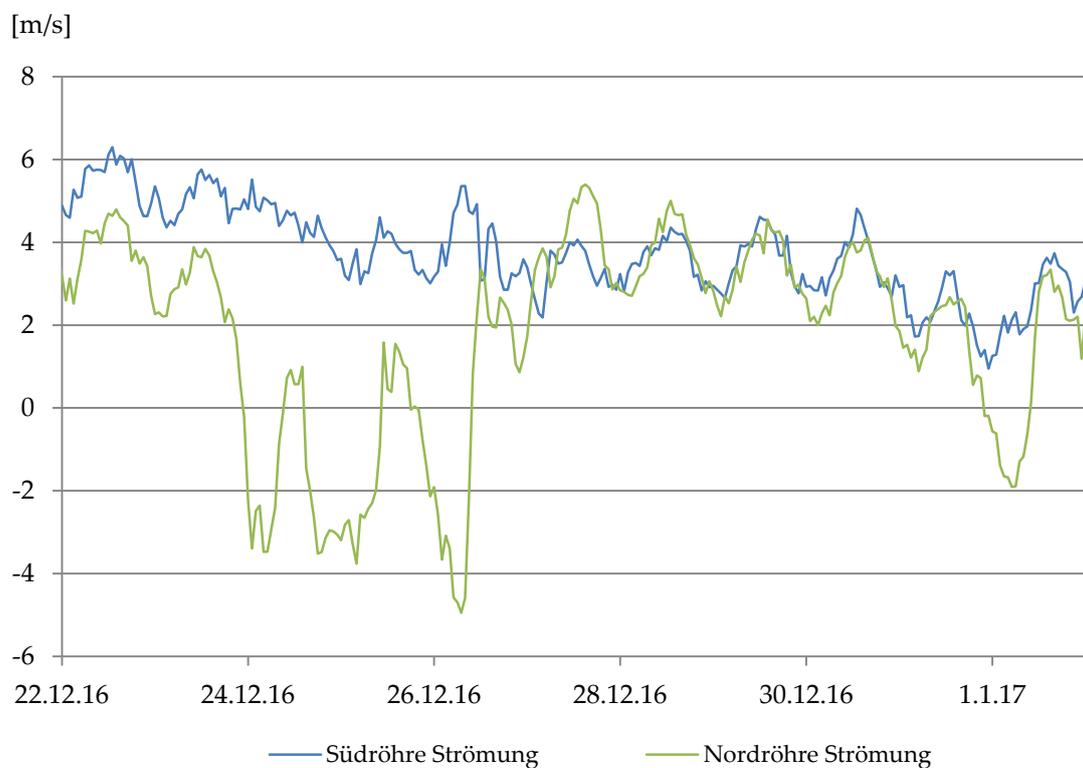


Abbildung C. 67: Tunnelluftströmung Süd- und Nordröhre über Weihnachten

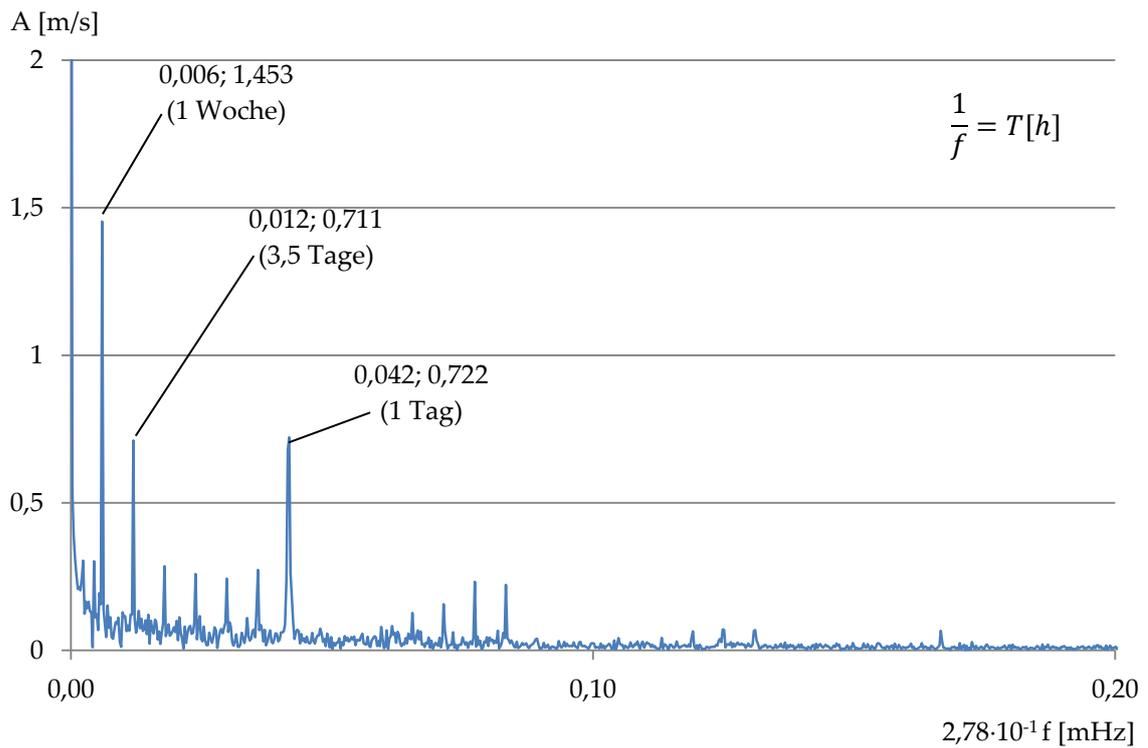


Abbildung C. 68: FFT - Strömung Nordröhre

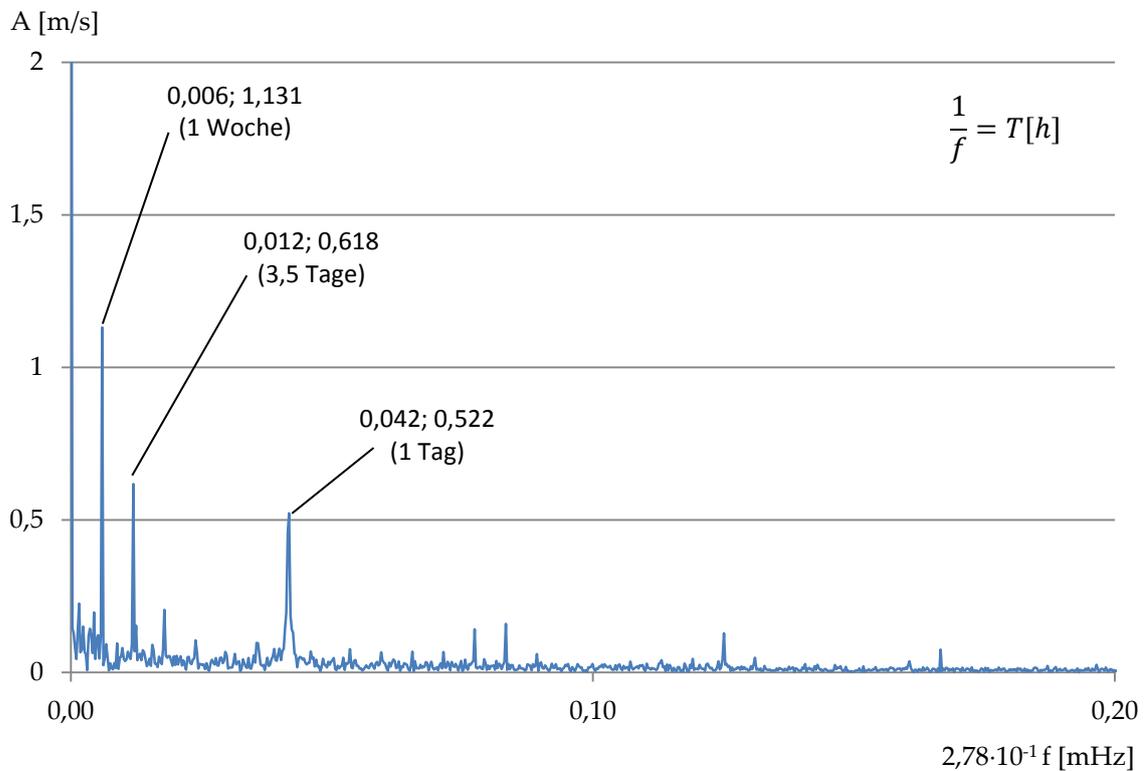


Abbildung C. 69: FFT - Strömung Südröhre

[Fz./h]

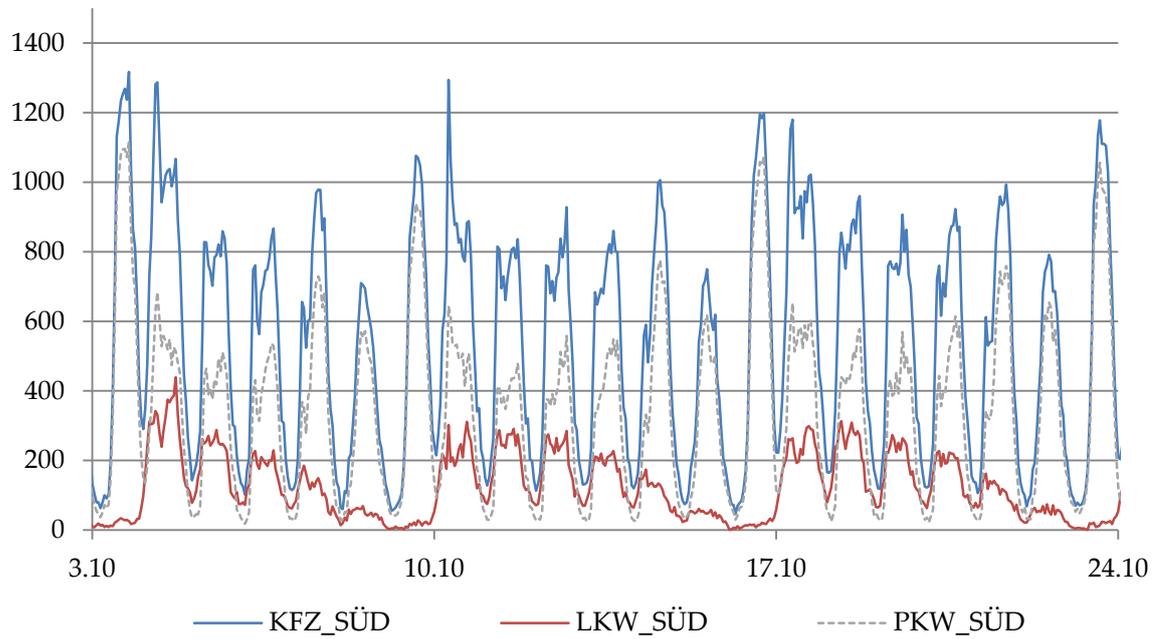


Abbildung C. 70: Verkehrsdaten Süd

[Fz./h]

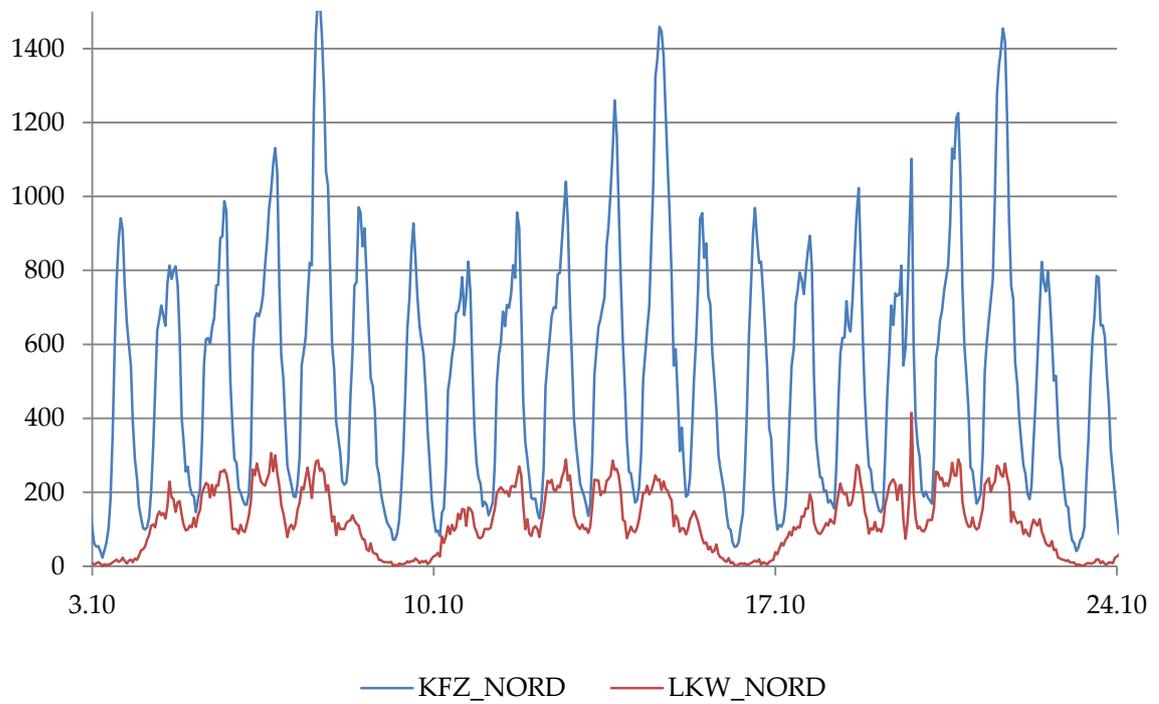


Abbildung C. 71: Verkehrsdaten Nord

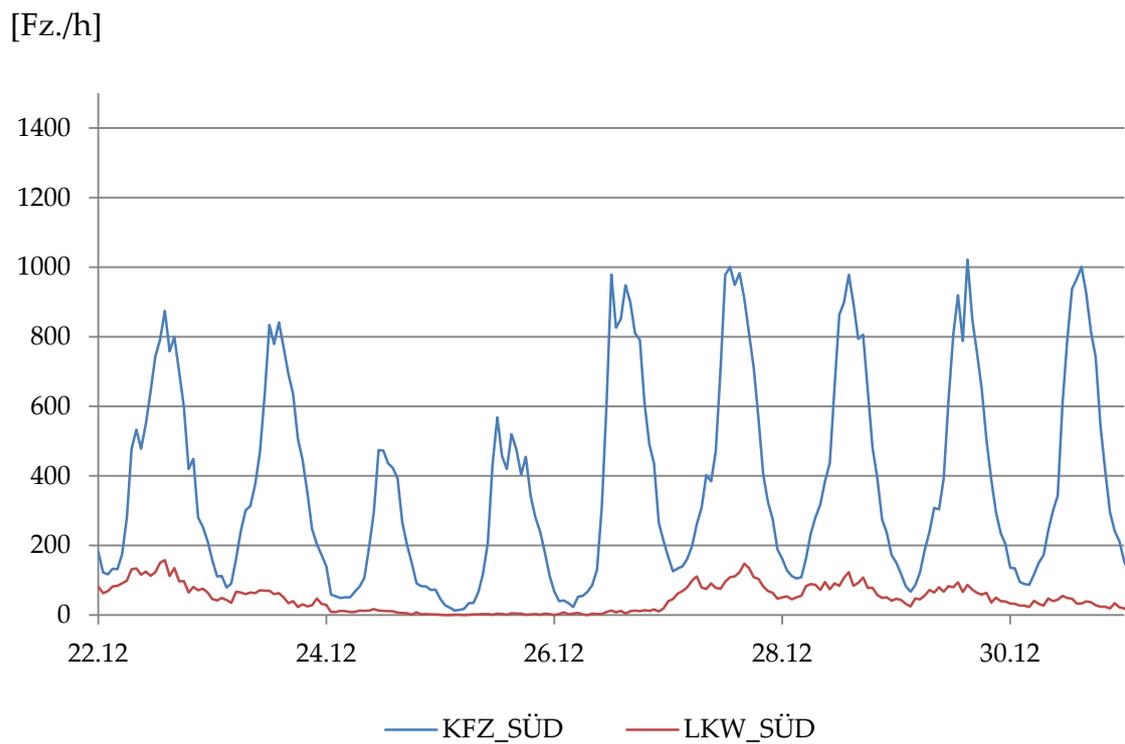


Abbildung C. 72: Verkehr über Weihnachten Süd

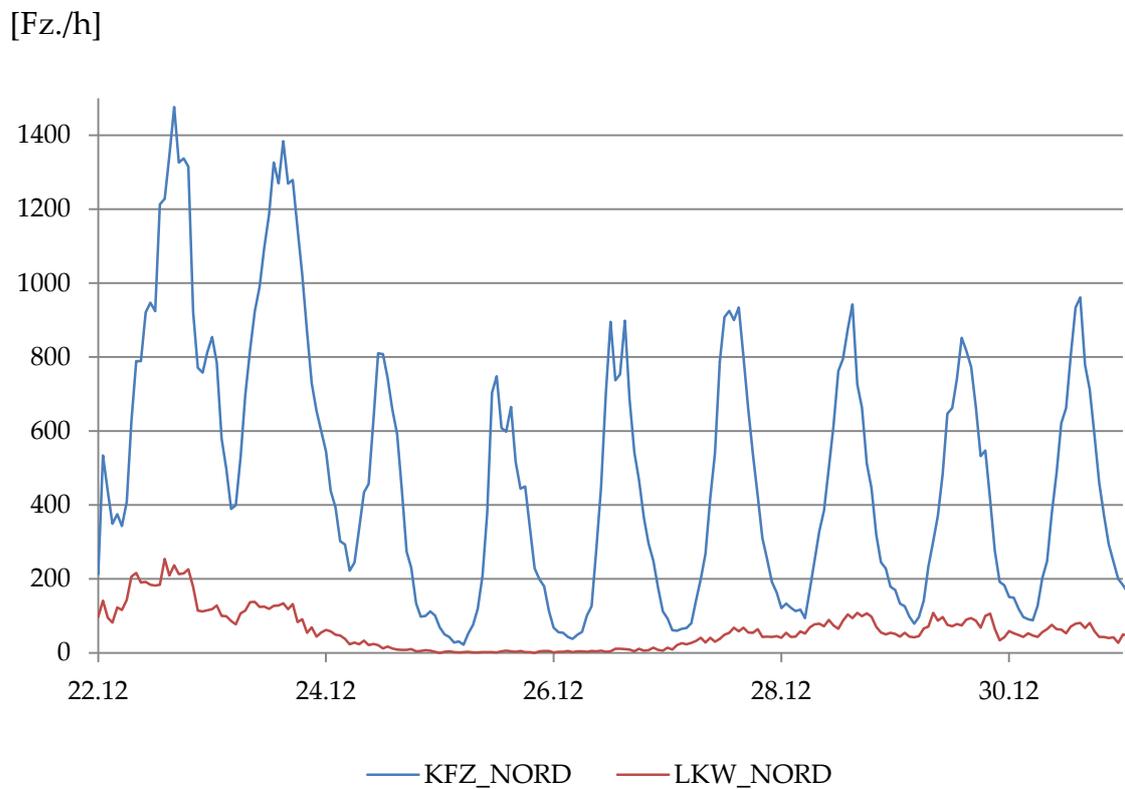


Abbildung C. 73: Verkehr über Weihnachten Nord

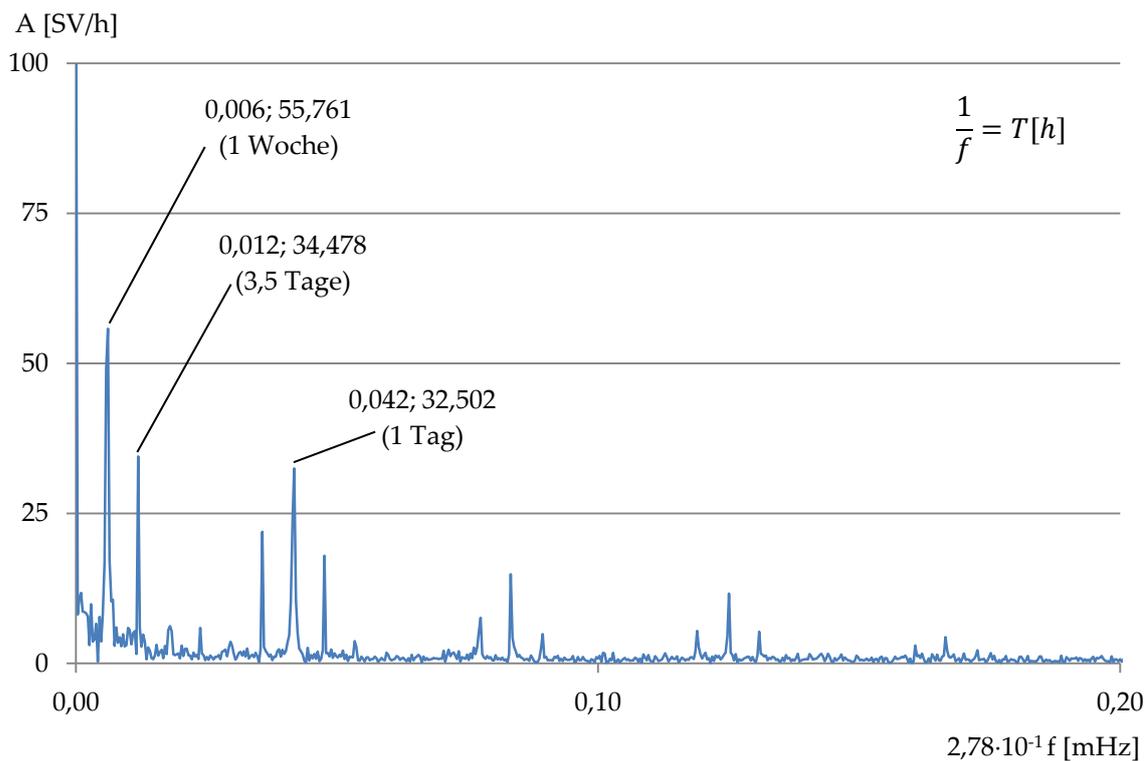


Abbildung C. 74: FFT - Schwerverkehr Nordröhre

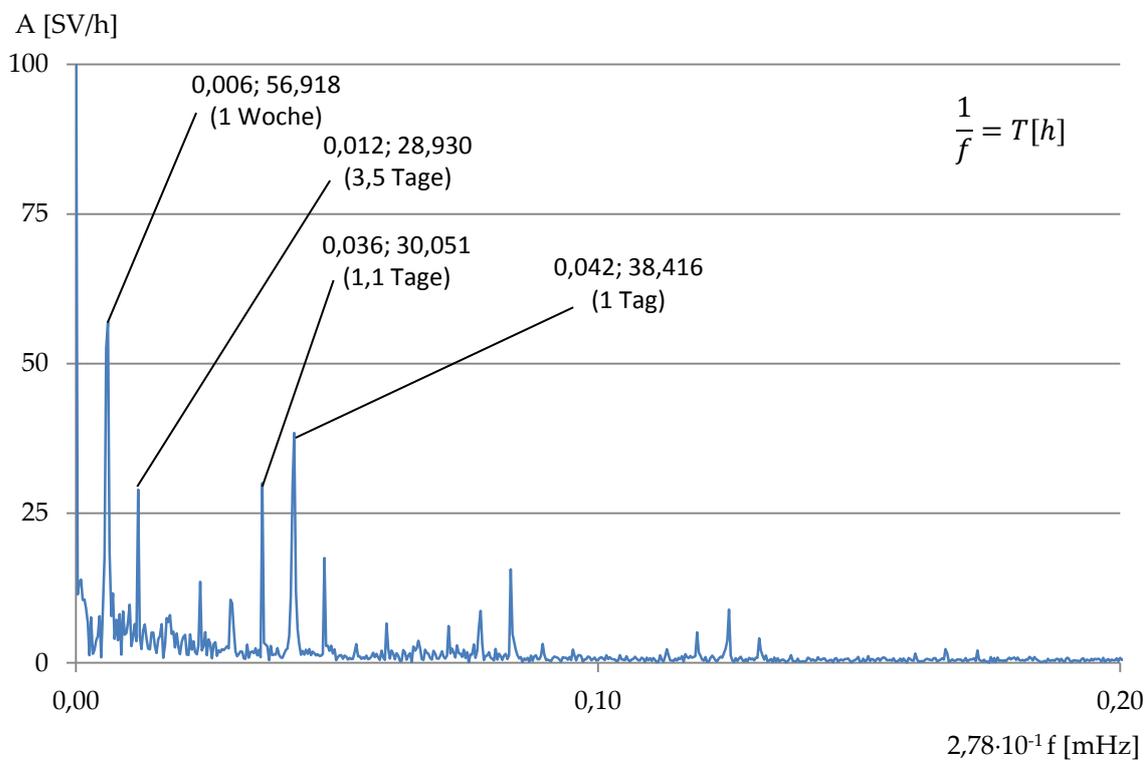


Abbildung C. 75: FFT - Schwerverkehr Südröhre

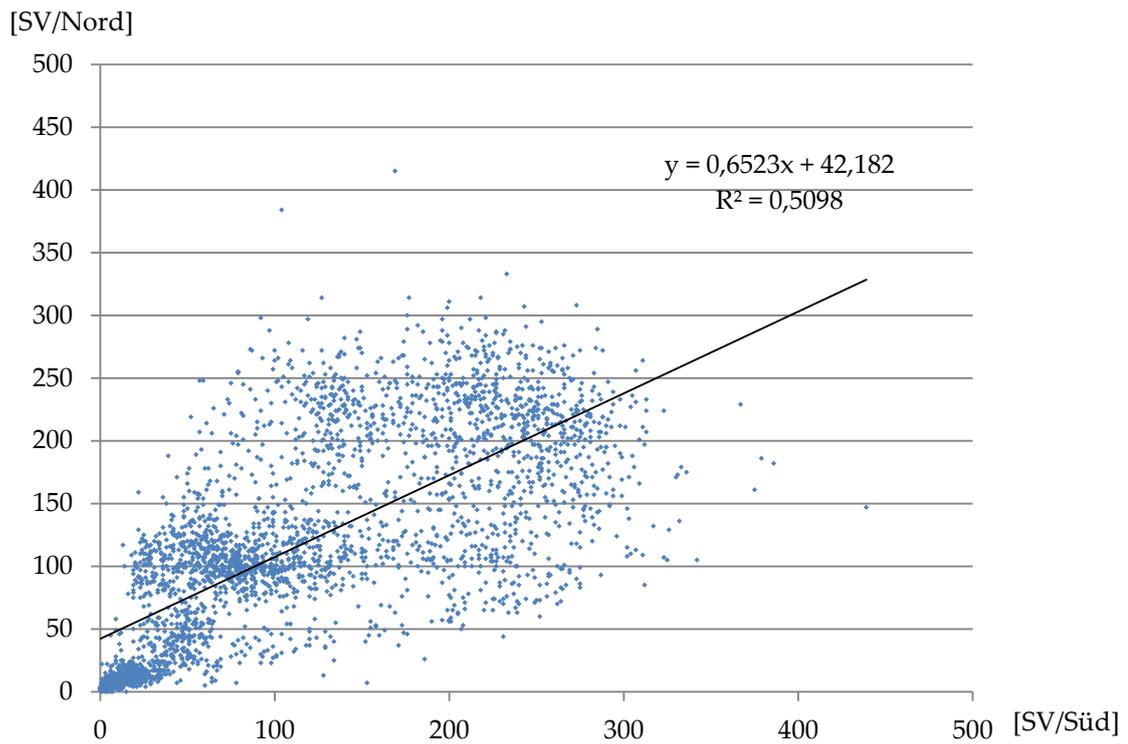


Abbildung C. 76: Korrelation Schwerverkehr Südröhre gegen Nordröhre

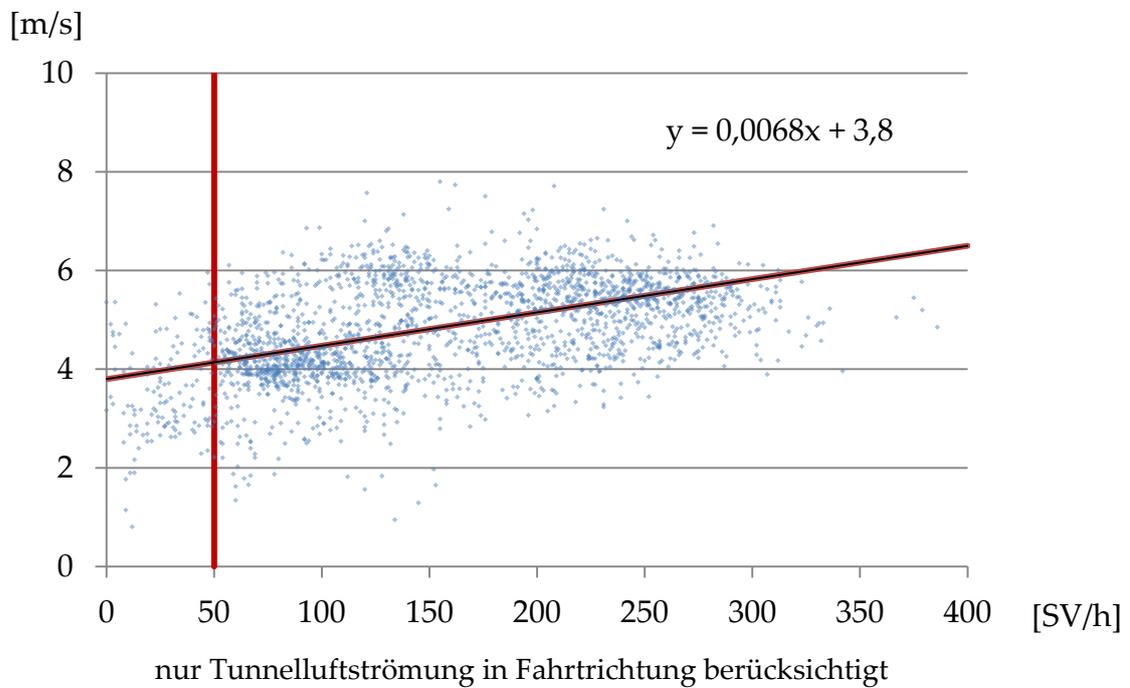


Abbildung C. 77: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Süd, ohne Berücksichtigung der Wochenenden

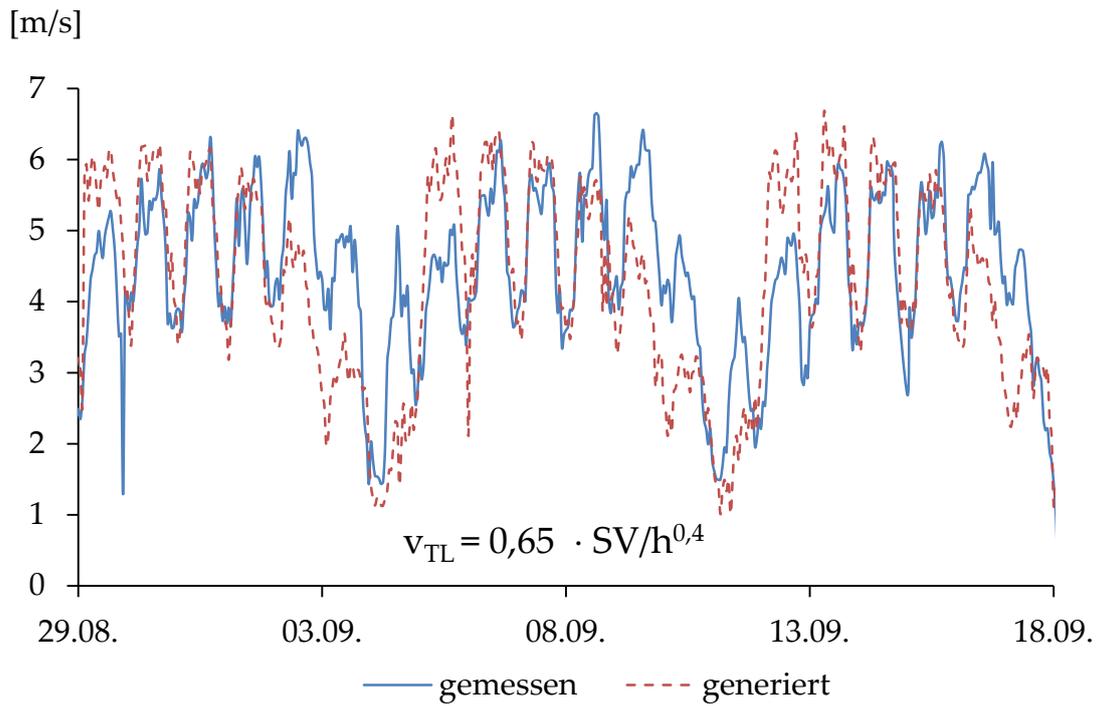


Abbildung C. 78: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Südröhre

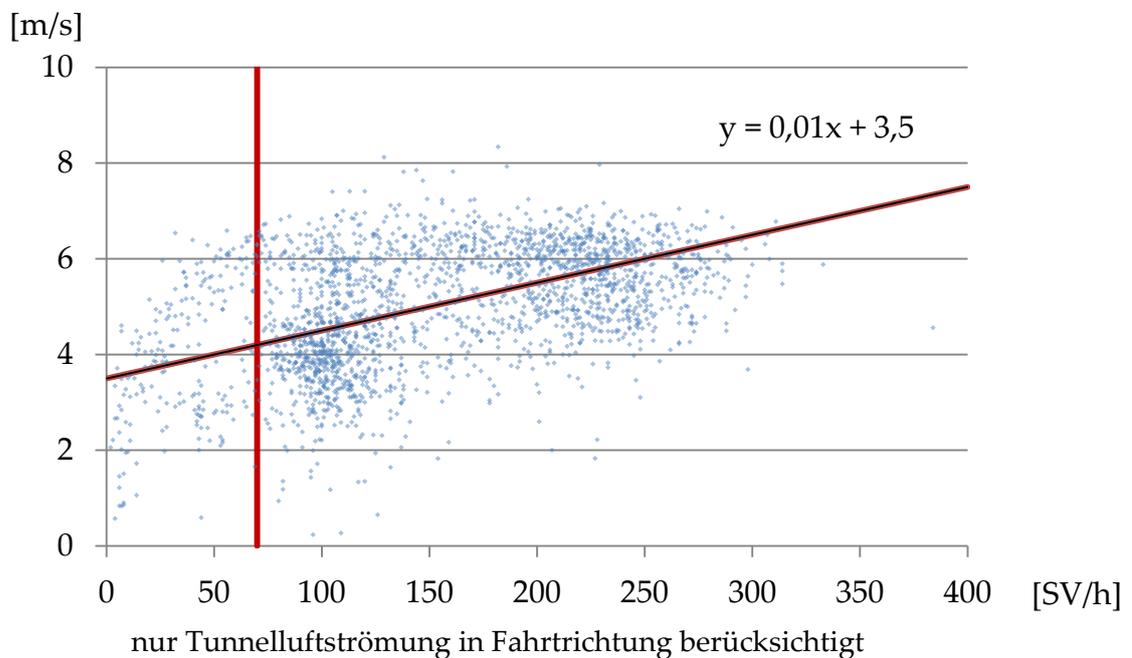


Abbildung C. 79: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Nord, ohne Berücksichtigung der Wochenenden

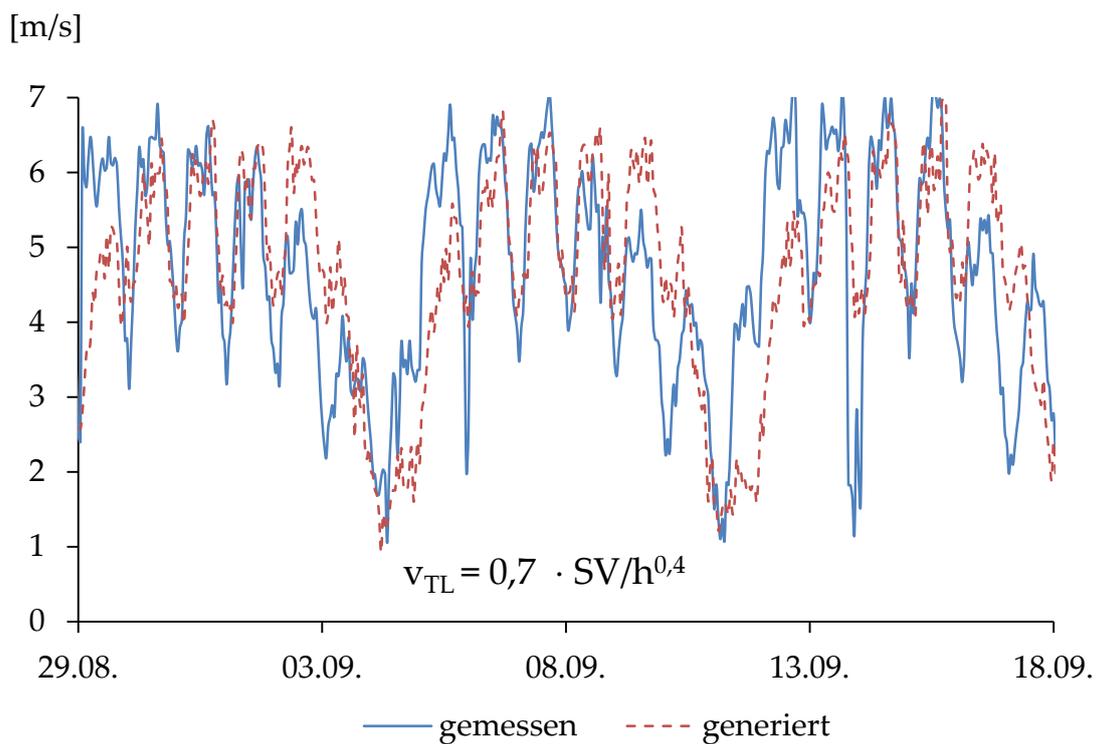


Abbildung C. 80: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Nordröhre

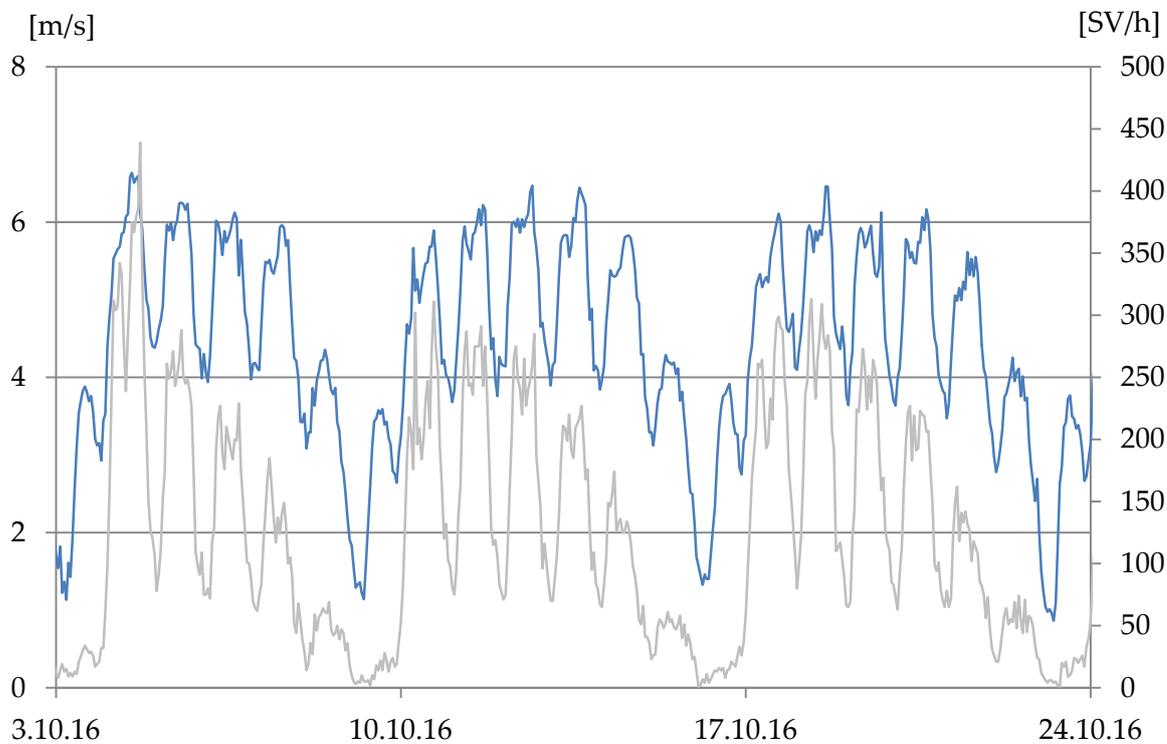


Abbildung C. 81: Anteil Schwerverkehr an Tunnelluftströmung

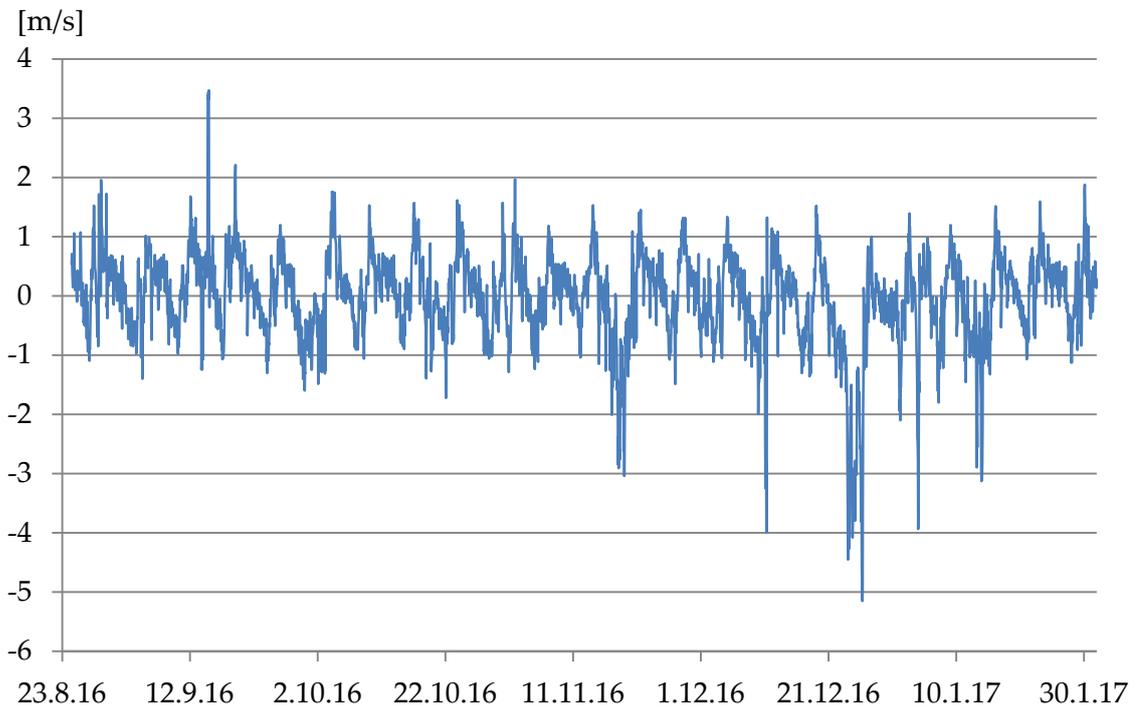


Abbildung C. 82: Grundströmung

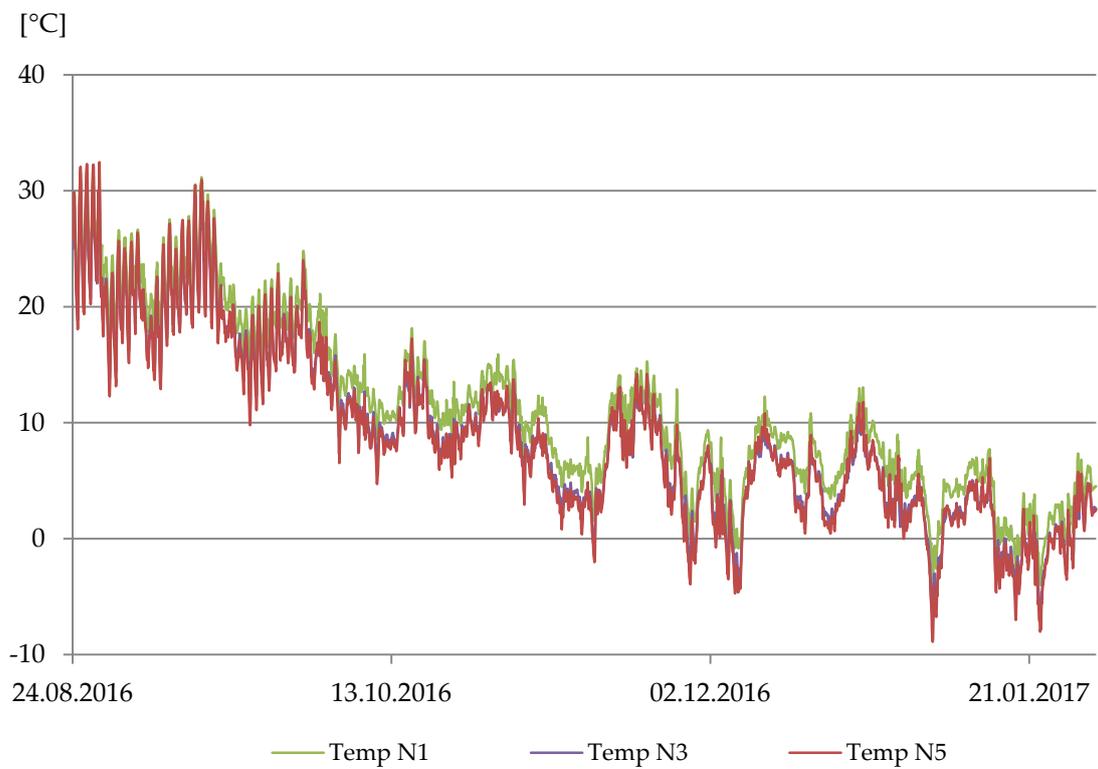


Abbildung C. 83: Tunnellufttemperatur Nordröhre im Jahresgang

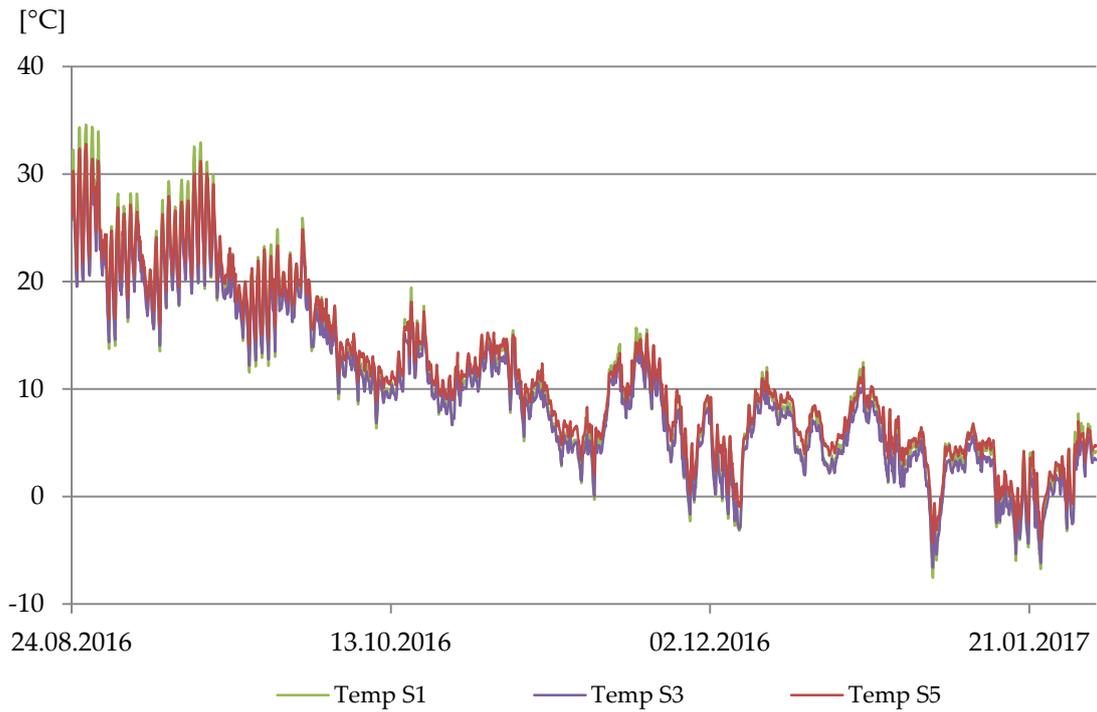


Abbildung C. 84: Tunnellufttemperatur Südröhre im Jahresgang

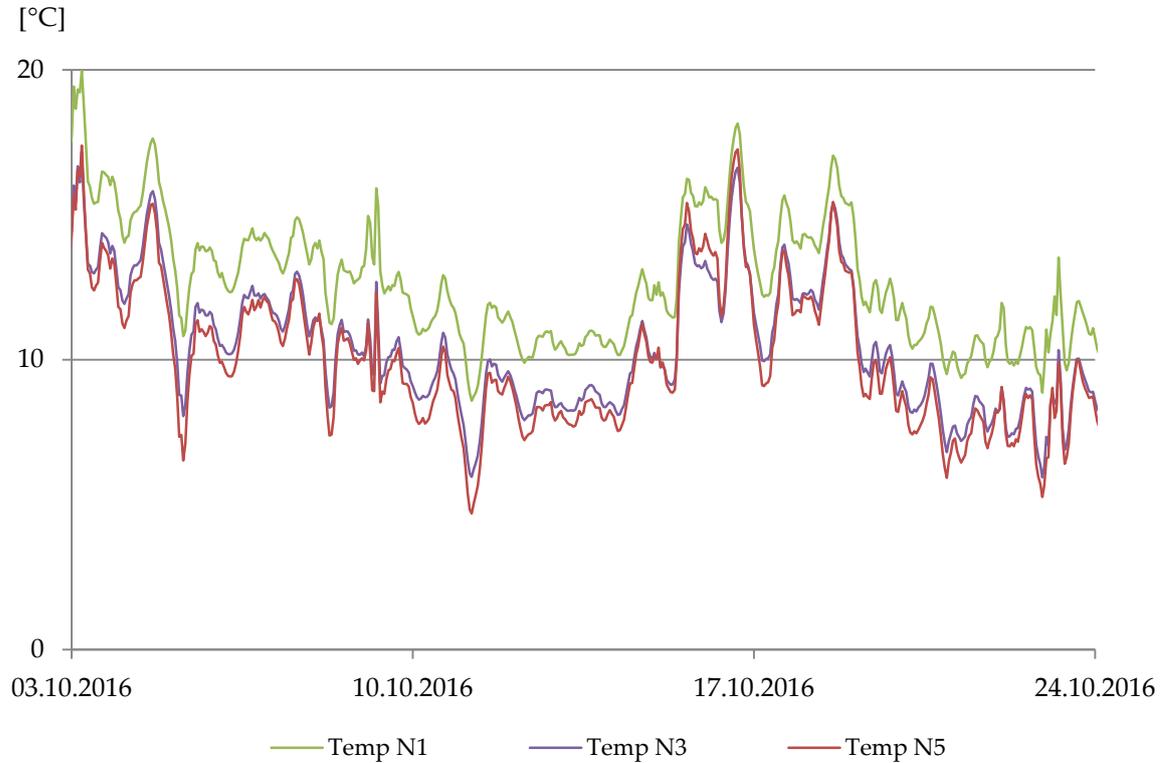


Abbildung C. 85: Tunnellufttemperatur Nordröhre im Wochengang

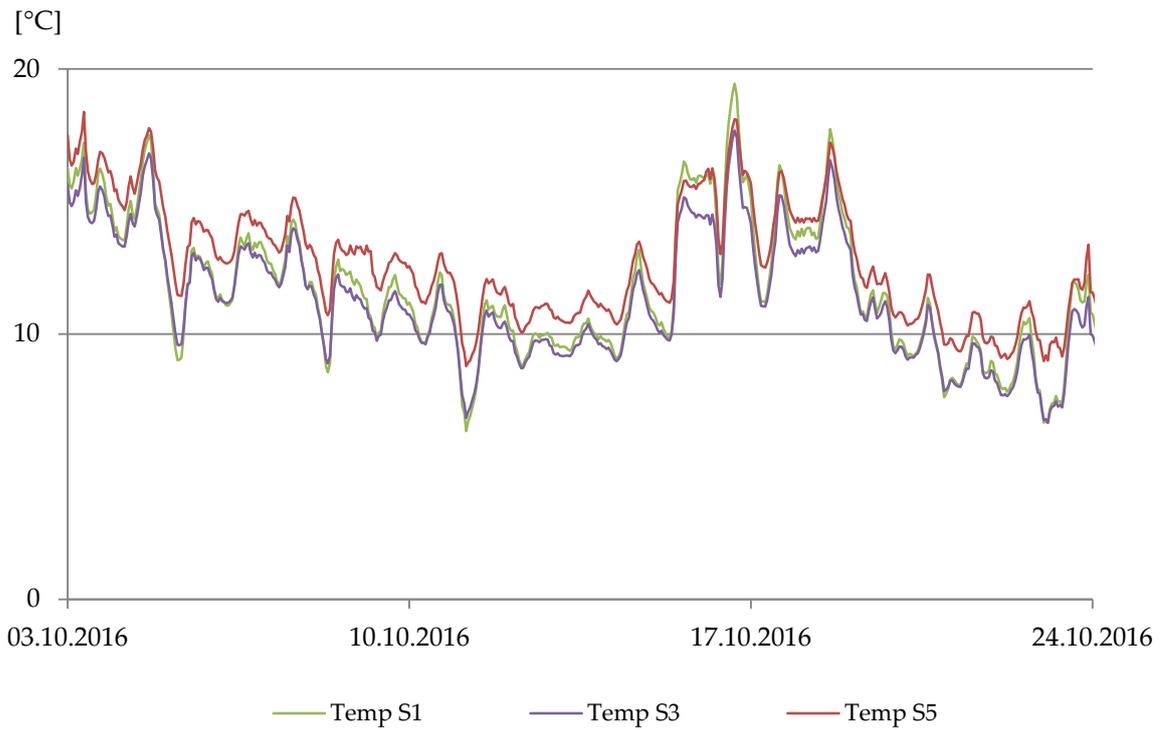


Abbildung C. 86: Tunnellufttemperatur Südröhre im Wochengang

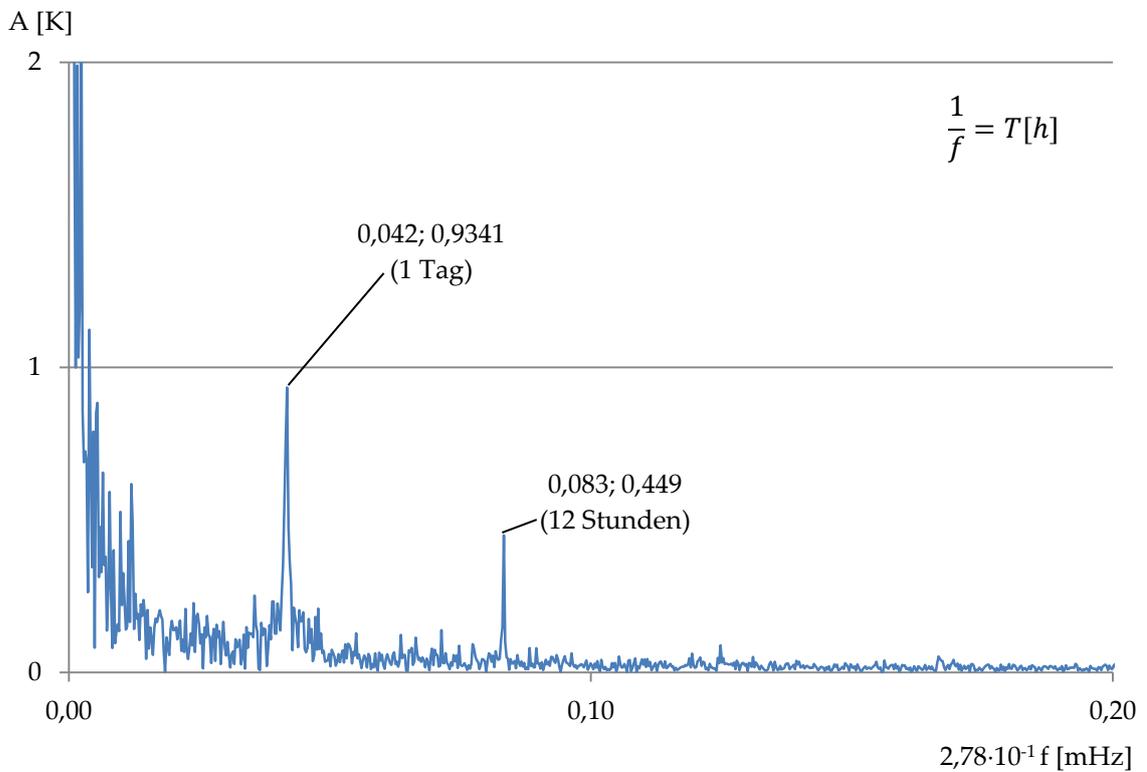


Abbildung C. 87: FFT - Tunnellufttemperatur Nordröhre

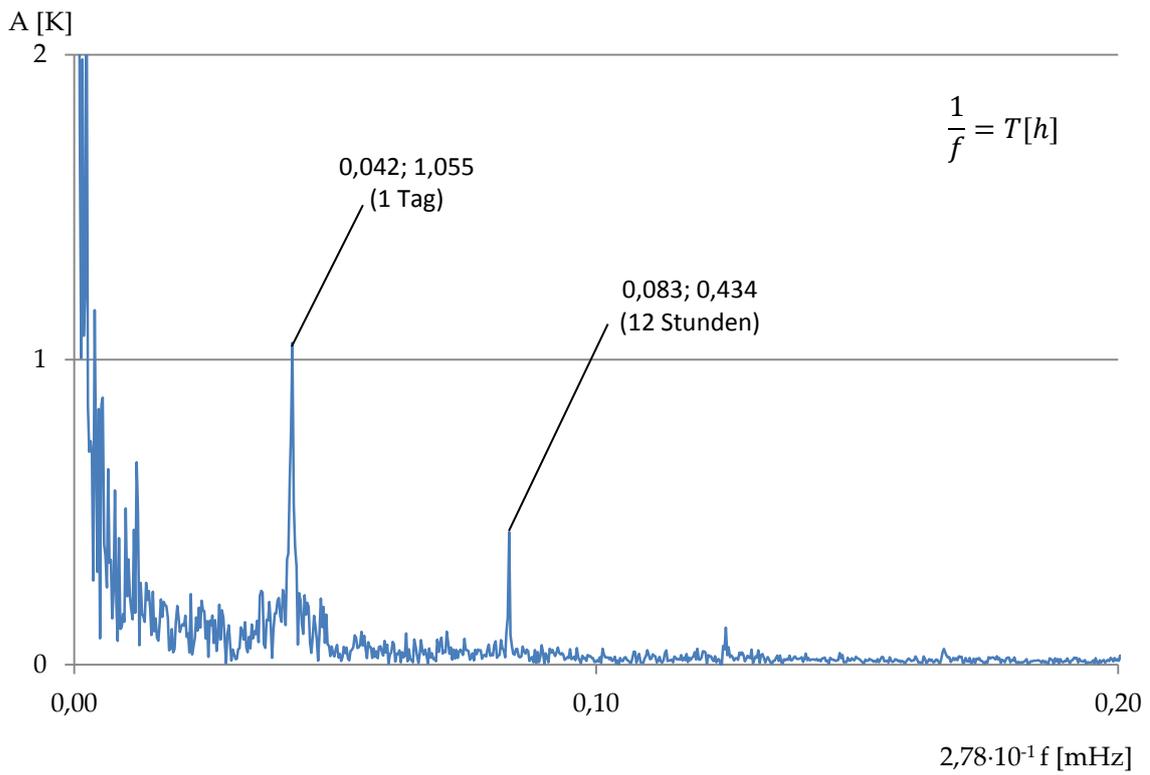


Abbildung C. 88: FFT - Tunnellufttemperatur Südröhre

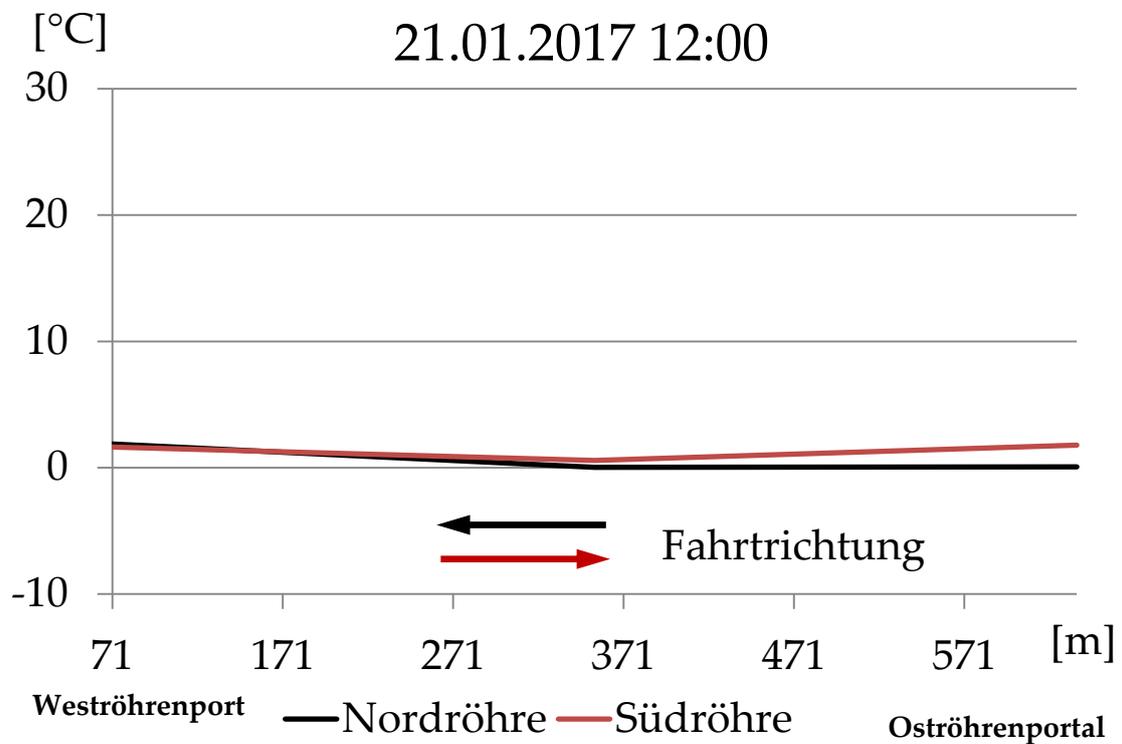


Abbildung C. 89: Temperaturverteilung entlang der Tunnelröhren, exemplarisch

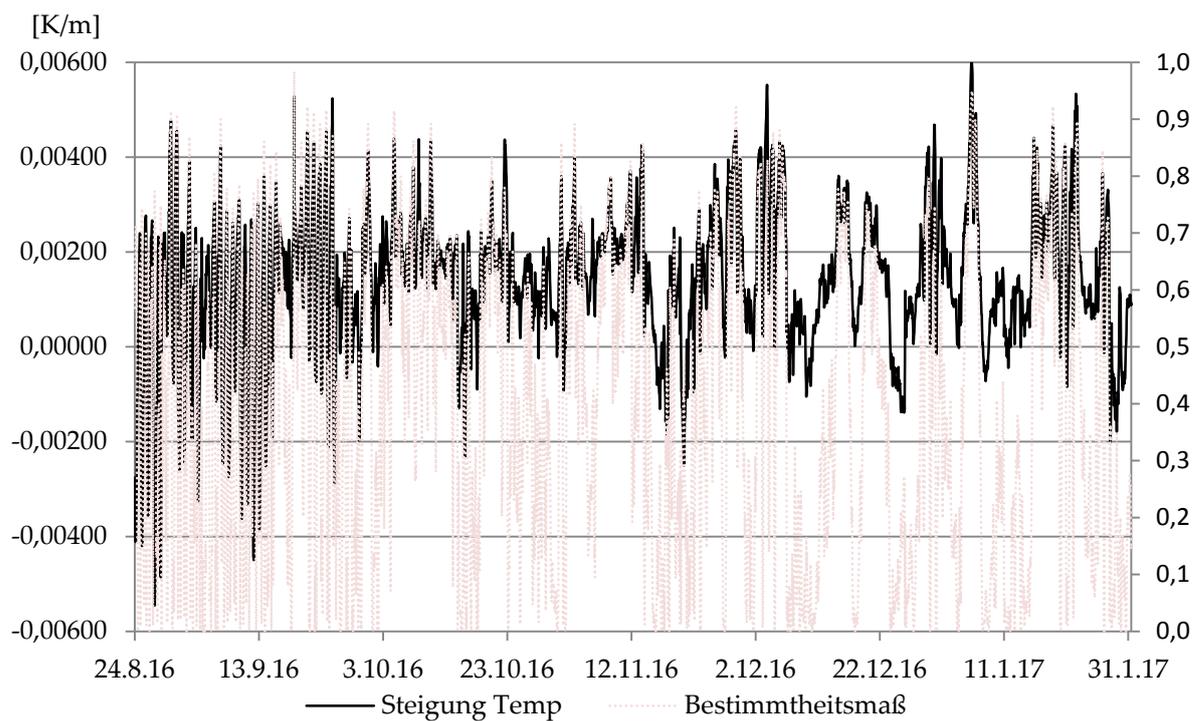


Abbildung C. 90: Steigung der Temperaturgradienten Süd im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

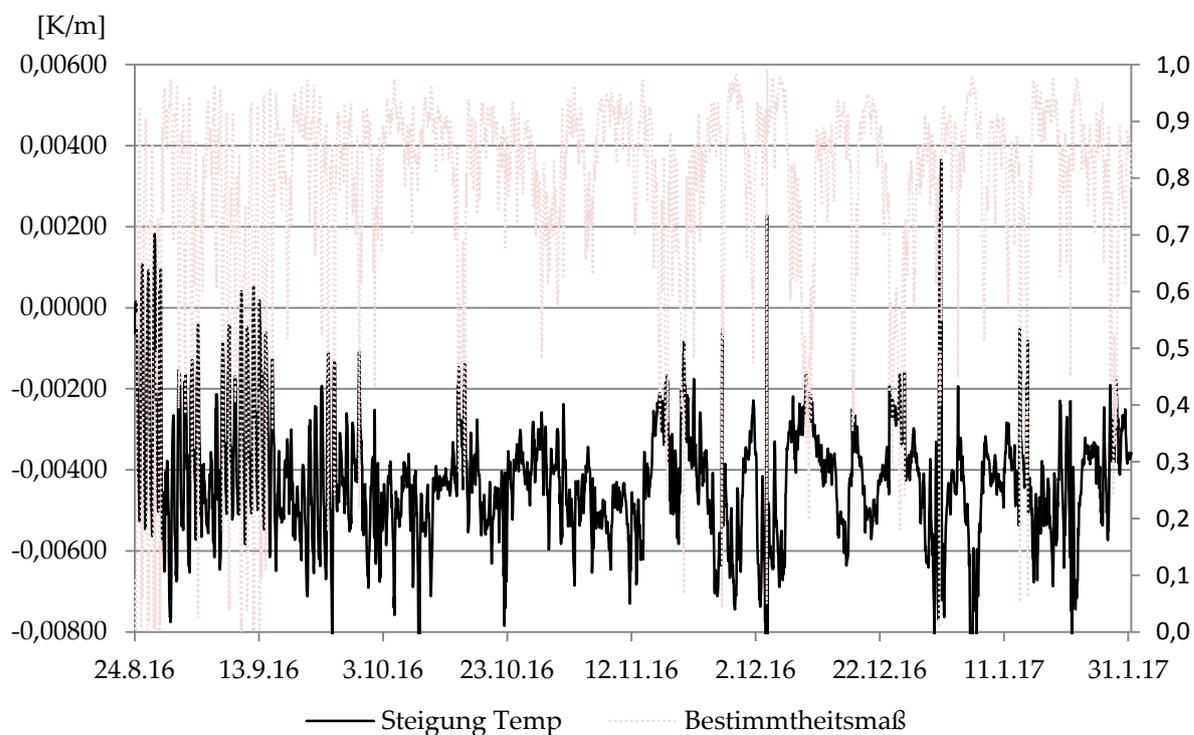


Abbildung C. 91: Steigung der Temperaturgradienten Nord im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

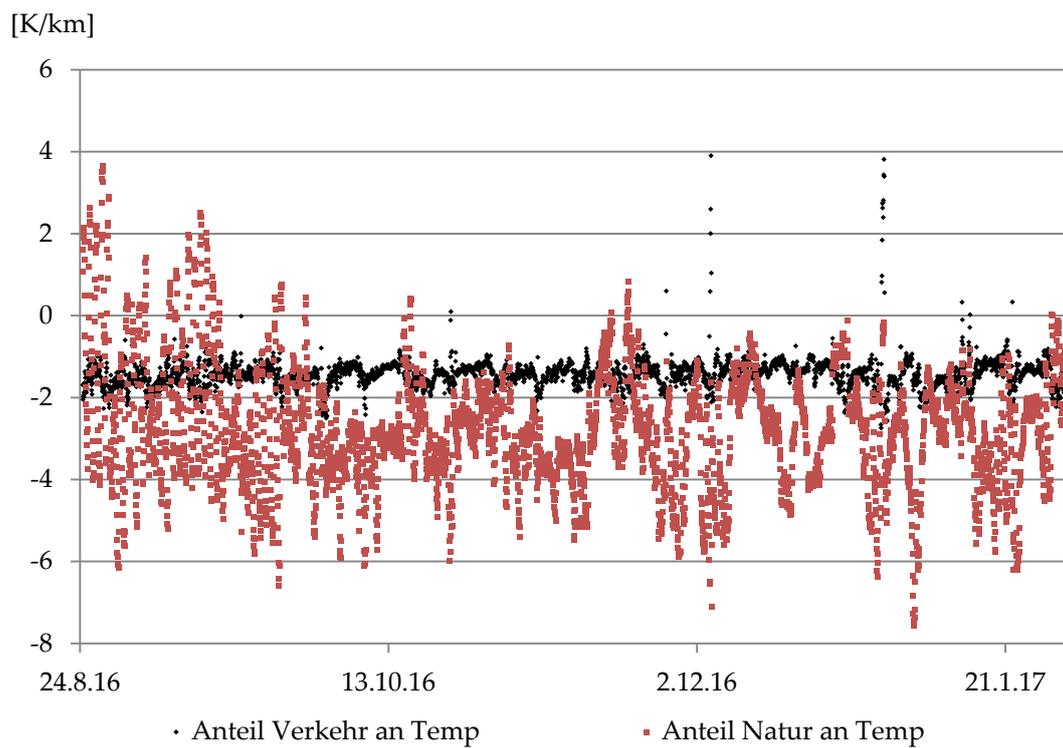


Abbildung C. 92: Anteile an Temperaturgradienten getrennt nach Fahrzeugen und sonstigen Einflüssen

## Tunnel Jagdberg



|                                       |             |                           |                   |
|---------------------------------------|-------------|---------------------------|-------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Thüringen   | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 2                 |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | A4          | <u>Länge i.M.:</u>        | 3072 m            |
| <u>Gradiente:</u>                     | 2,9% Westen | <u>Überdeckung:</u>       | 100 m             |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | 59031       | <u>Luftquerschnitt</u>    | 84 m <sup>2</sup> |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | ja          | 01.01.2016 - 31.01.2017   |                   |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja          | 01.01.2016 - 31.01.2017   |                   |



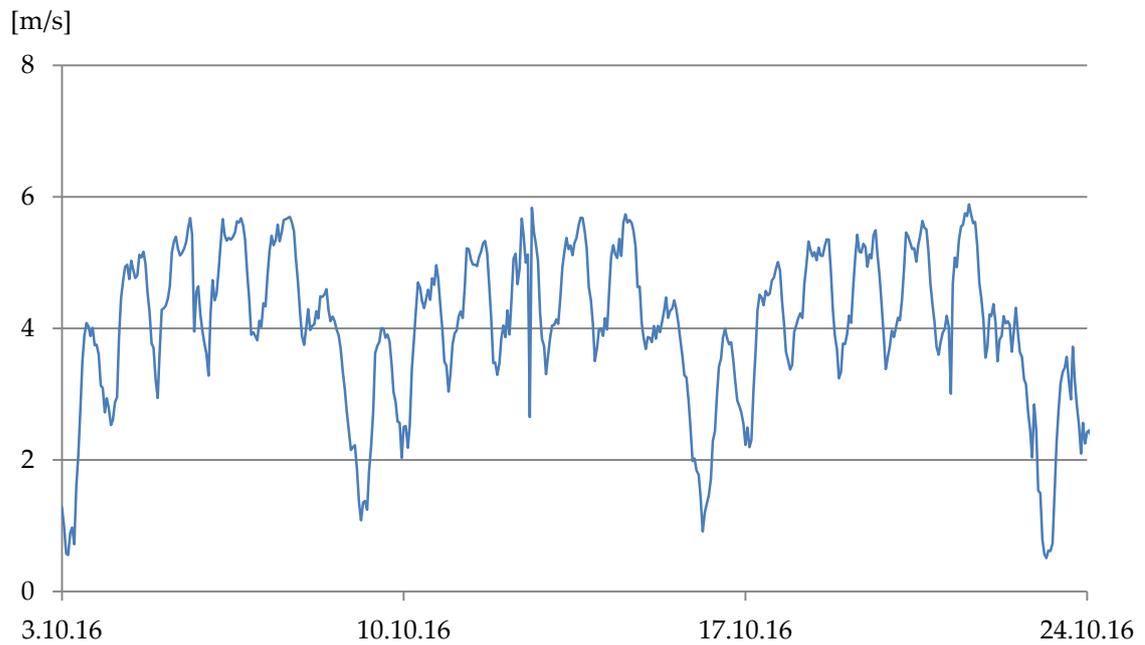


Abbildung C. 93: Tunnelluftströmung Südröhre

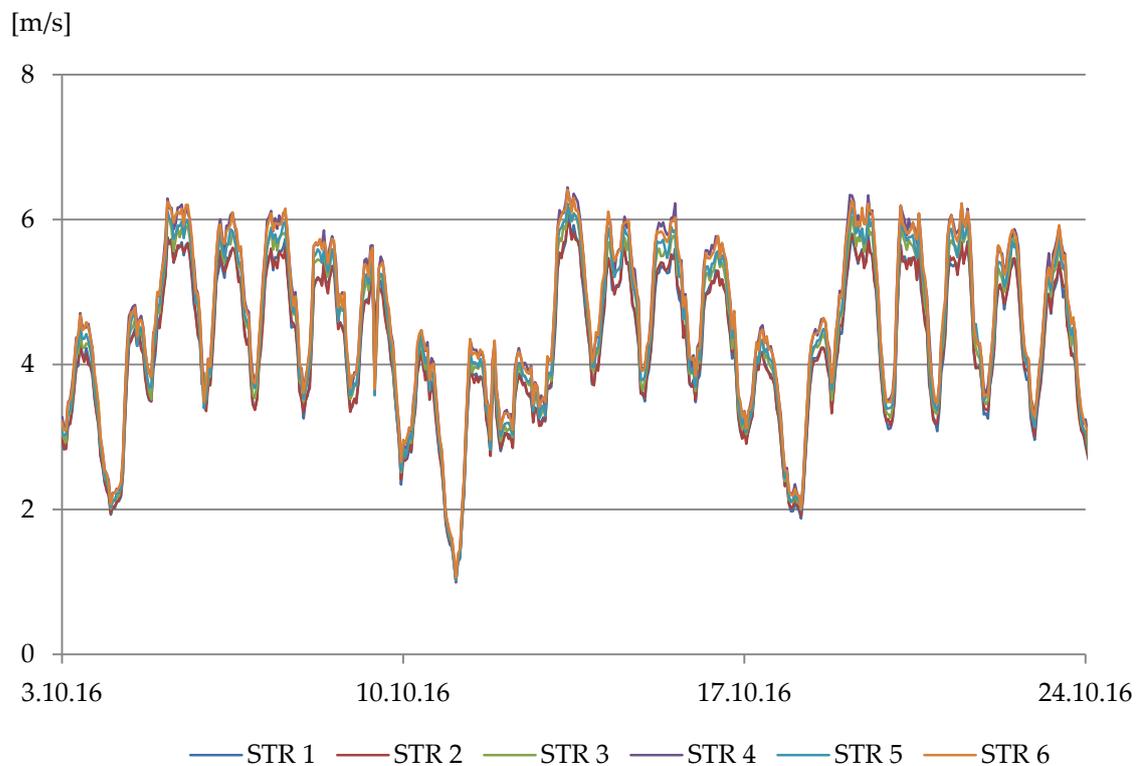


Abbildung C. 94: Tunnelluftströmung Nordröhre

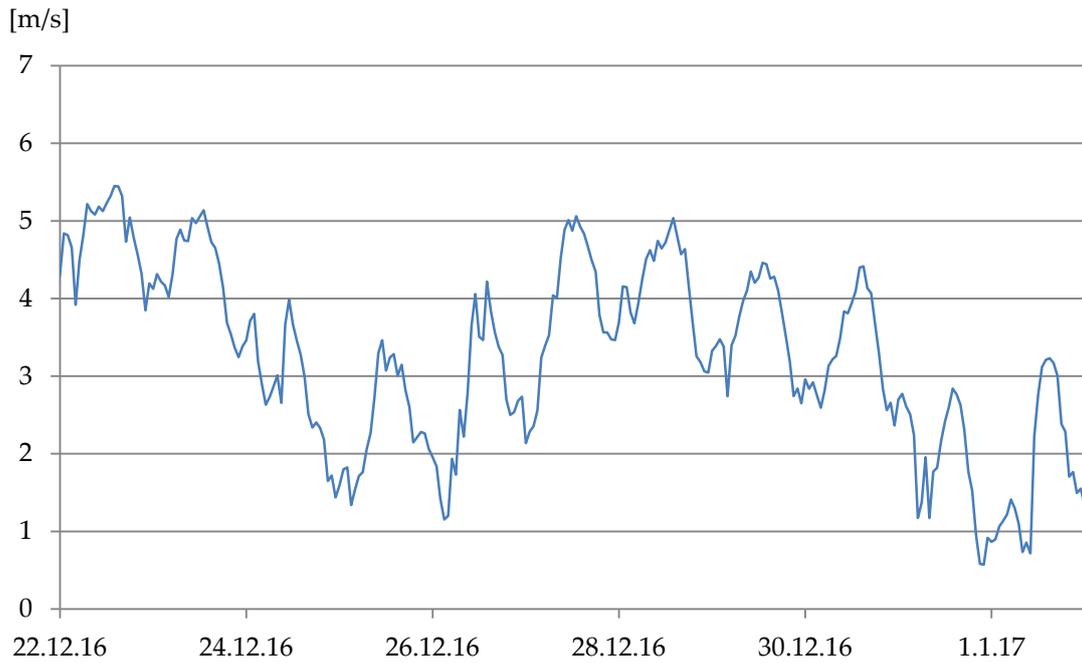


Abbildung C. 95: Tunnelluftströmung Südröhre über Weihnachten

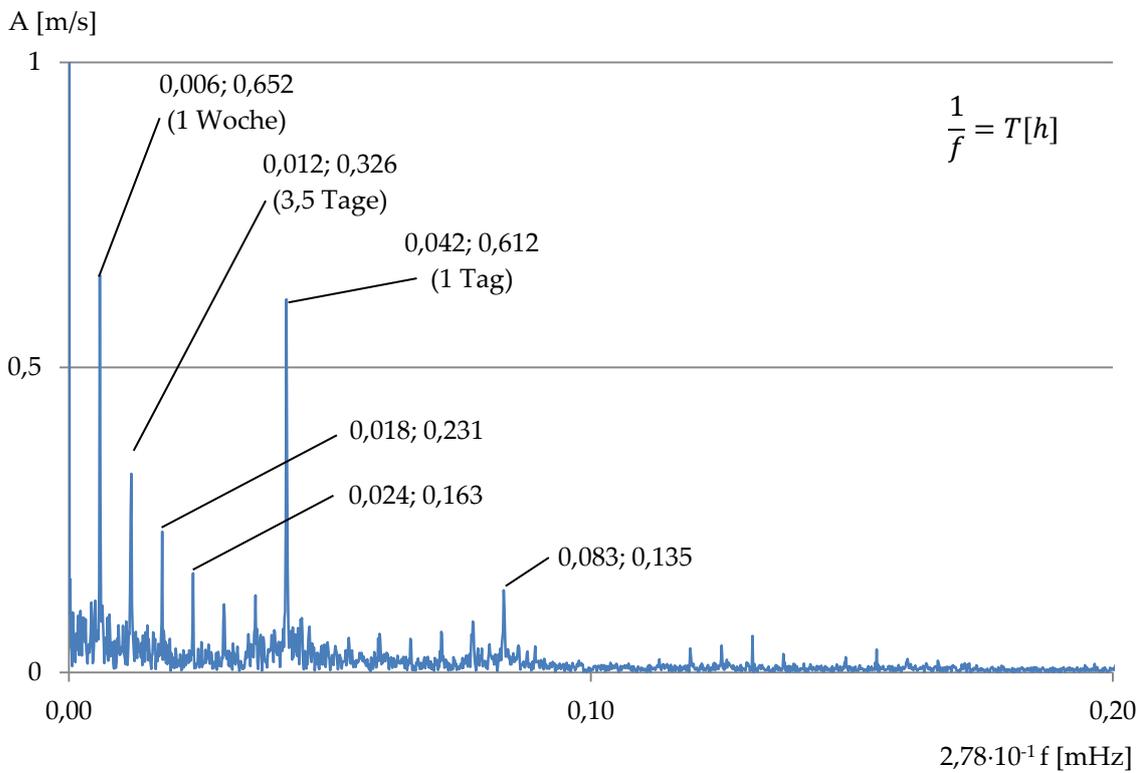


Abbildung C. 96: FFT – Tunnelluftströmung Nordröhre

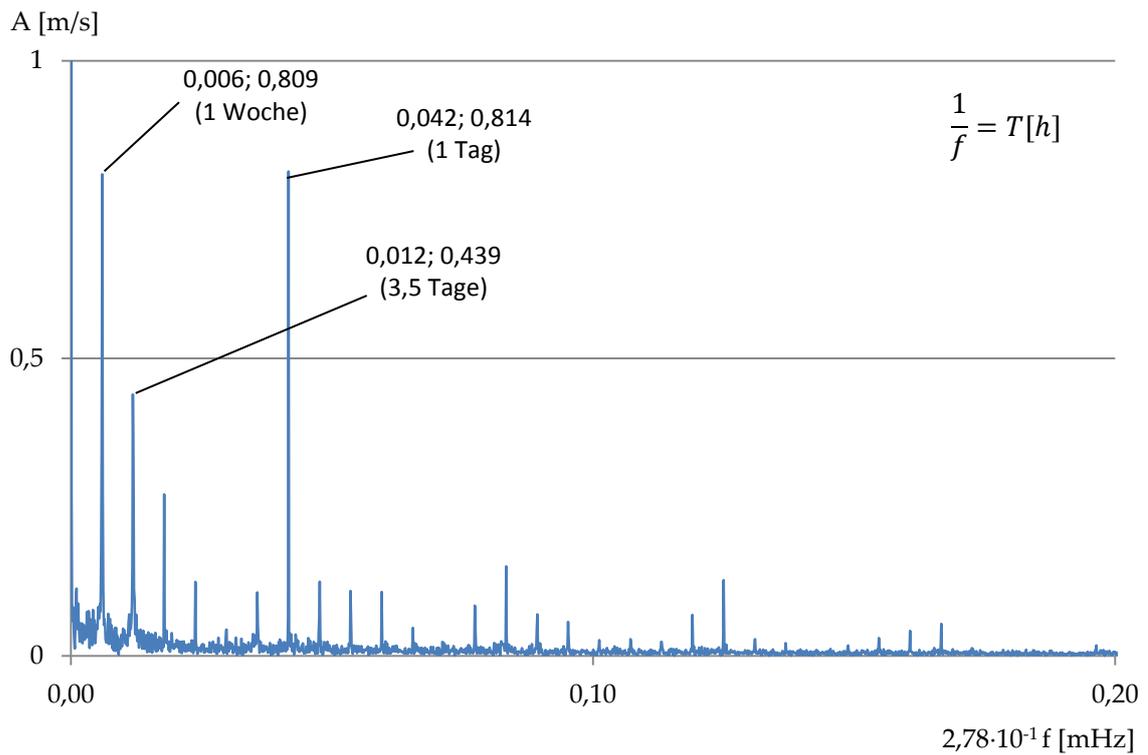


Abbildung C. 97: FFT - Tunnelluftströmung Südröhre

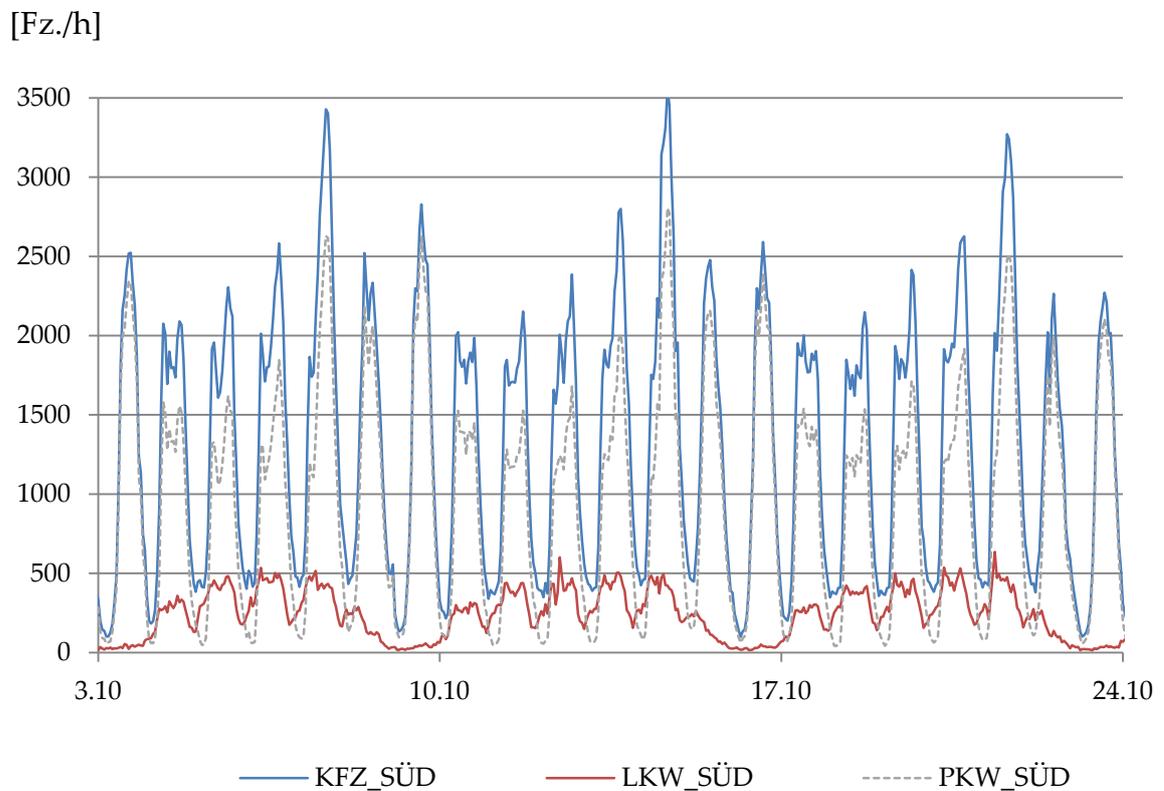


Abbildung C. 98: Verkehrsdaten Südröhre

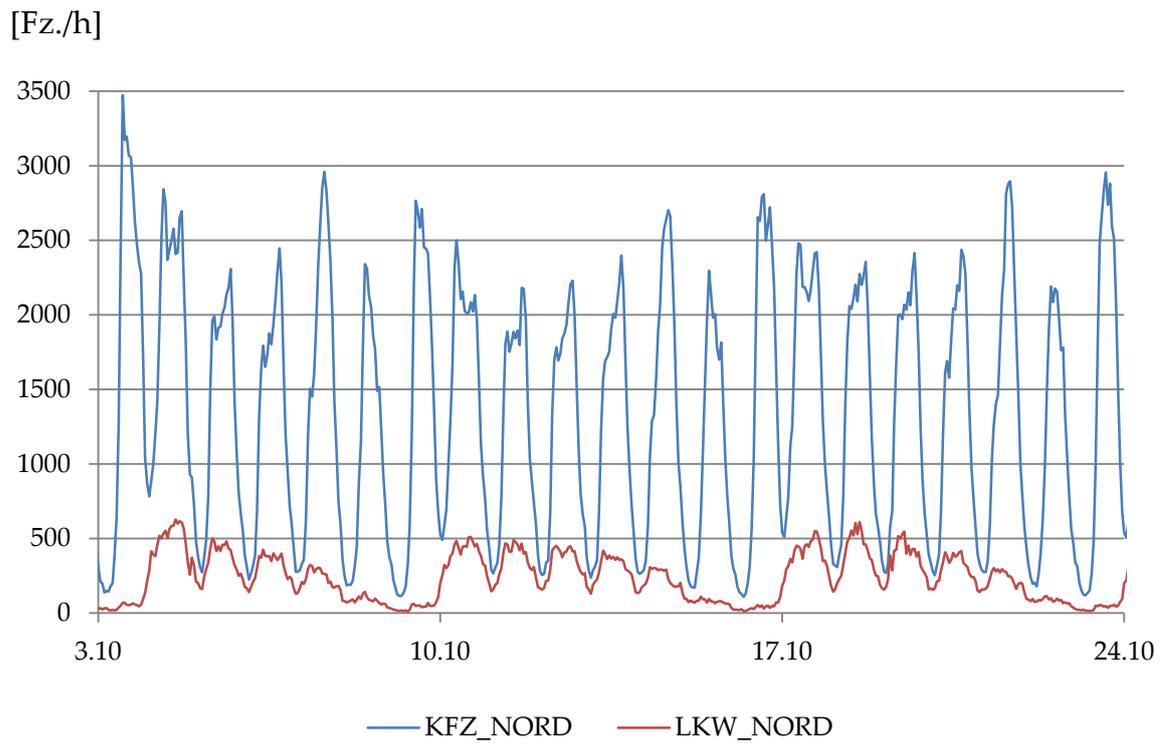


Abbildung C. 99: Verkehrsdaten Südröhre

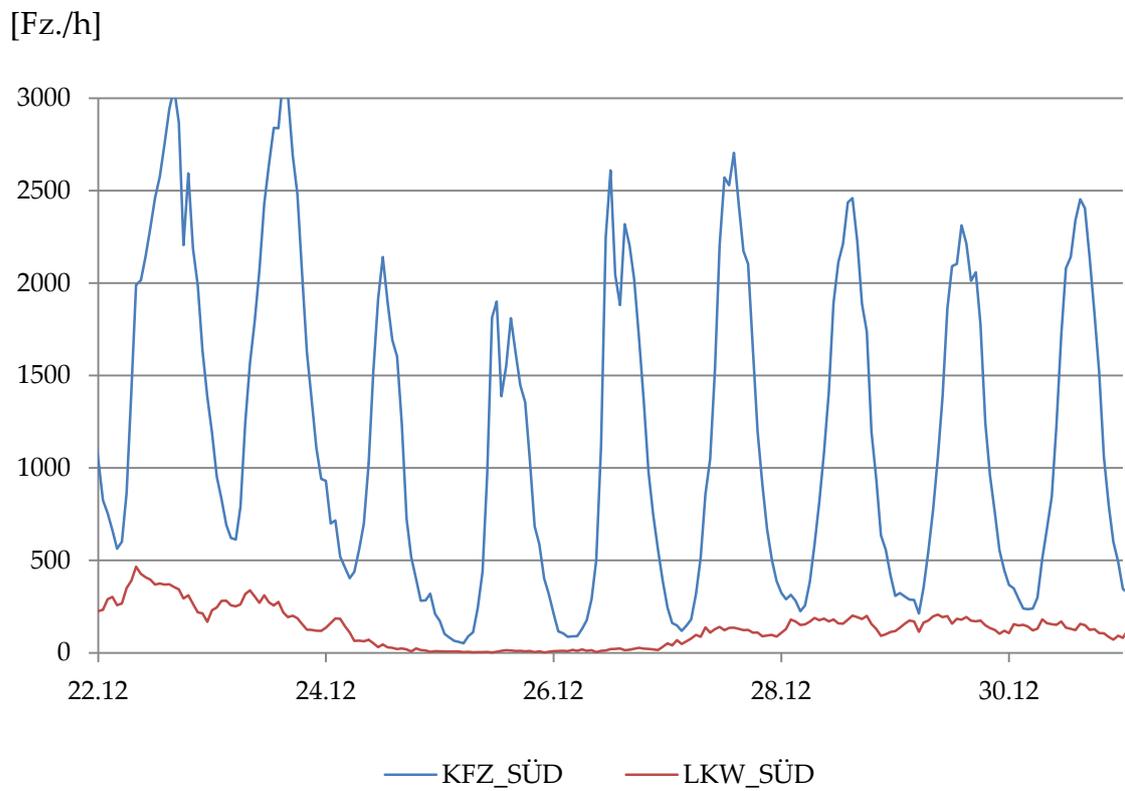


Abbildung C. 100: Verkehrsdaten über Weihnachten Südröhre

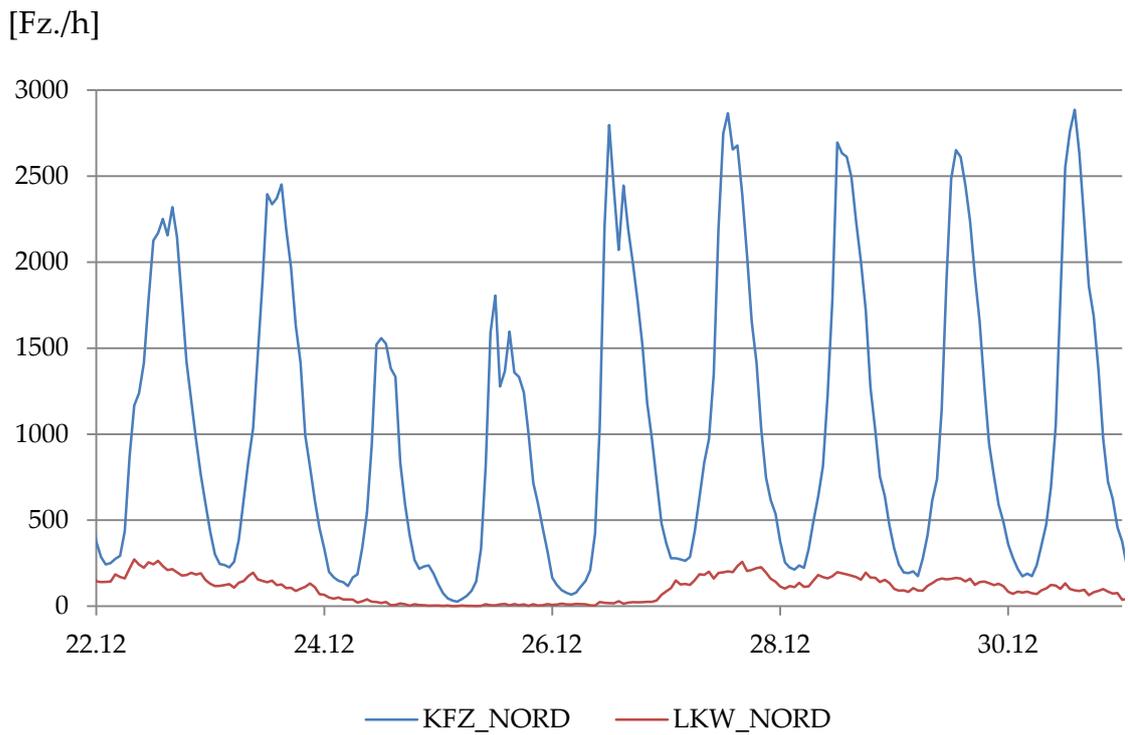


Abbildung C. 101: Verkehrsdaten über Weihnachten Nordröhre

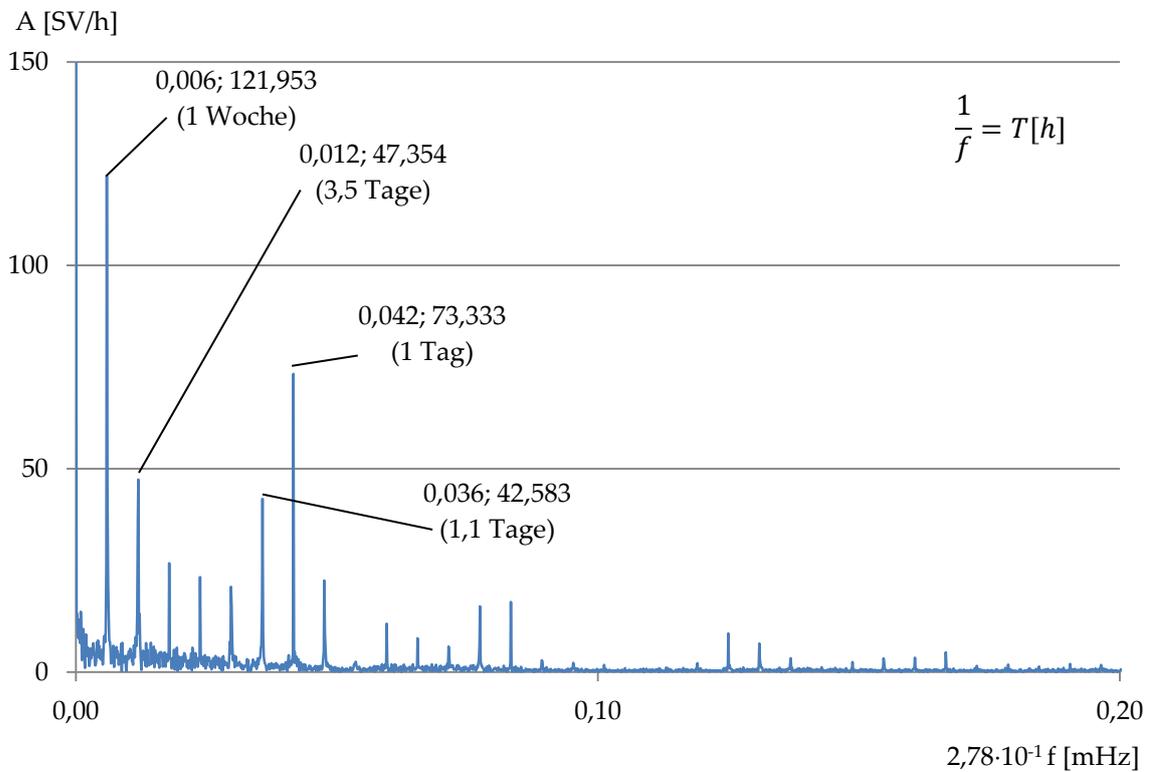


Abbildung C. 102: FFT - Schwerverkehr Nordröhre

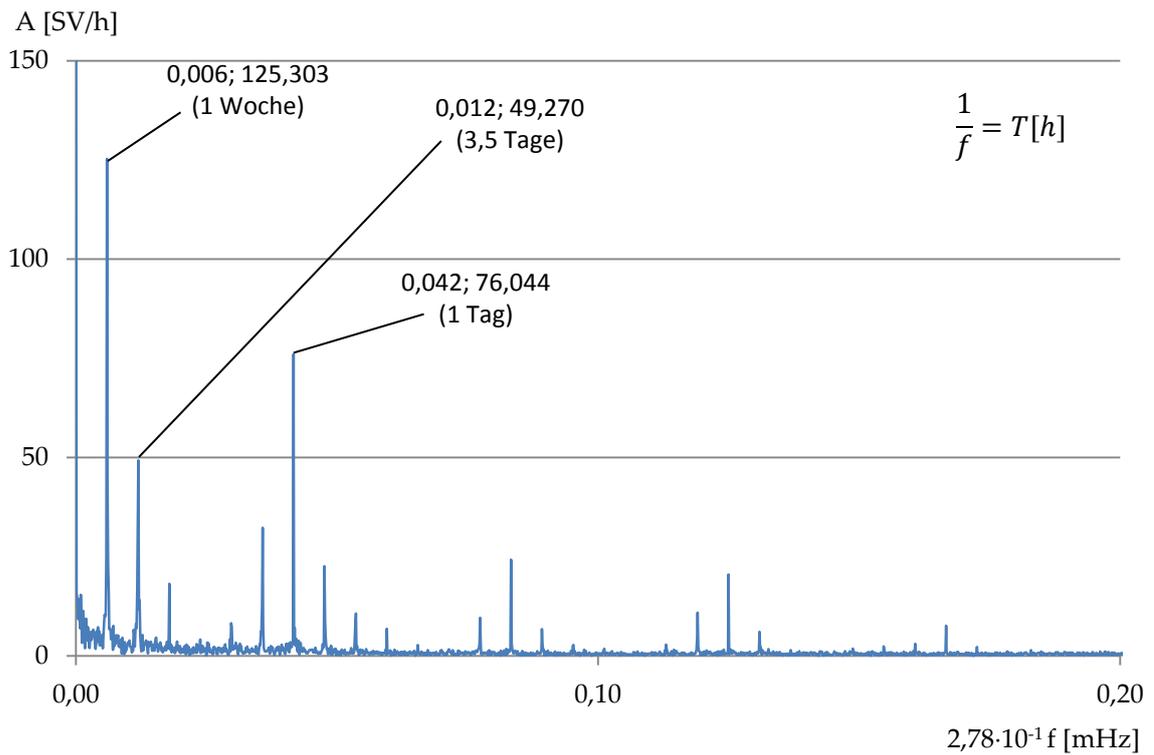


Abbildung C. 103: FFT - Schwerverkehr Südröhre

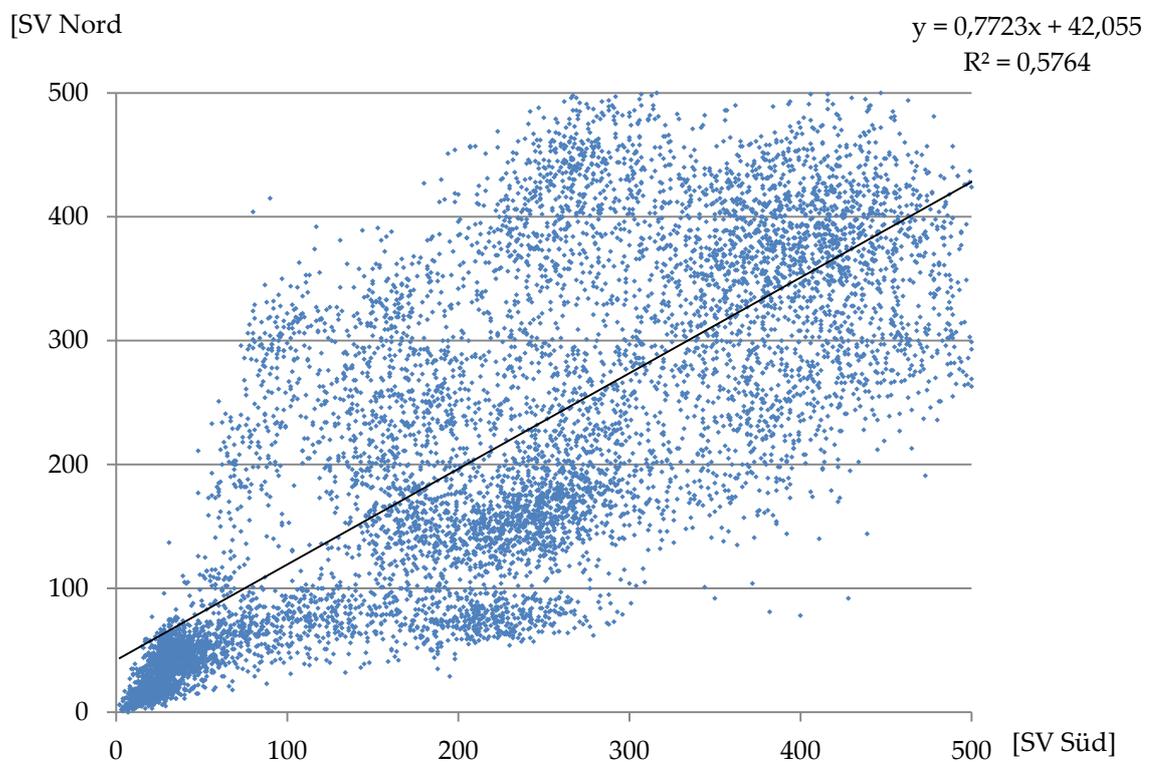


Abbildung C. 104: Korrelation Schwerverkehr Südröhre gegen Nordröhre

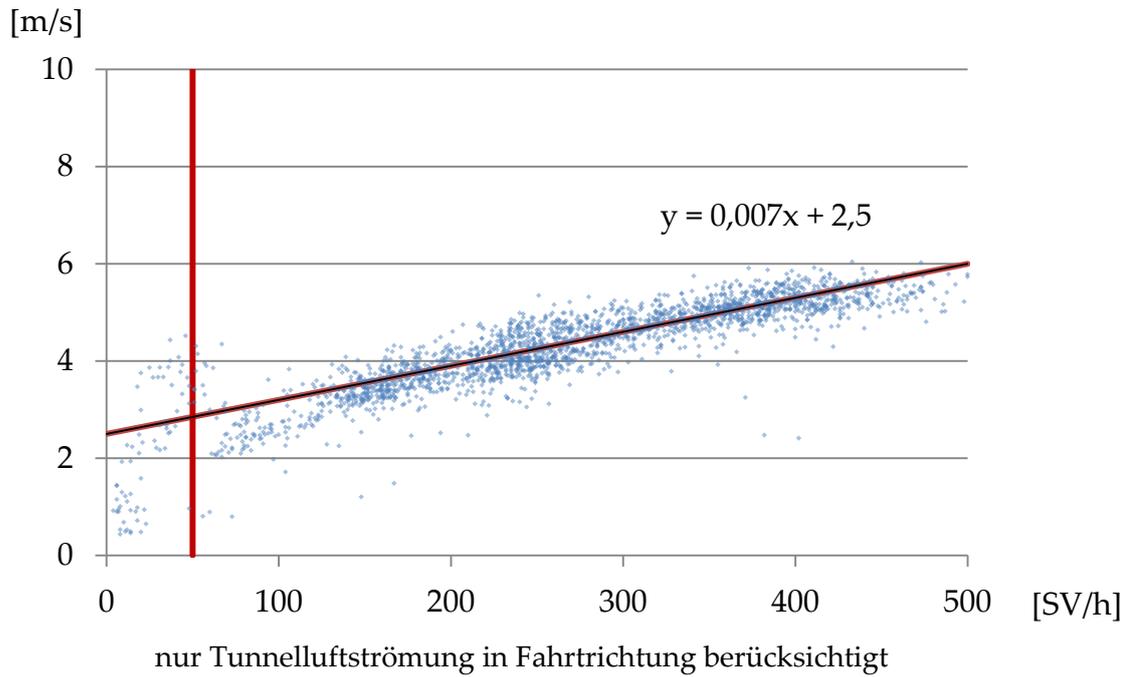


Abbildung C. 105: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Süd, ohne Berücksichtigung der Wochenenden

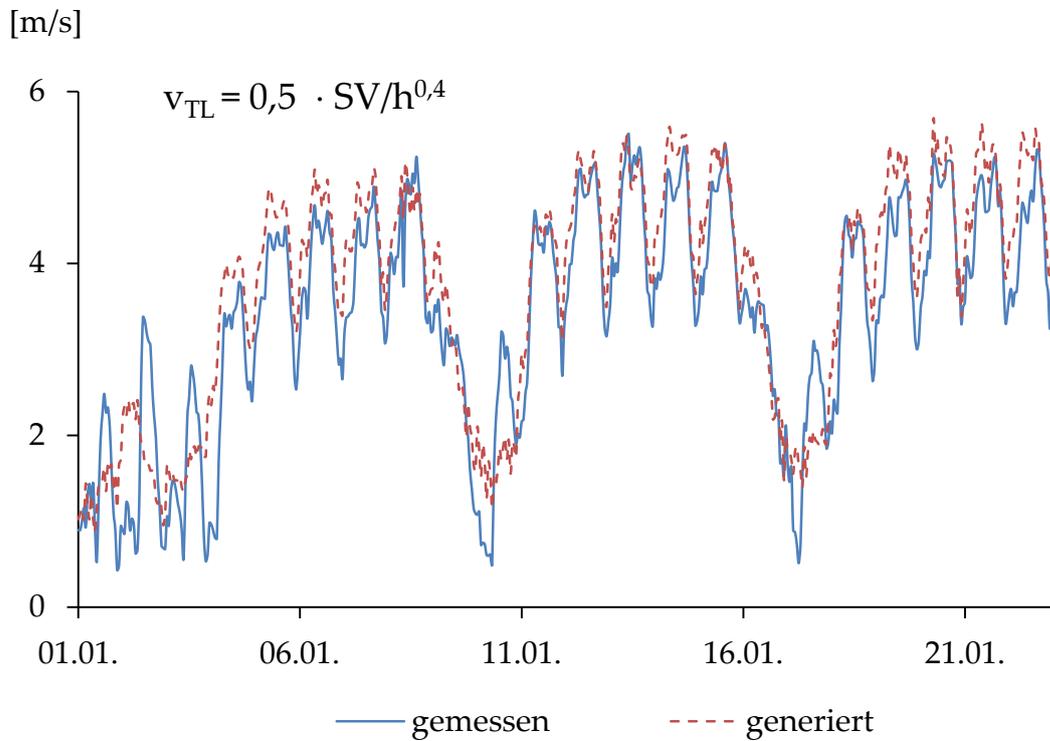


Abbildung C. 106: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Südöhre

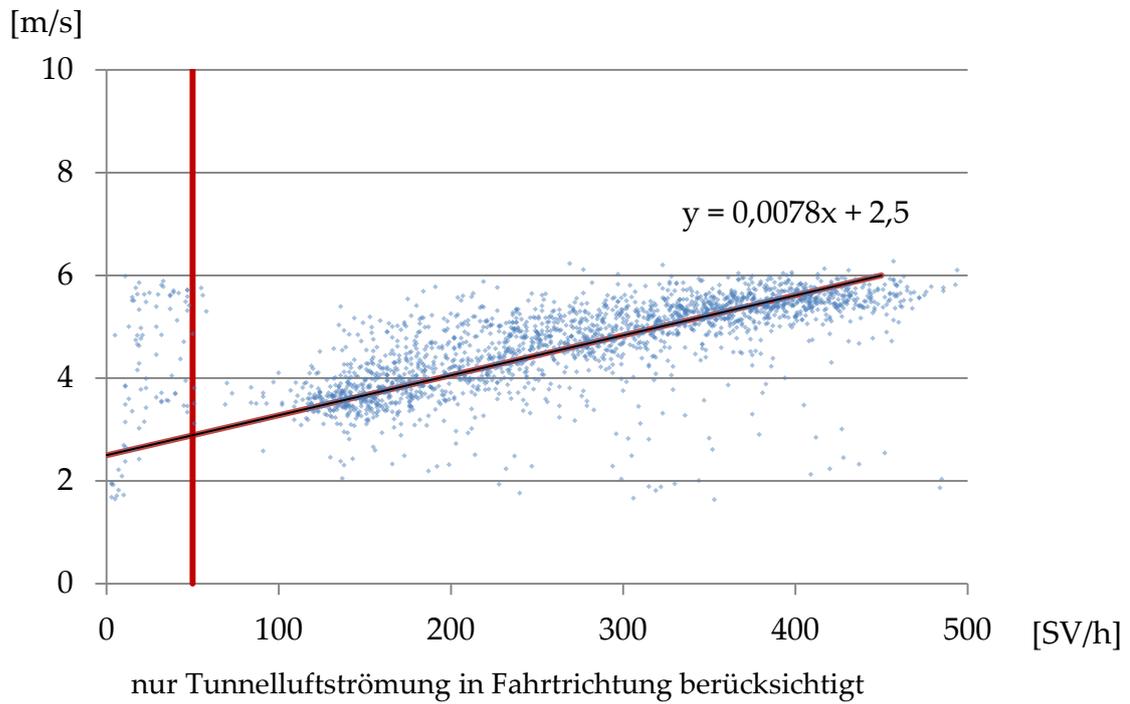


Abbildung C. 107: gegen Tunnelluftströmung Nord, ohne Berücksichtigung der Wochenenden

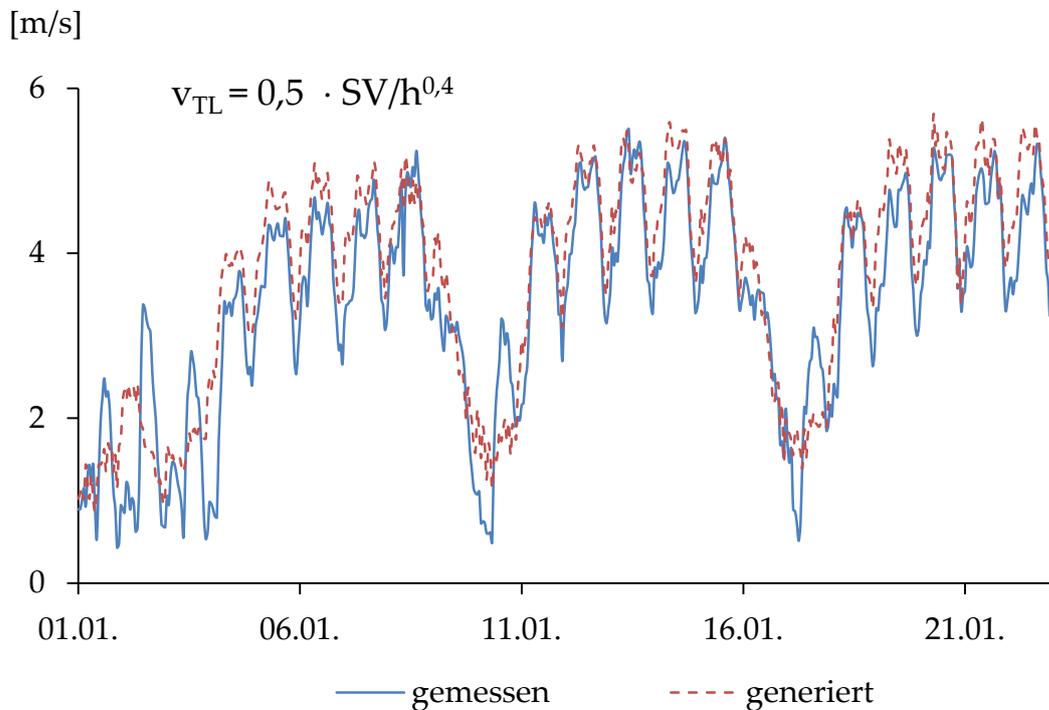


Abbildung C. 108: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Nordröhre

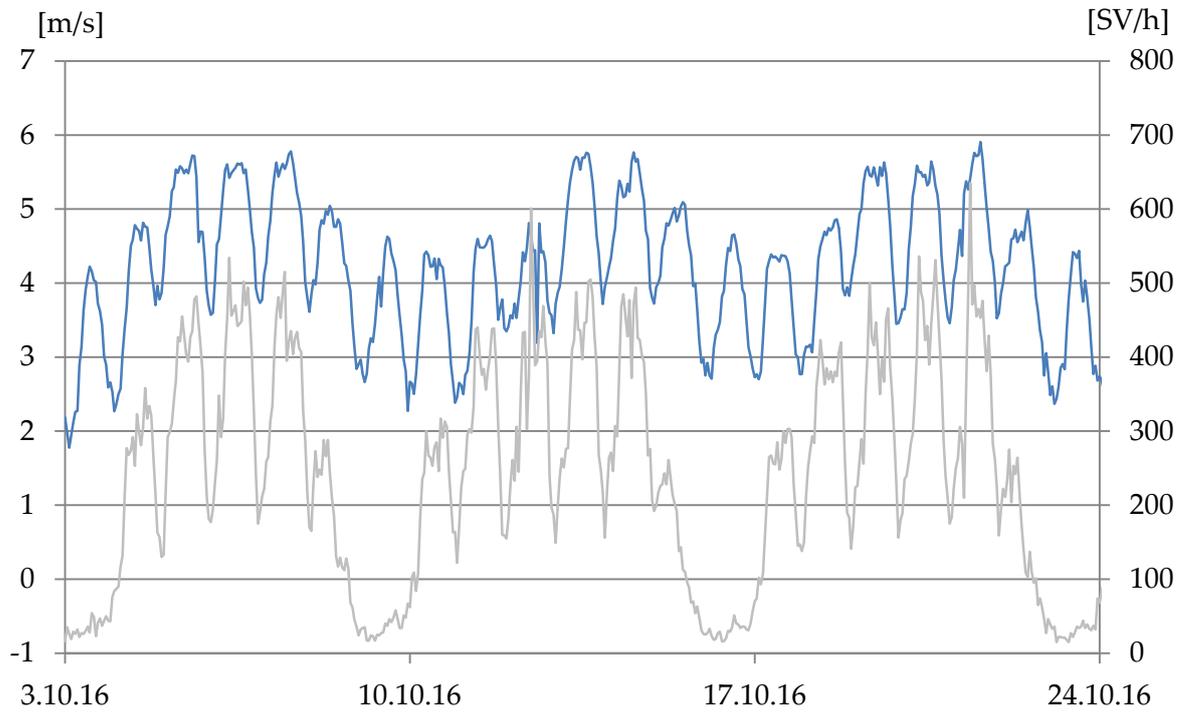


Abbildung C. 109: Anteil Schwerverkehr an Tunnelluftströmung

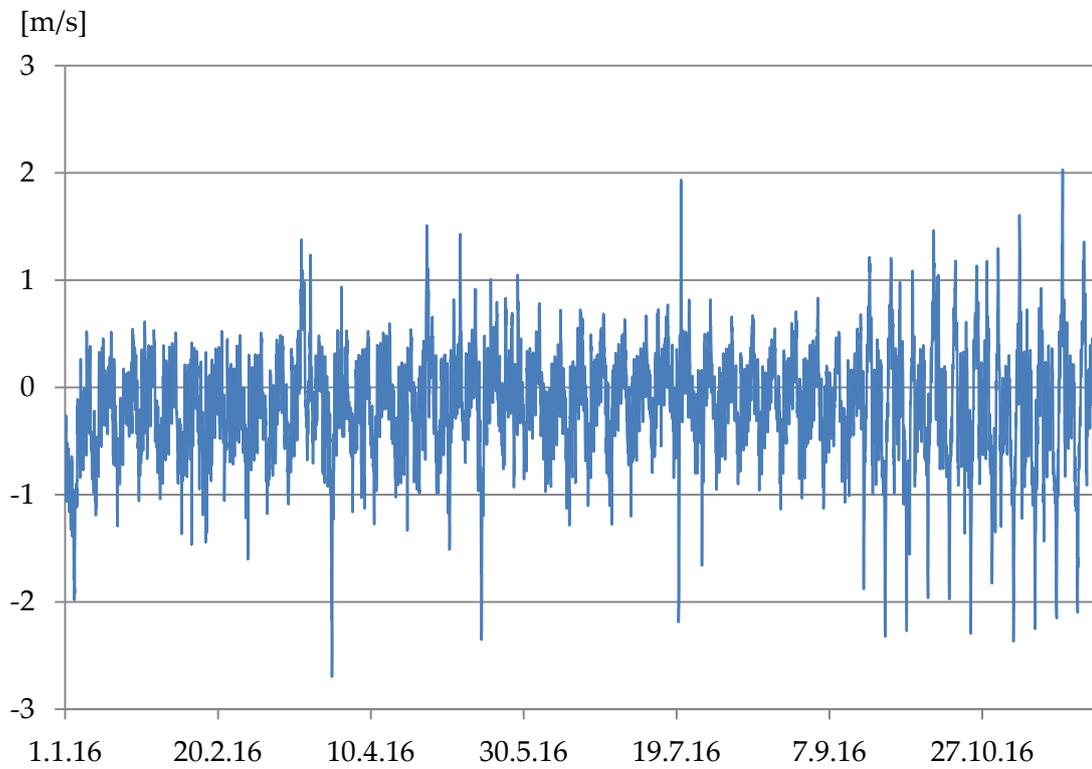


Abbildung C. 110: Grundströmung

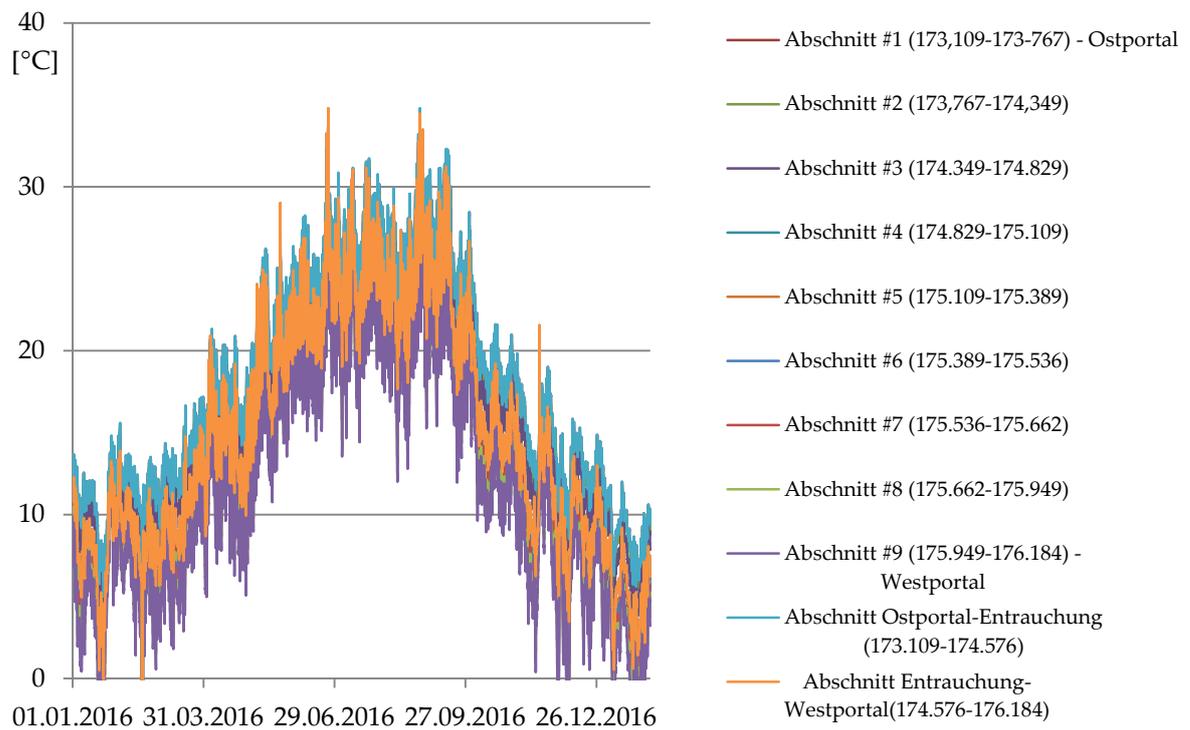


Abbildung C. 111: Tunnellufttemperatur Süd im Jahresgang

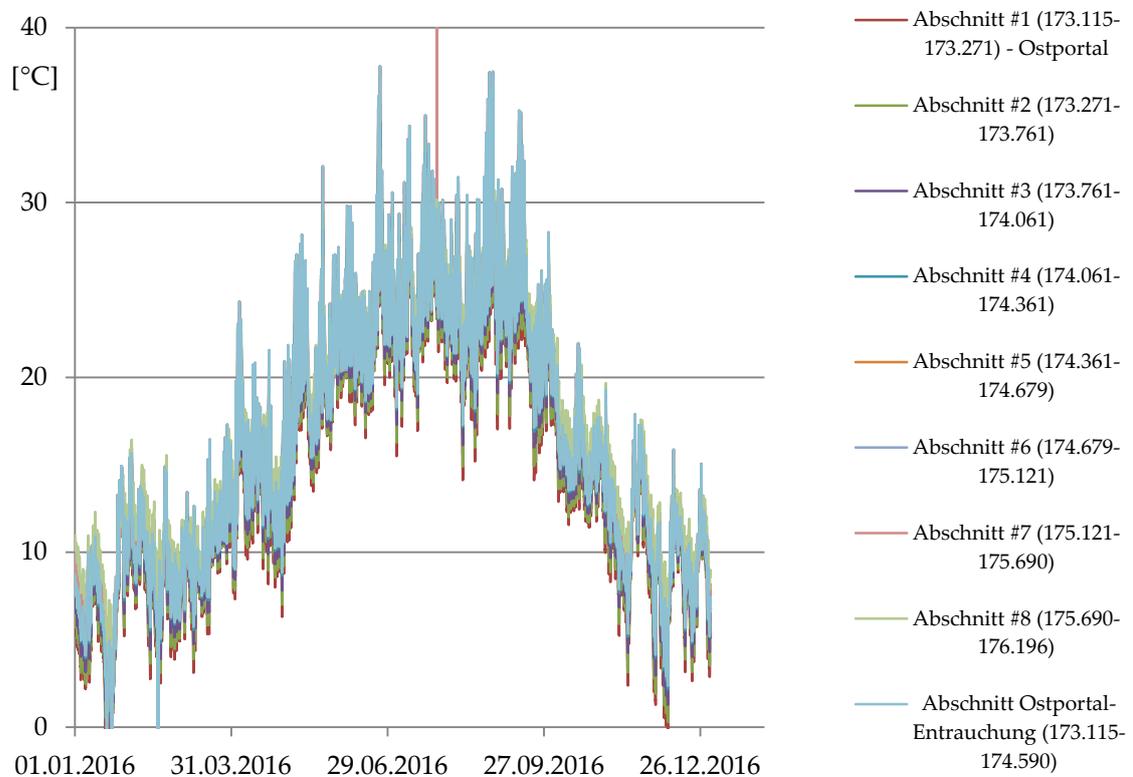


Abbildung C. 112: Tunnellufttemperatur Nord im Jahresgang

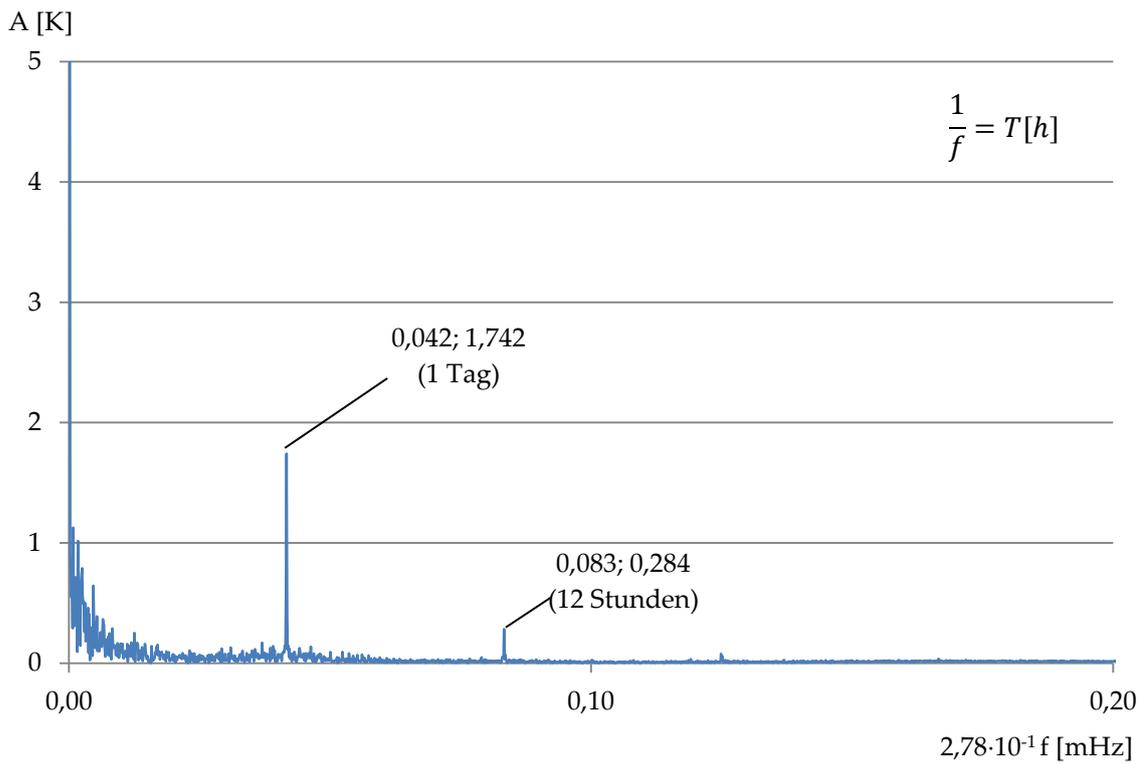


Abbildung C. 113: FFT - Tunnellufttemperatur Nordröhre

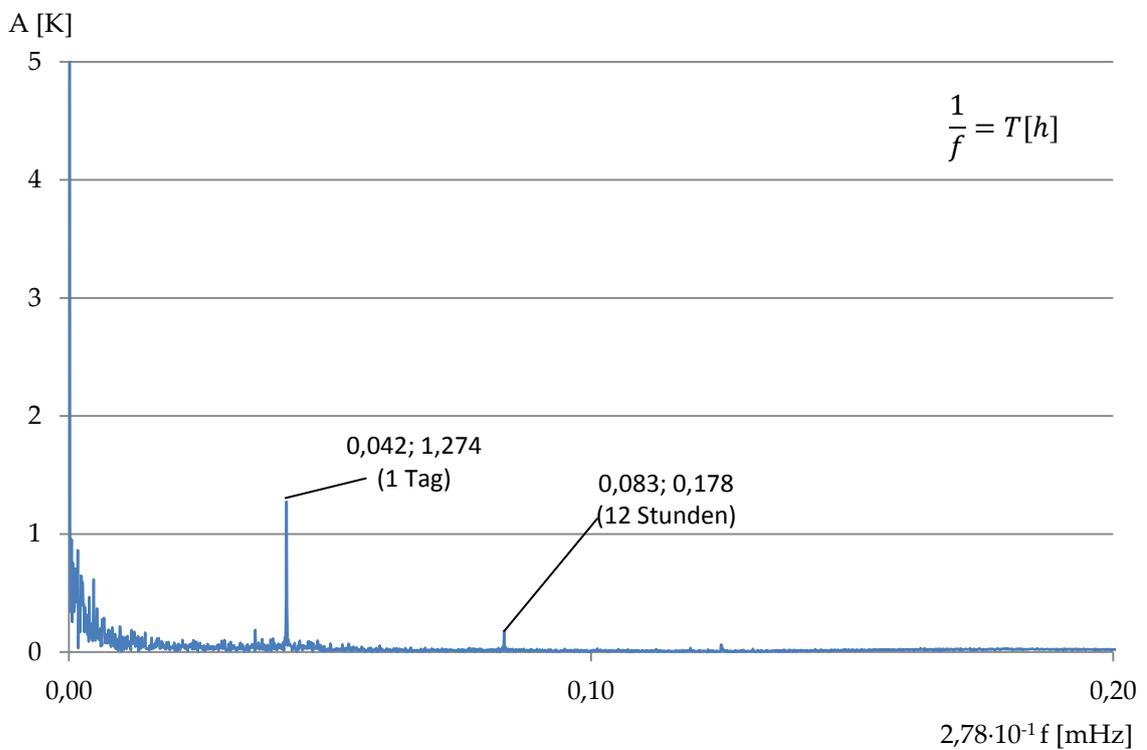


Abbildung C. 114: FFT - Tunnellufttemperatur Südröhre

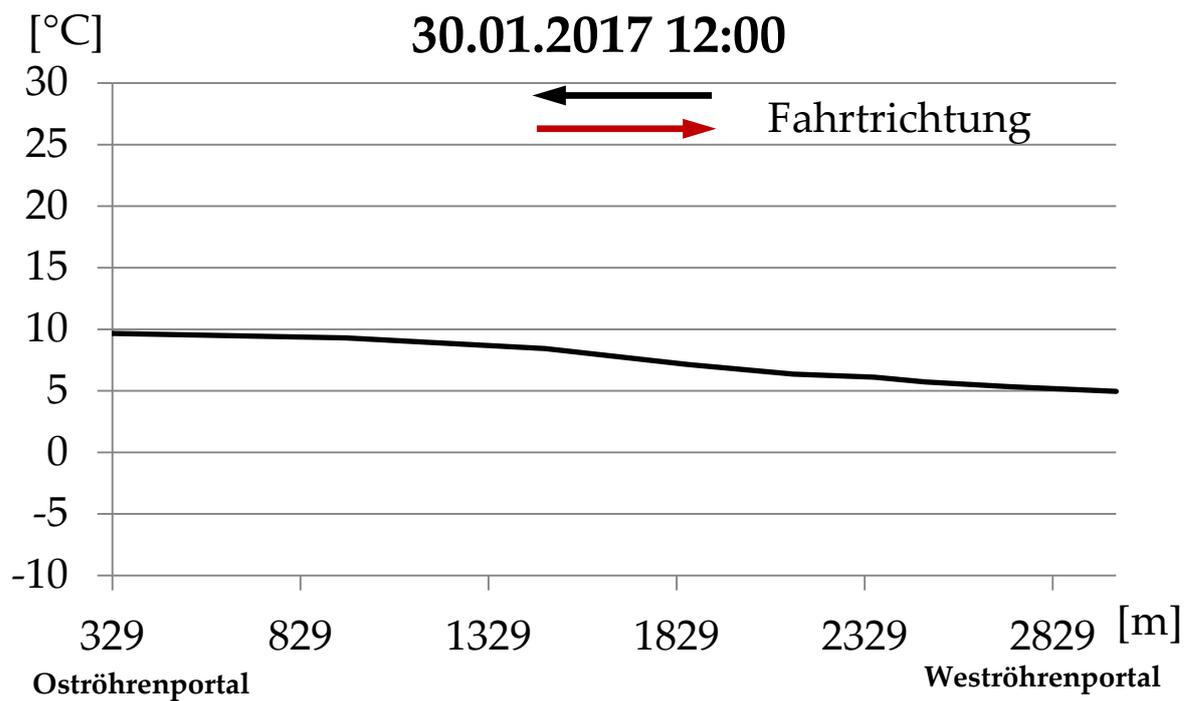


Abbildung C. 115: Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse, exemplarisch

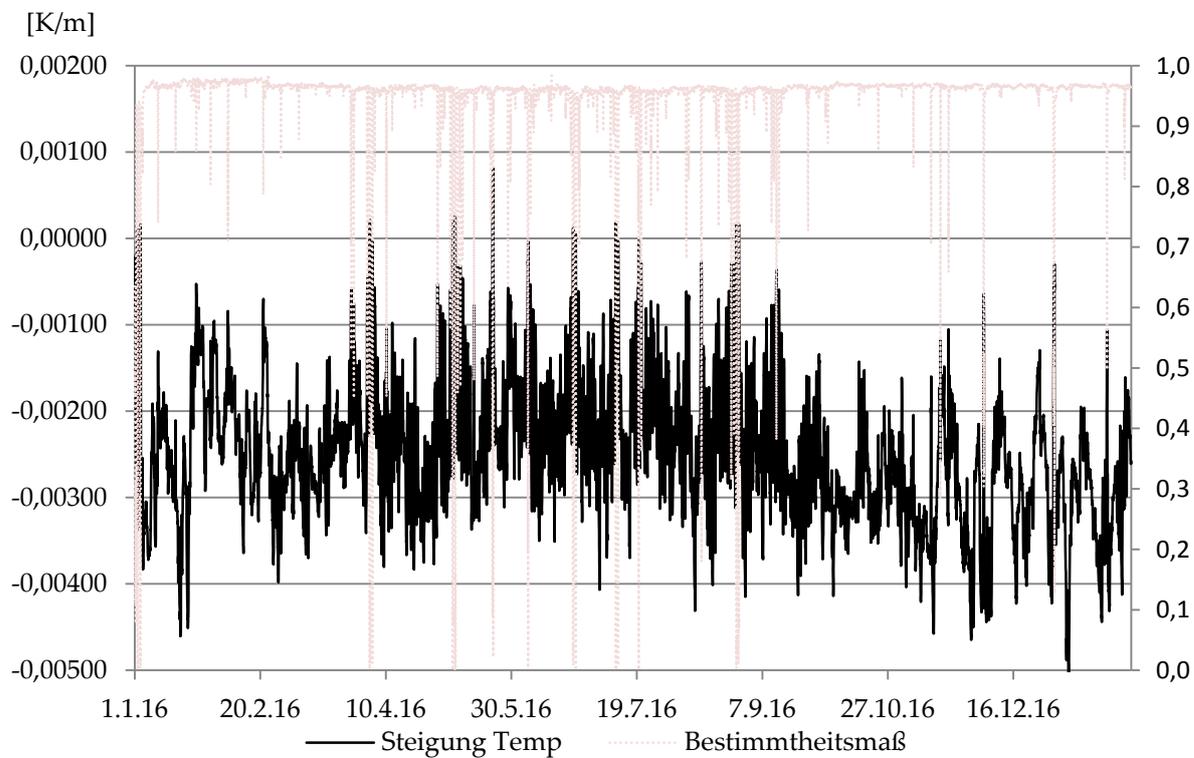


Abbildung C. 116: Steigung der Temperaturgradienten Süd im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

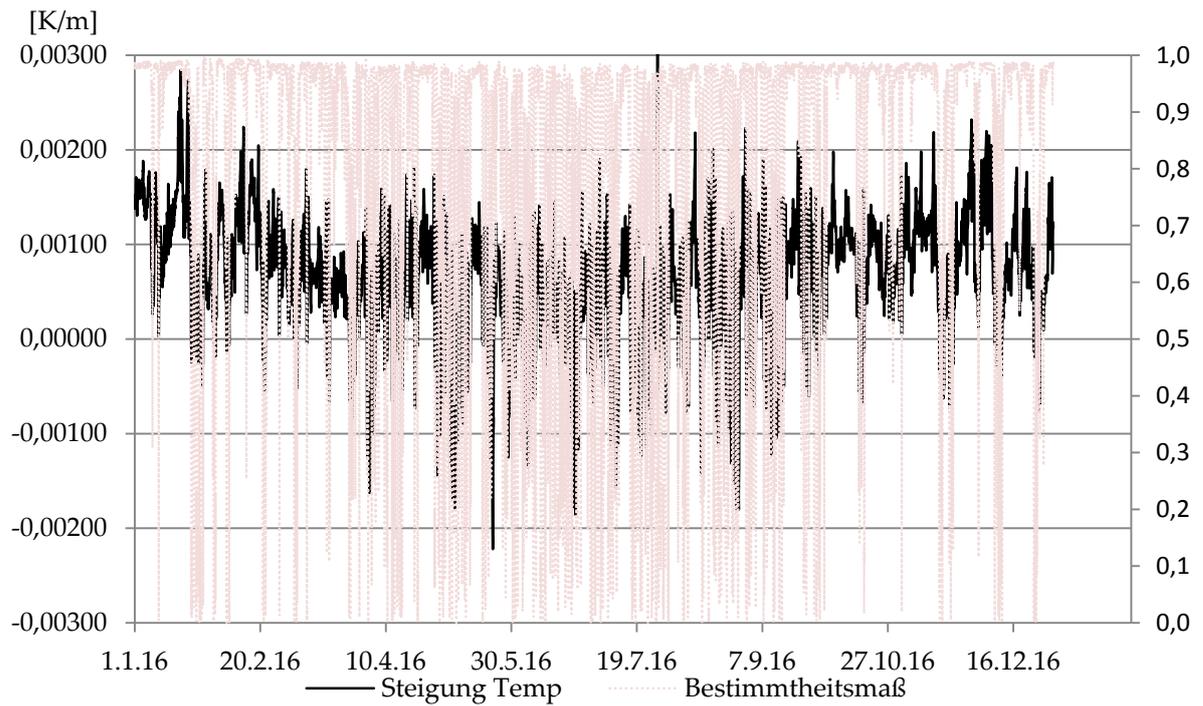


Abbildung C. 117: Steigung der Temperaturgradienten Nord im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

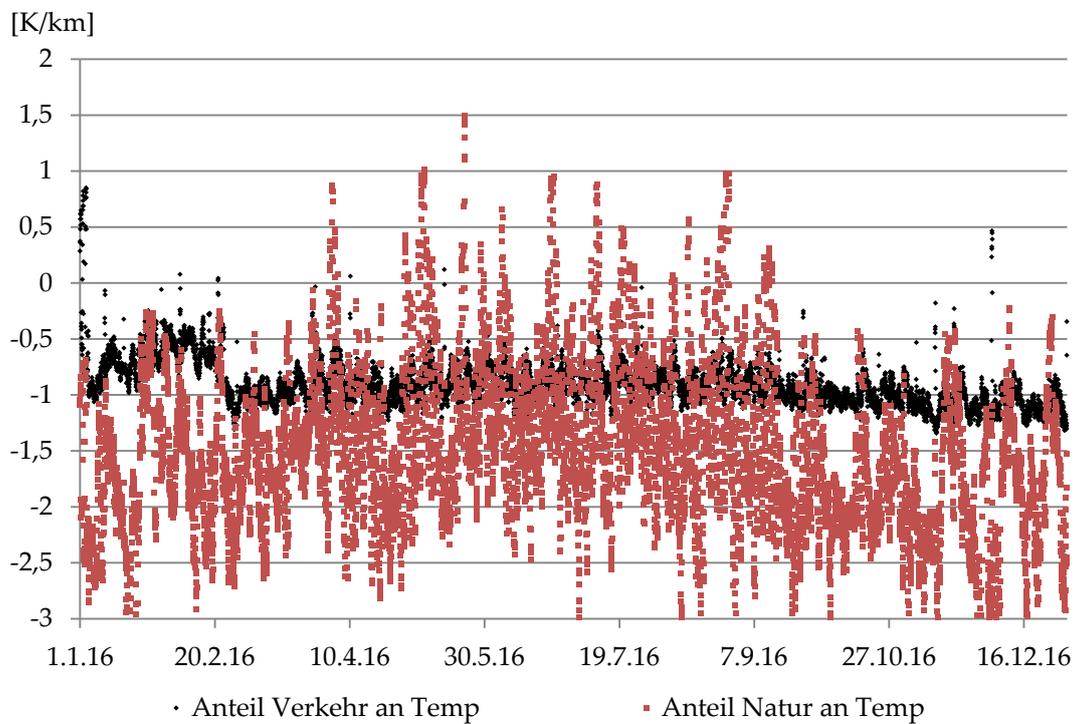
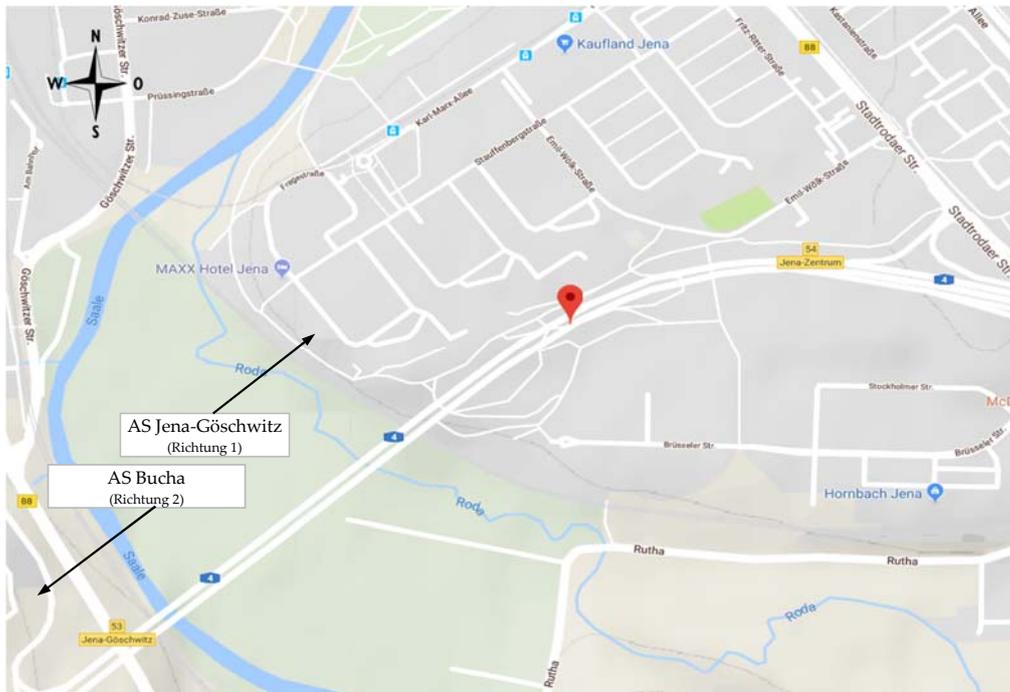


Abbildung C. 118: Anteile an Temperaturgradienten getrennt nach Fahrzeugen und sonstigen Einflüssen

## Tunnel Lobdeburg



|                                       |   |                           |                         |
|---------------------------------------|---|---------------------------|-------------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Thüringen   | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 2                       |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | A4  | <u>Länge i.M.:</u>        | 600 m                   |
| <u>Gradiente:</u>                     | 0%  | <u>Überdeckung:</u>       | 10 m                    |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | 59031<br><small>(Daten von Jagdberg übernommen)</small> | <u>Luftquerschnitt</u>    | 122 m <sup>2</sup>      |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | ja  |                           | 29.08.2016 - 31.01.2017 |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja  |                           | 29.08.2016 - 31.01.2017 |



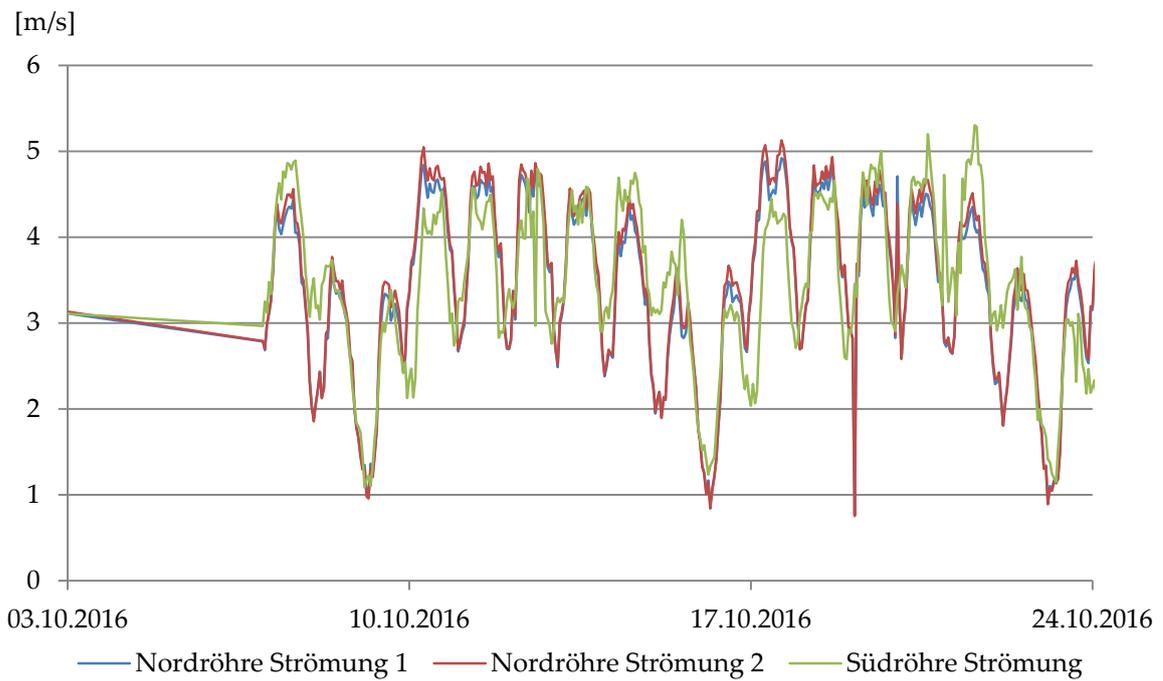


Abbildung C. 119: Tunnelluftströmung Nord- und Südröhre

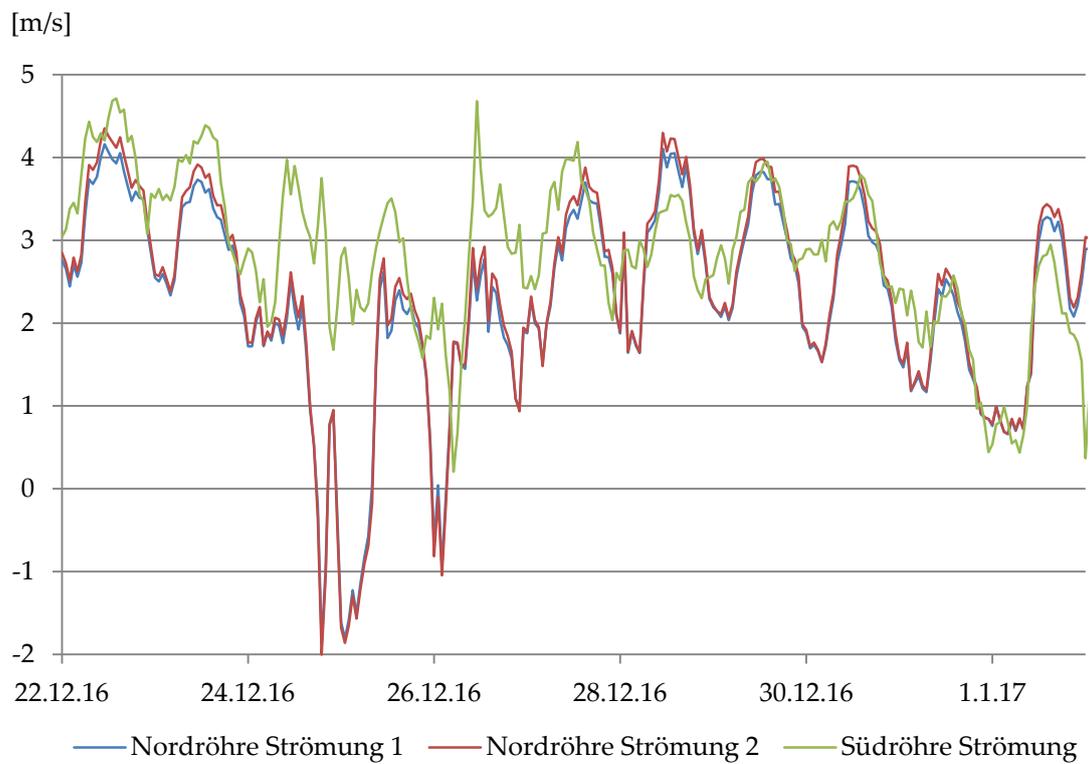


Abbildung C. 120: Tunnelluftströmung Nord- und Südröhre über Weihnachten

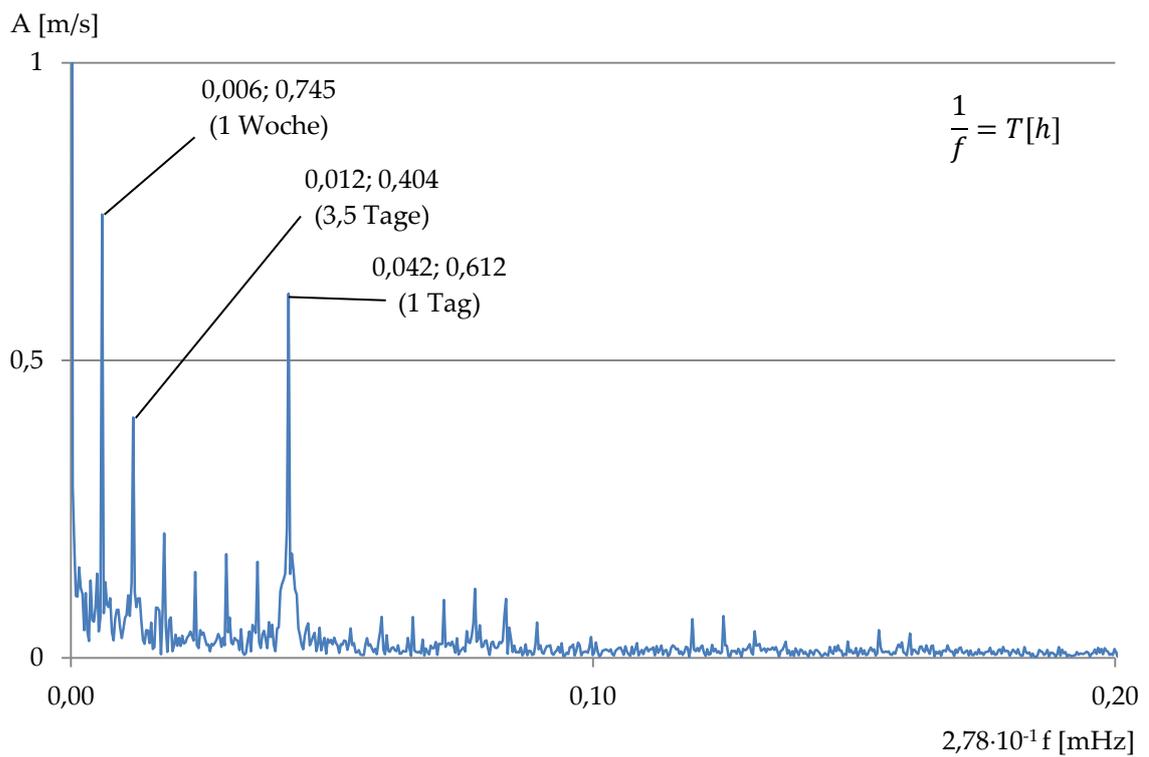


Abbildung C. 121: FFT - Strömung Nordröhre

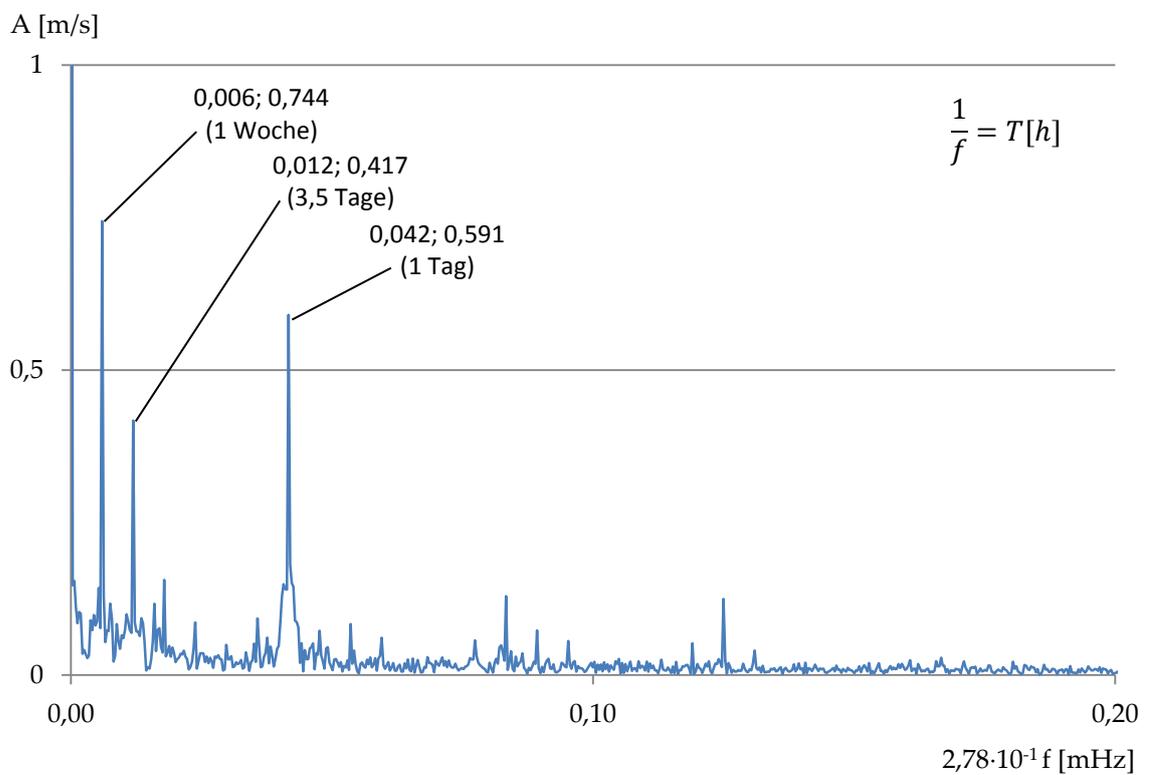


Abbildung C. 122: FFT - Strömung Südröhre

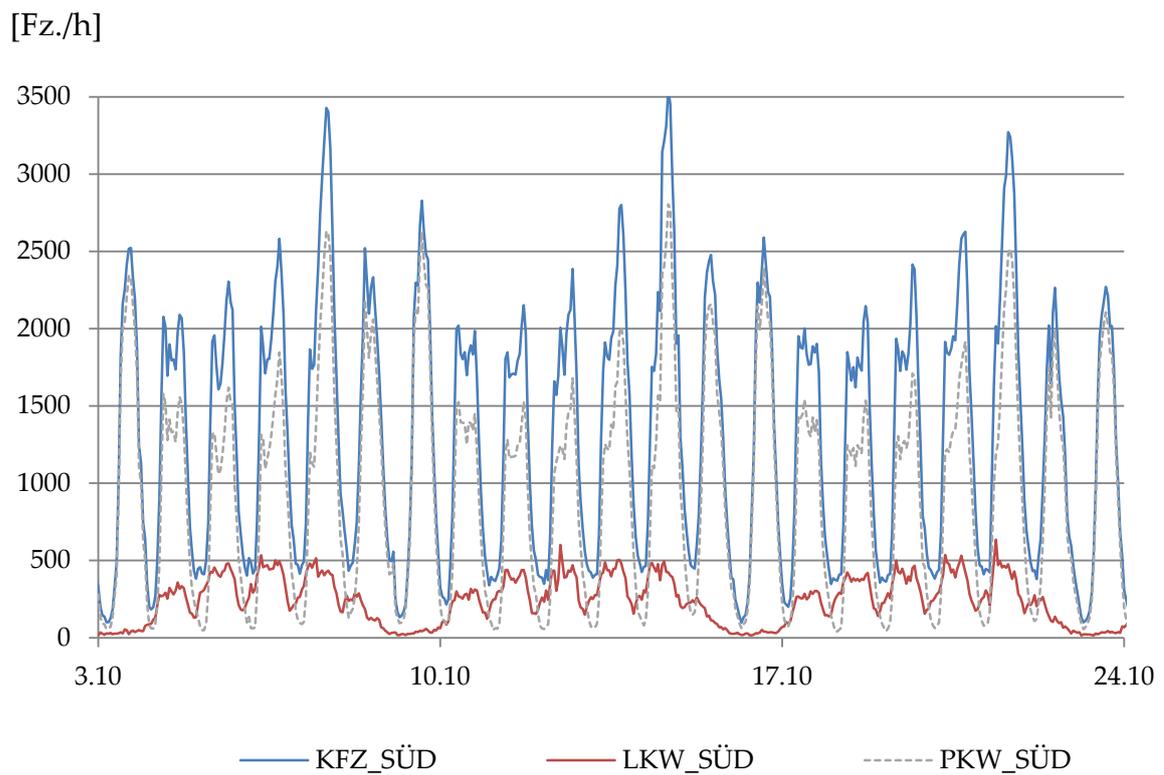


Abbildung C. 123: Verkehrsdaten Südröhre (Messdaten Jagdbergtunnel)

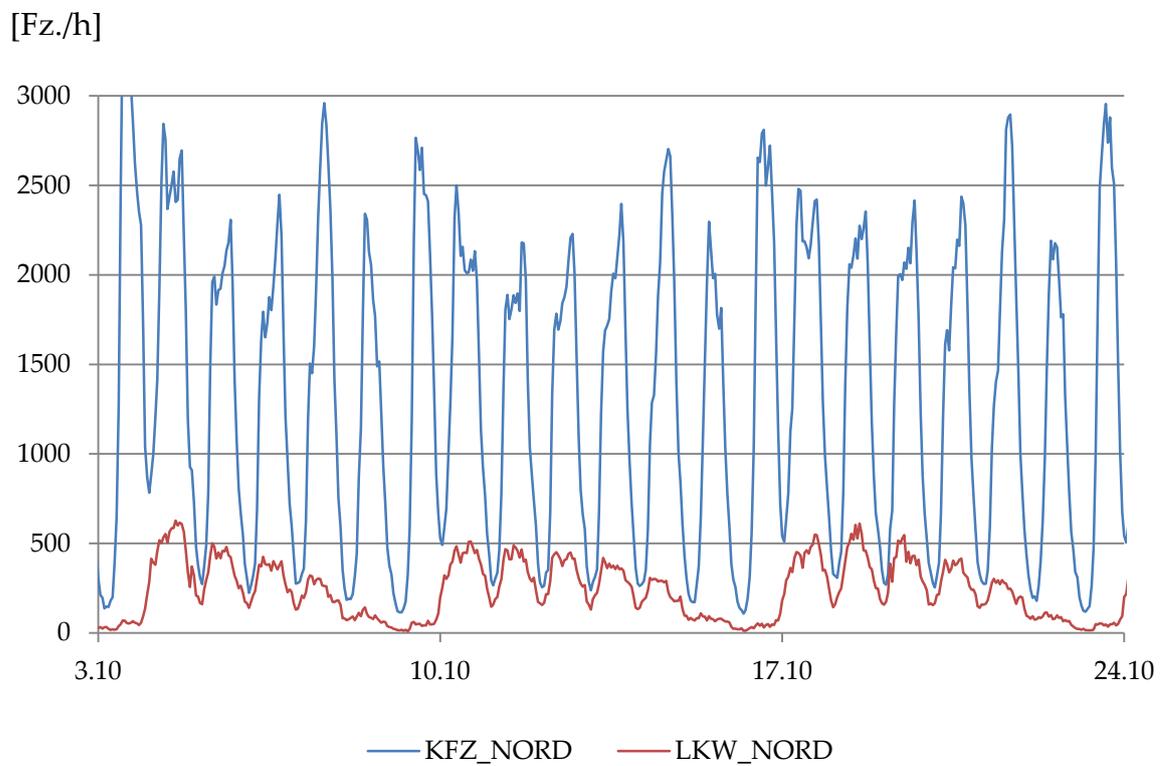


Abbildung C. 124: Verkehrsdaten Nordröhre (Messdaten Jagdbergtunnel)

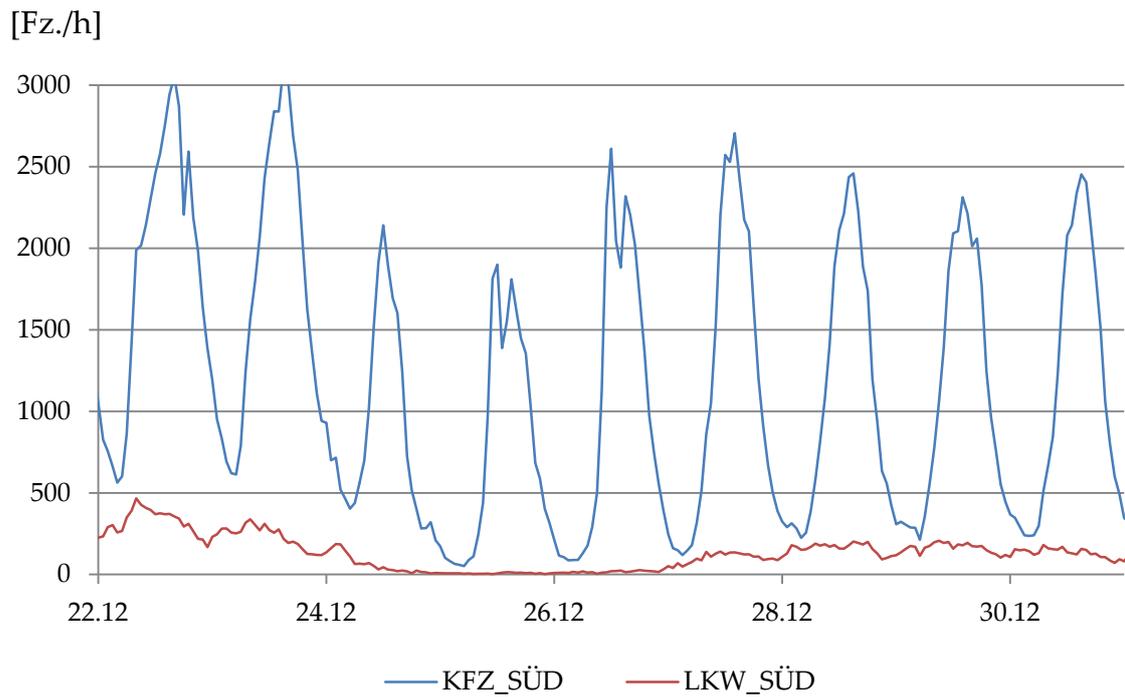


Abbildung C. 125: Verkehr über Weihnachten Südröhre (Messdaten Jagdbergtunnel)

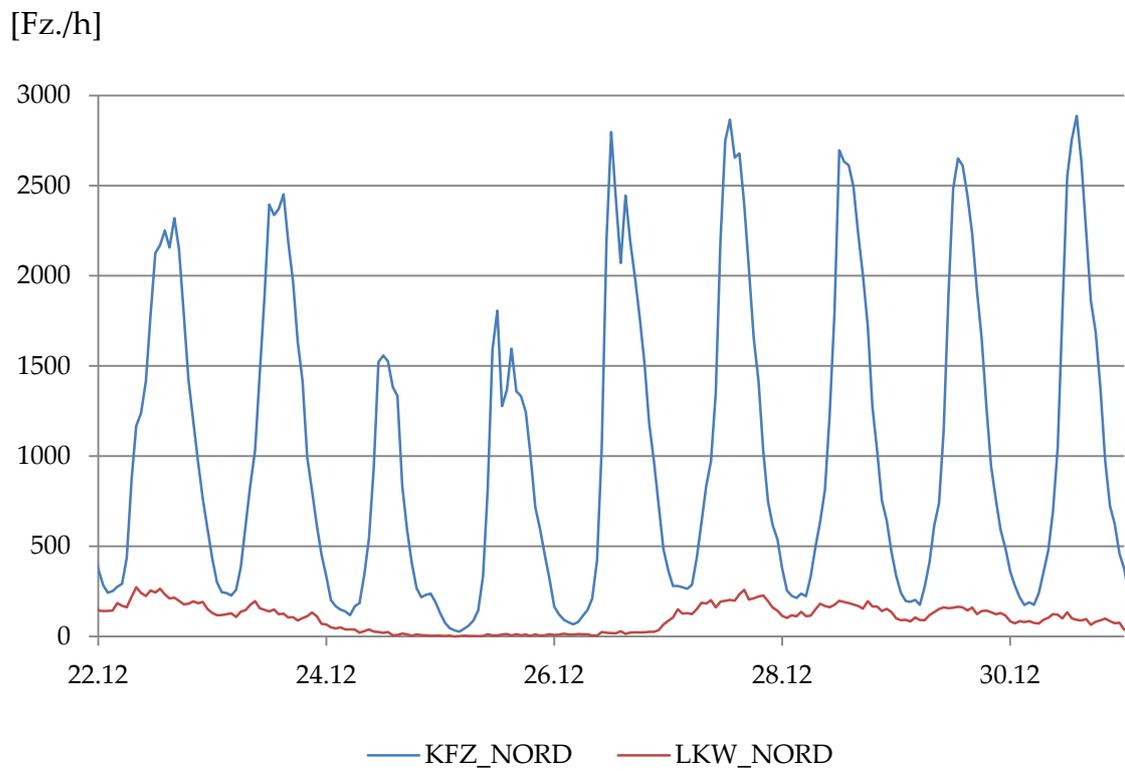


Abbildung C. 126: Verkehr über Weihnachten Nordröhre (Messdaten Jagdbergtunnel)

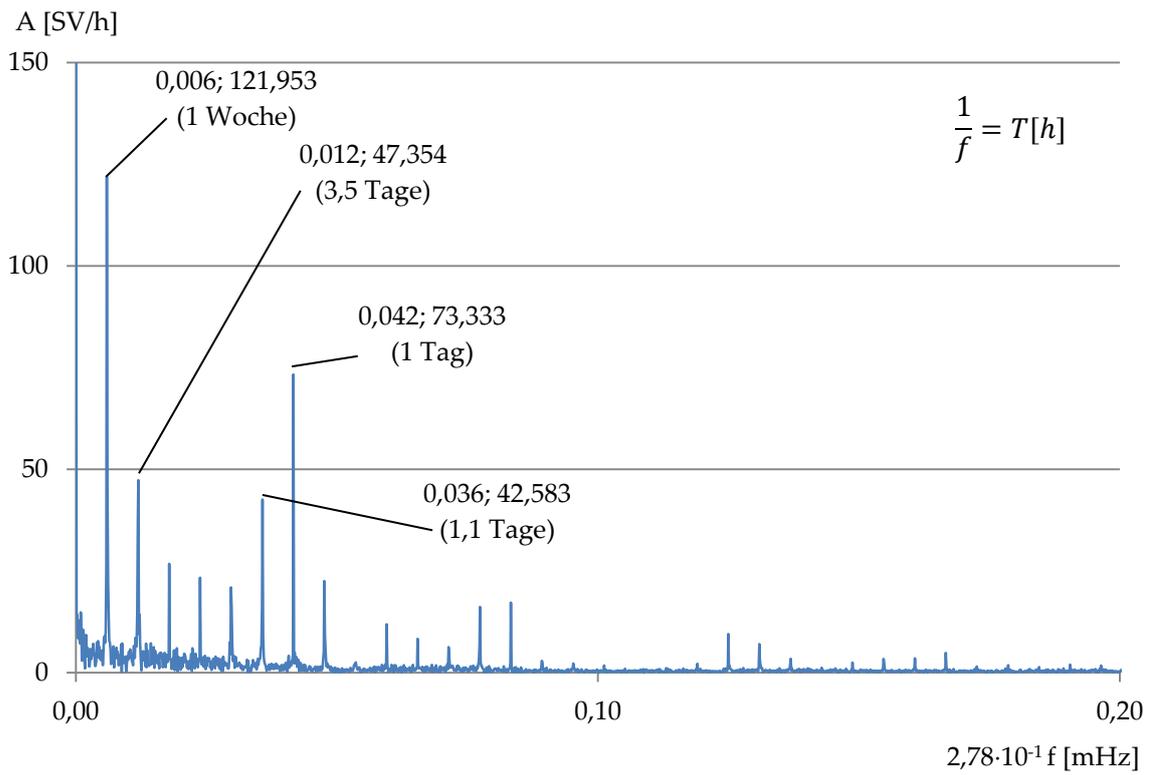


Abbildung C. 127: FFT - Schwerverkehr Nordröhre (Messdaten Jagdbergtunnel)

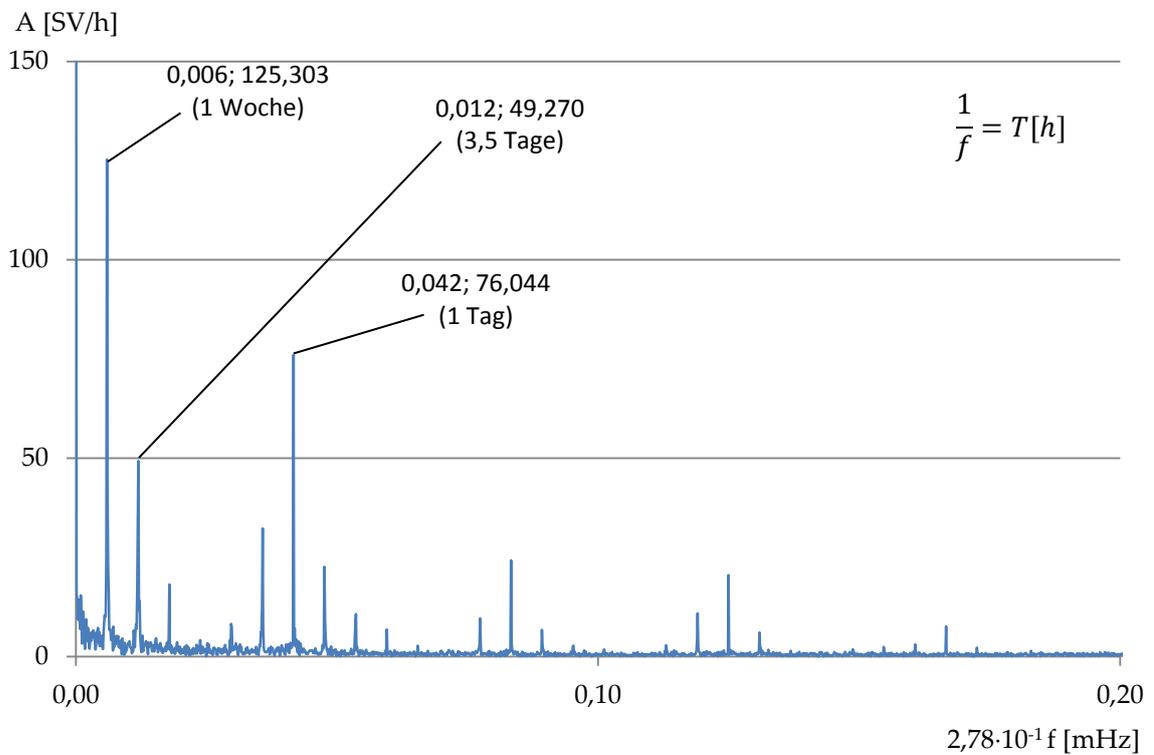


Abbildung C. 128: FFT - Schwerverkehr Südröhre (Messdaten Jagdbergtunnel)

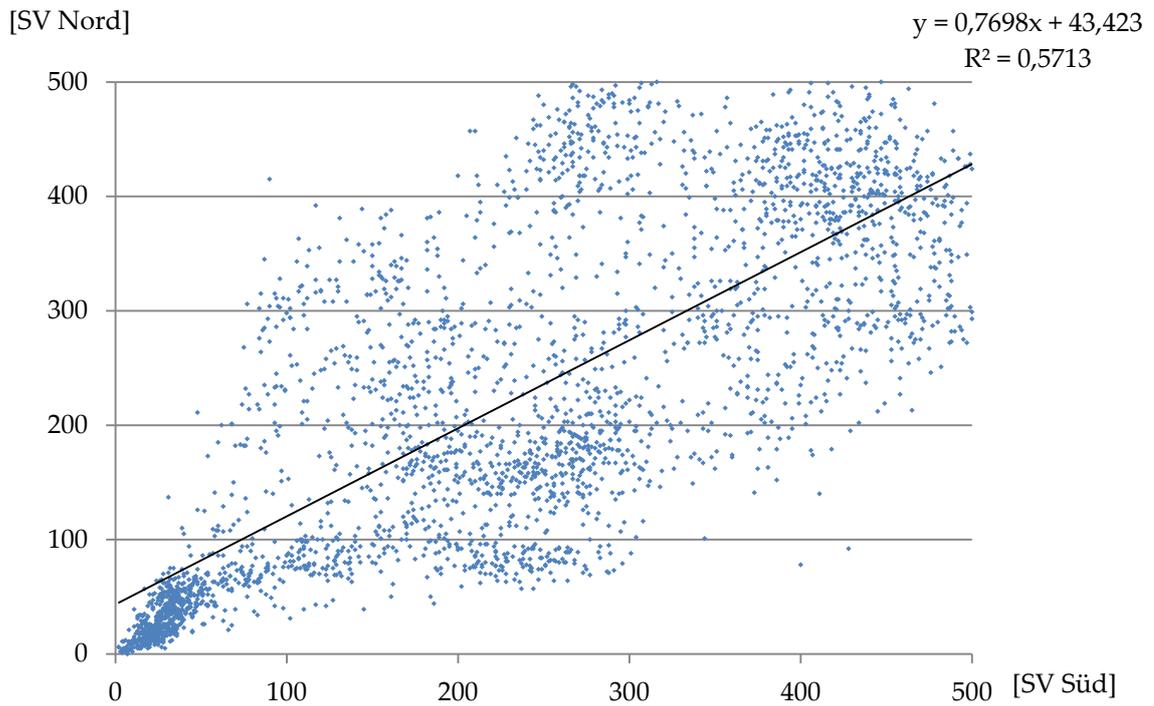


Abbildung C. 129: Korrelation Schwerverkehr Südröhre gegen Nordröhre  
(Messdaten Jagdbergtunnel)

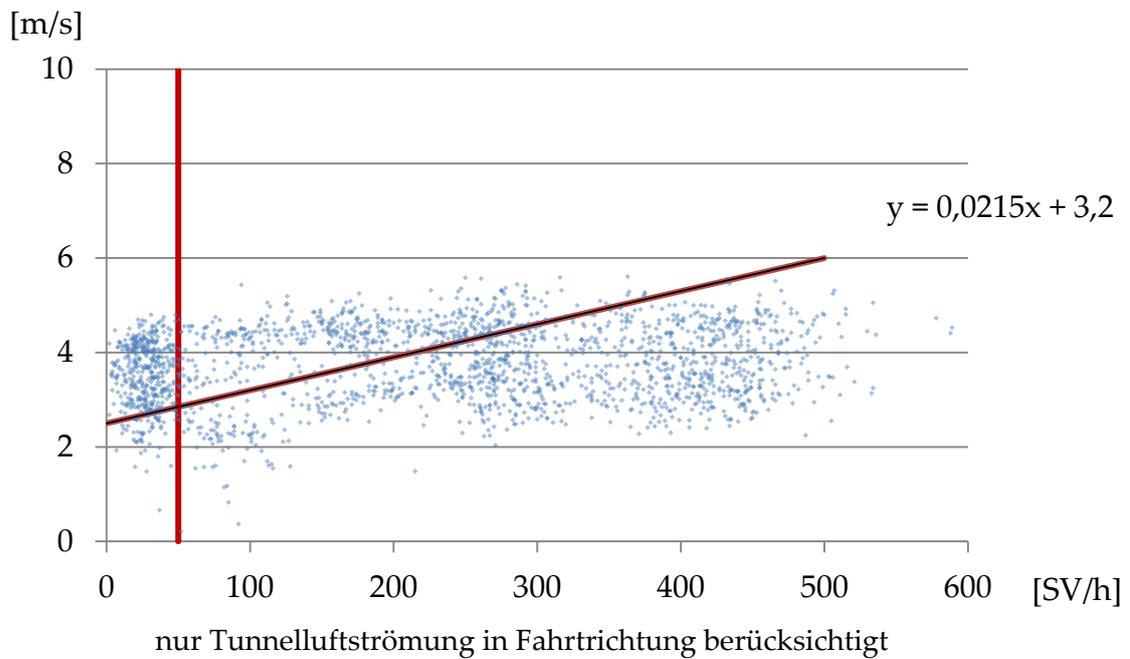


Abbildung C. 130: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Süd,  
ohne Berücksichtigung der Wochenenden

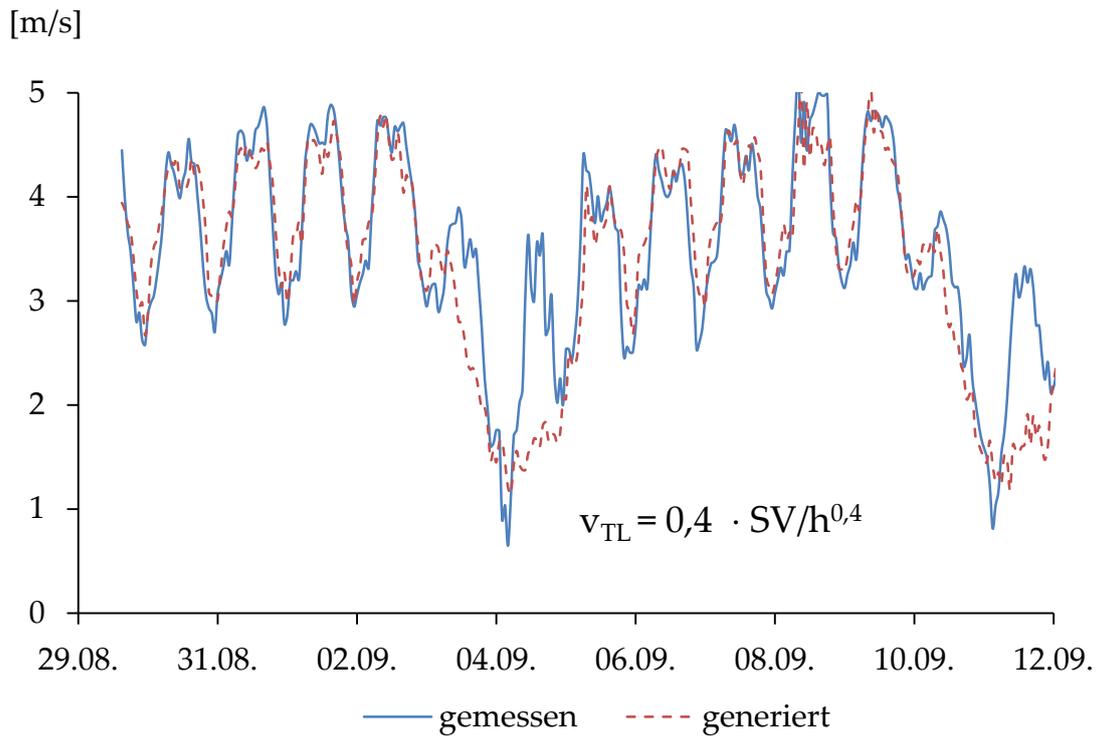


Abbildung C. 131: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Südöhre

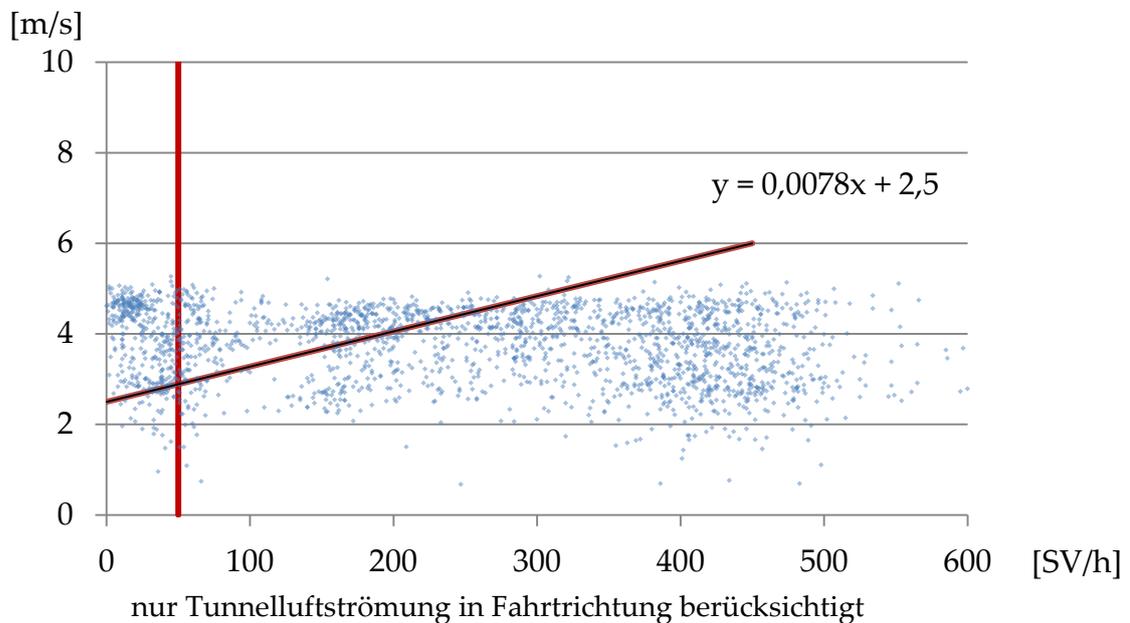


Abbildung C. 132: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Nord, ohne Berücksichtigung der Wochenenden



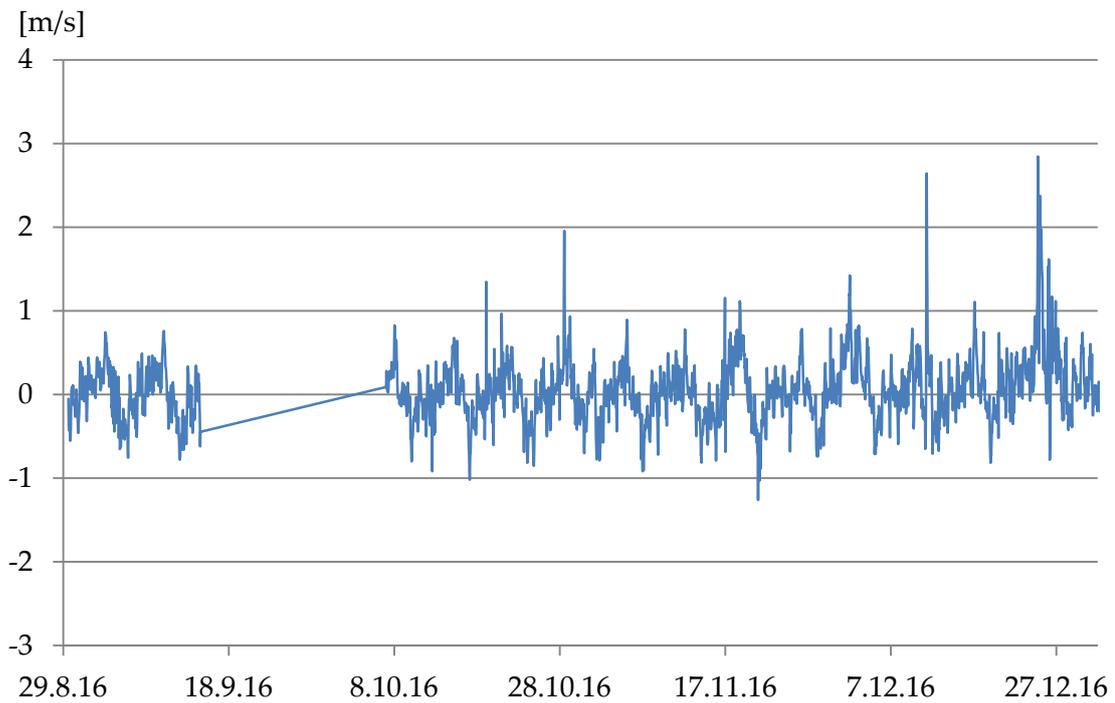


Abbildung C. 135: Grundströmung

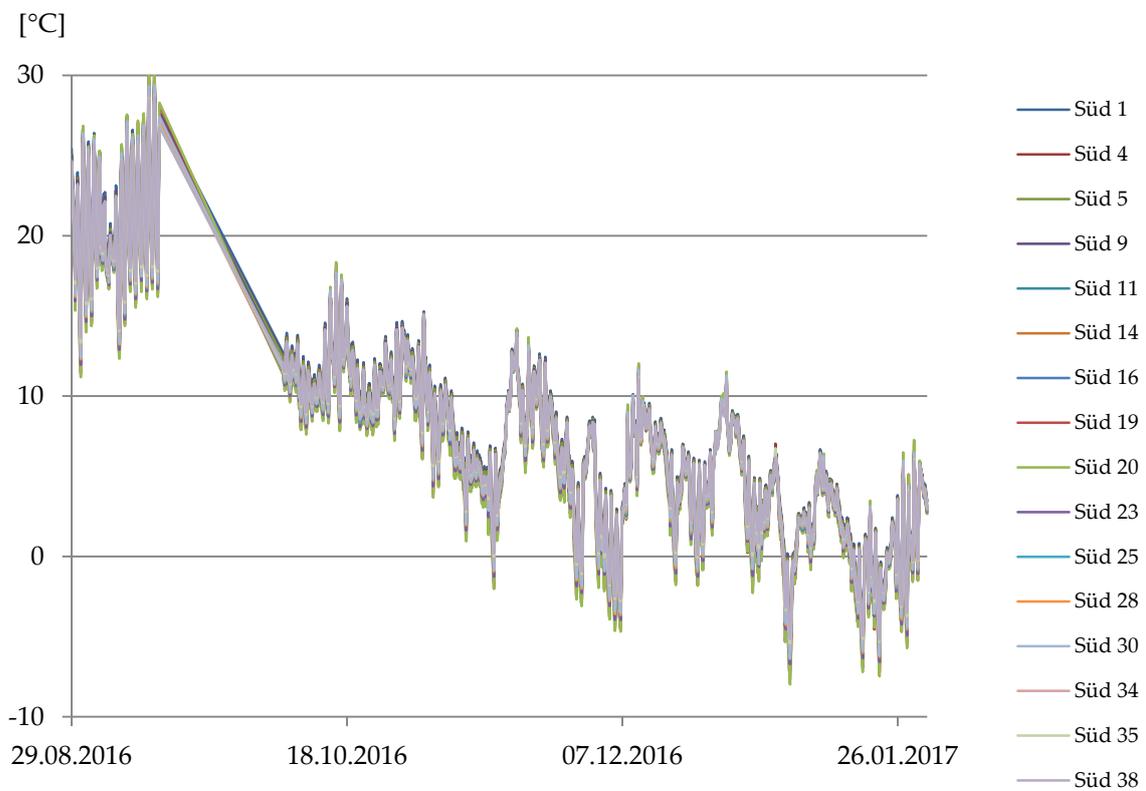


Abbildung C. 136: Tunnellufttemperatur Süd im Jahresgang

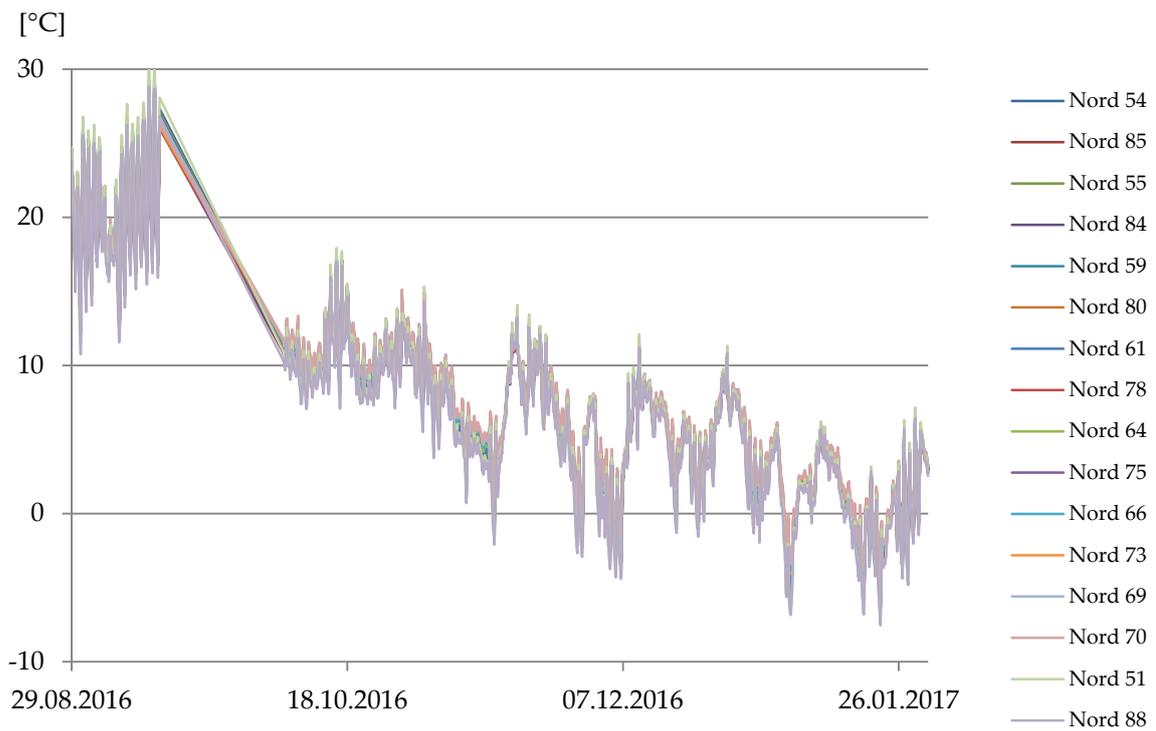


Abbildung C. 137: Tunnellufttemperatur Nordröhre im Jahresgang

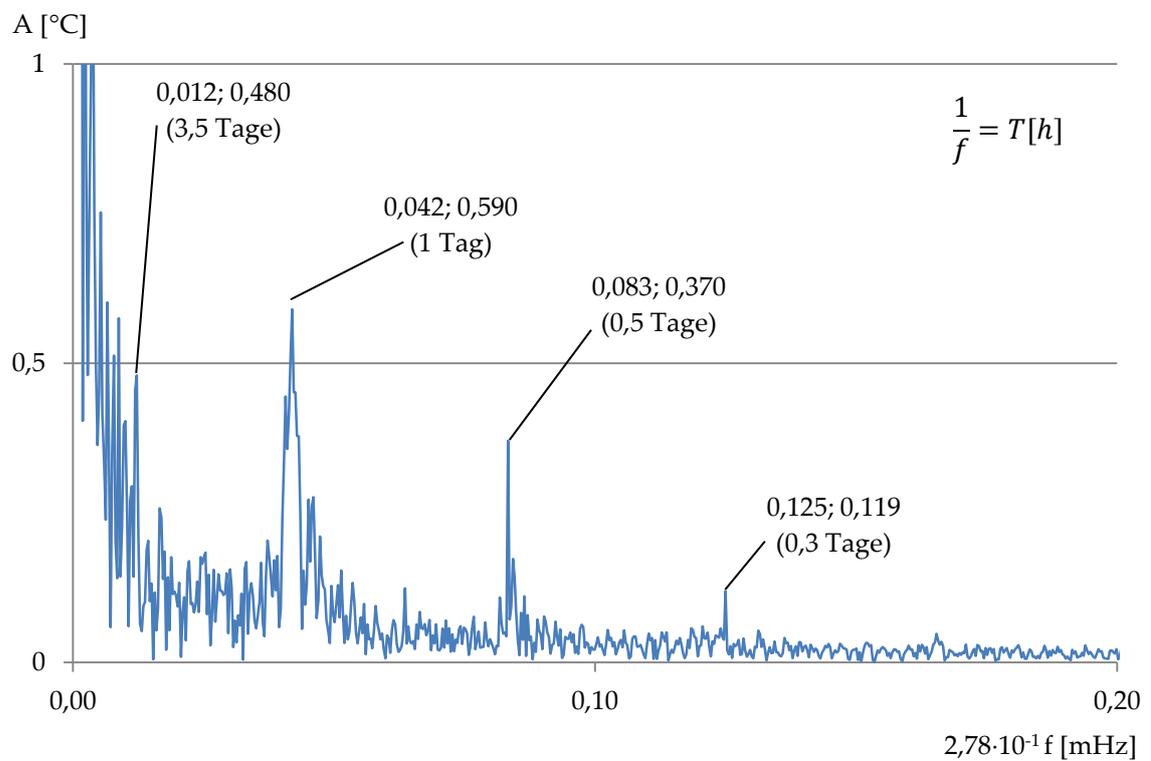


Abbildung C. 138: FFT - Tunnellufttemperatur Nordröhre

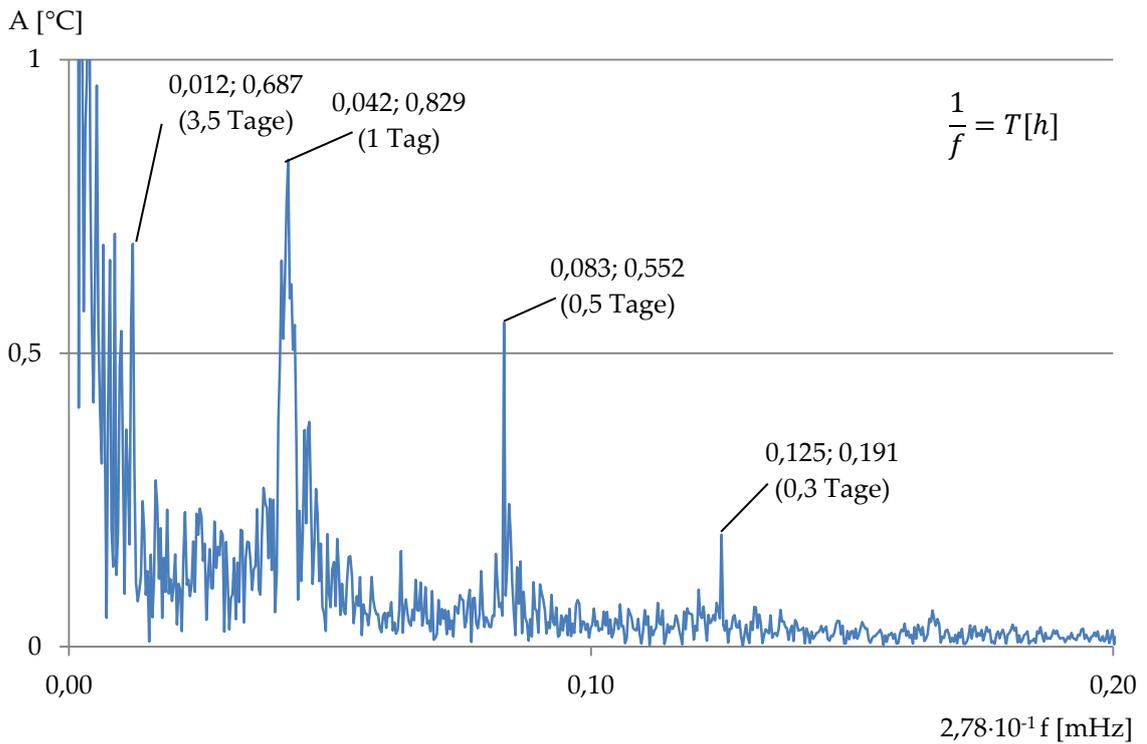


Abbildung C. 139: FFT - Tunnellufttemperatur Südröhre

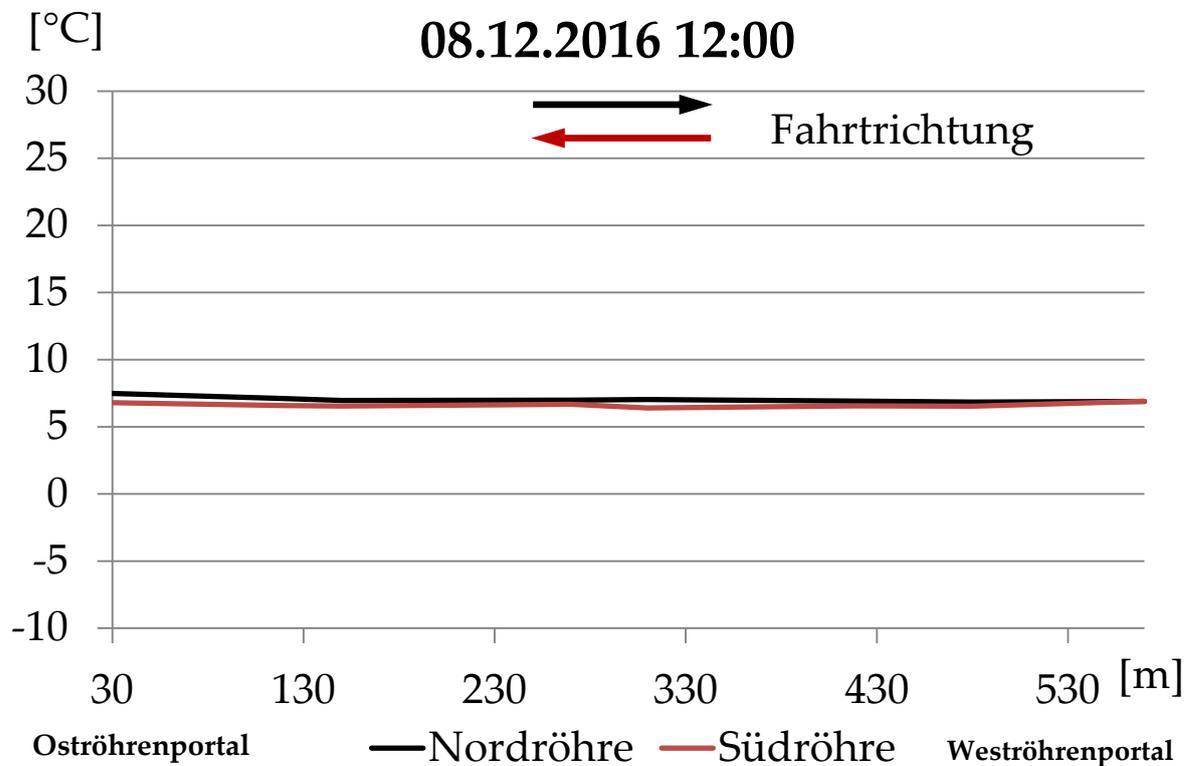


Abbildung C. 140: Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse, exemplarisch

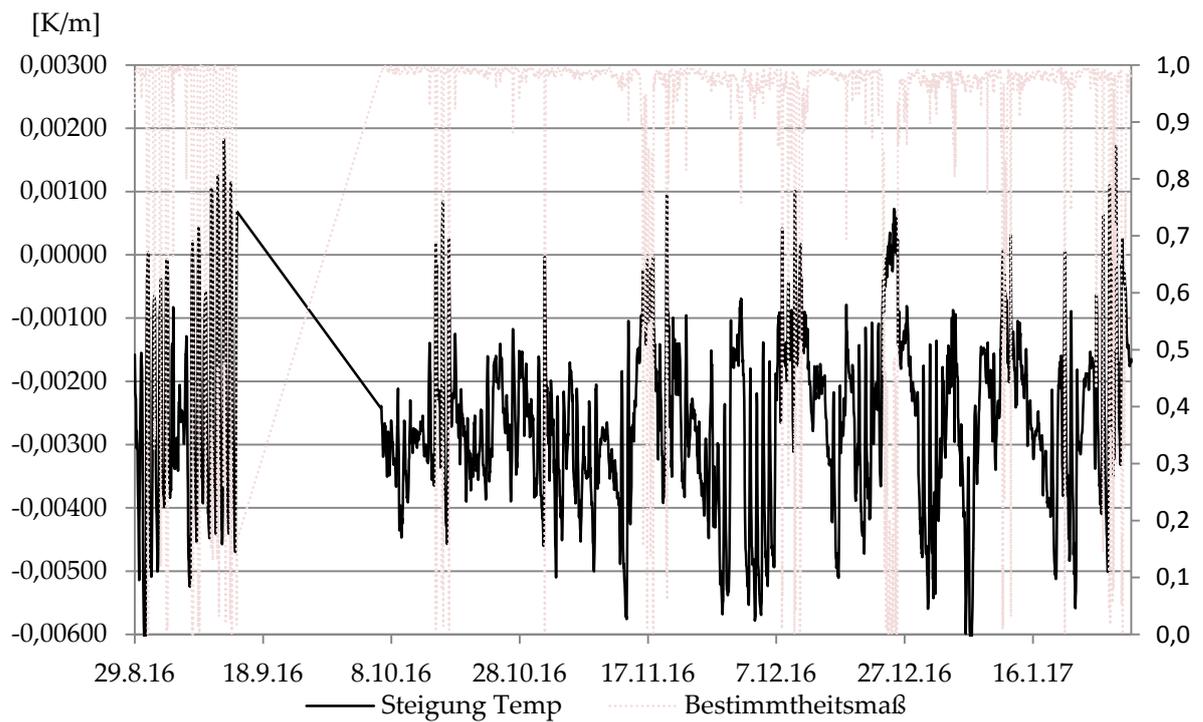


Abbildung C. 141: Steigung der Temperaturgradienten Süd im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $r^2$  der linearen Regression

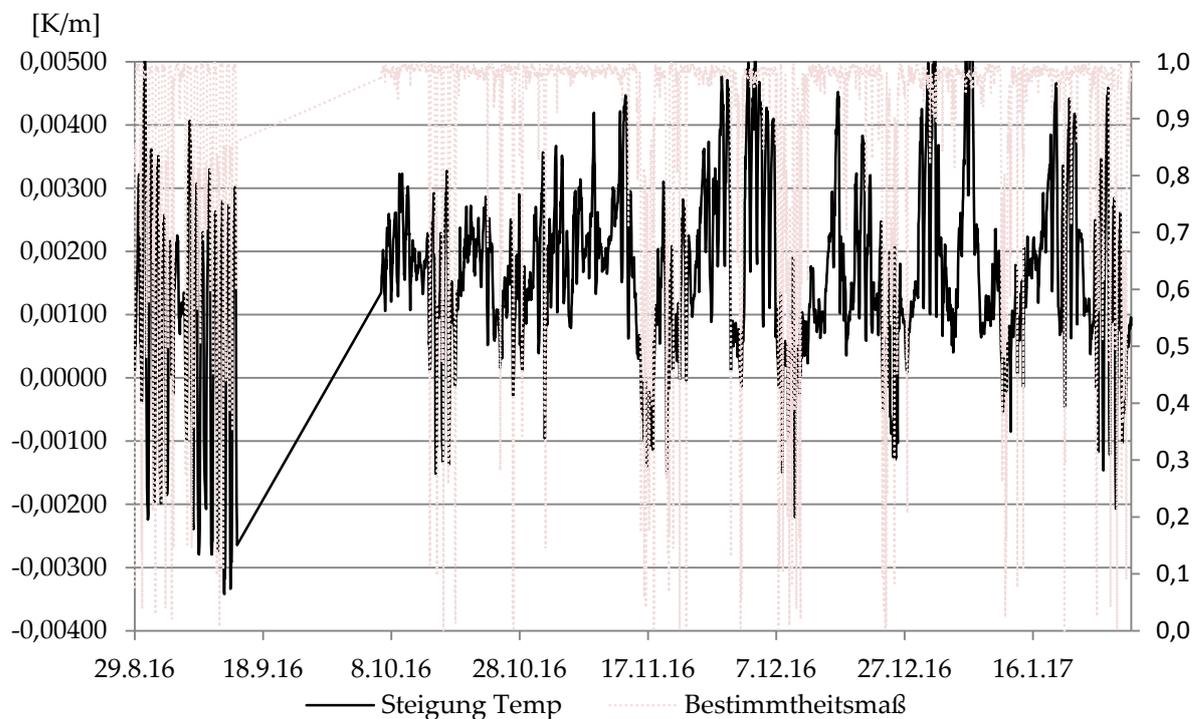


Abbildung C. 142: Steigung der Temperaturgradienten Nord im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $r^2$  der linearen Regression

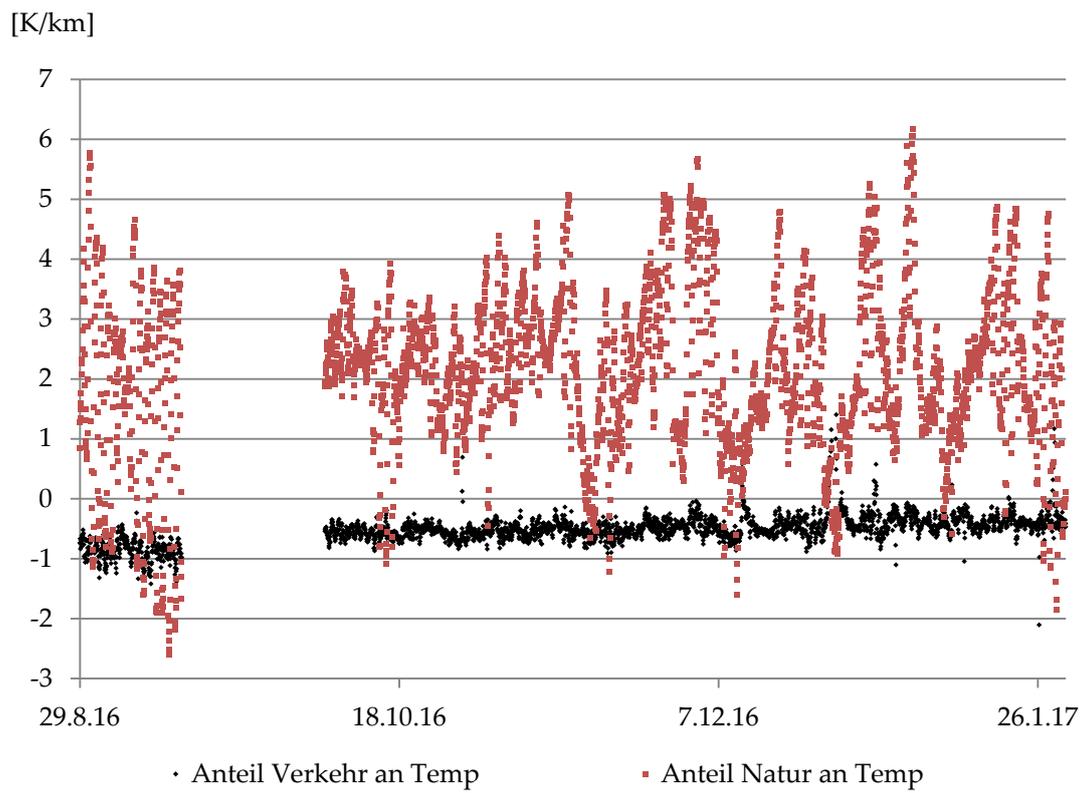


Abbildung C. 143: Anteile Temperaturgradienten getrennt nach Fahrzeugen und sonstigen Einflüssen

## Tunnel Pörzberg



|                                       |           |                           |                         |
|---------------------------------------|-----------|---------------------------|-------------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Thüringen | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 1                       |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | B90       | <u>Länge i.M.:</u>        | 1145 m                  |
| <u>Gradiente:</u>                     | 0         | <u>Überdeckung:</u>       | 85 m                    |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | -         | <u>Luftquerschnitt</u>    | 0 m <sup>2</sup>        |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | ja        |                           | 01.01.2016 - 31.01.2017 |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja        |                           | 01.01.2016 - 31.01.2017 |



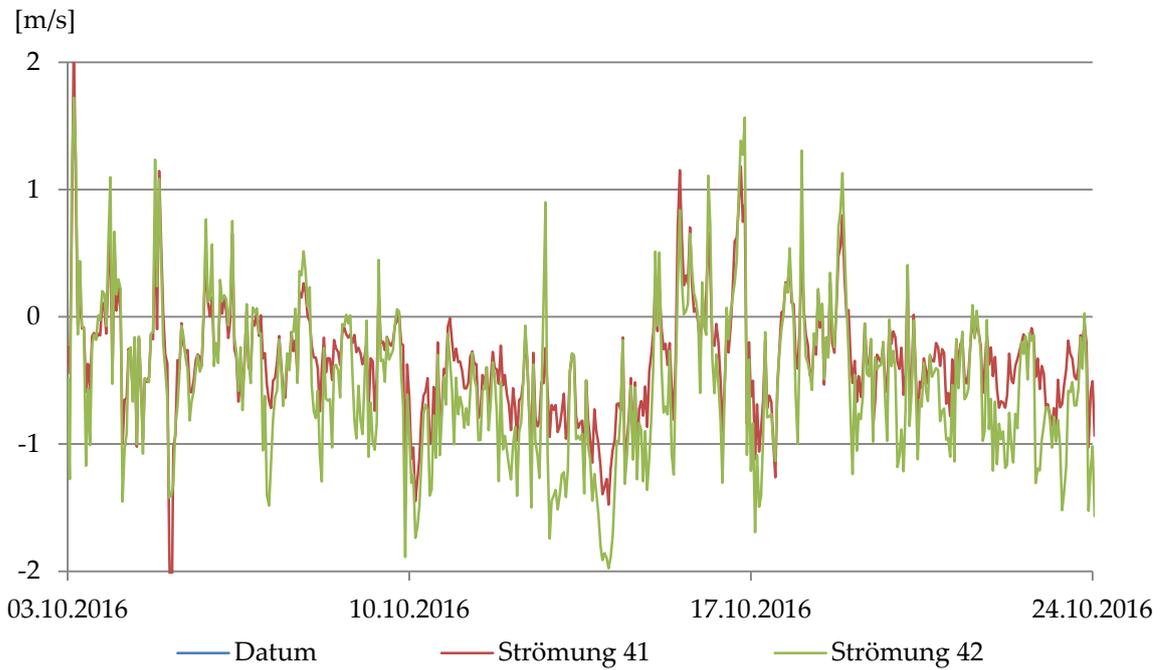


Abbildung C. 144: Tunnelluftströmung

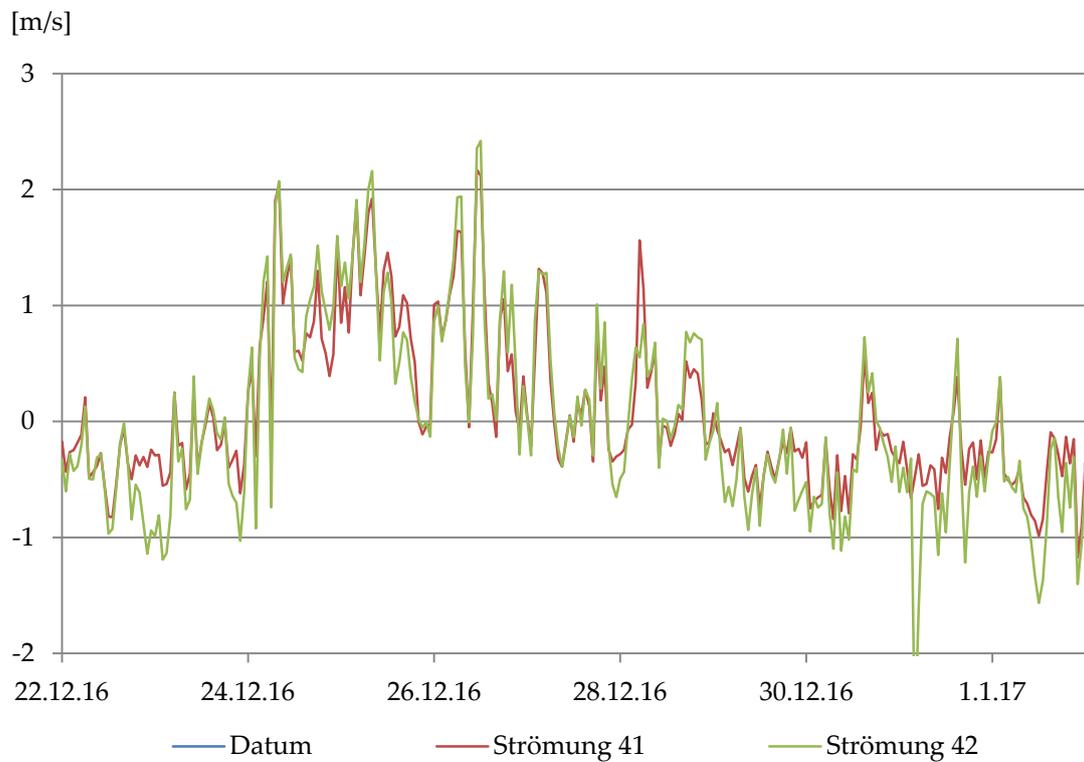


Abbildung C. 145: Tunnelluftströmung über Weihnachten

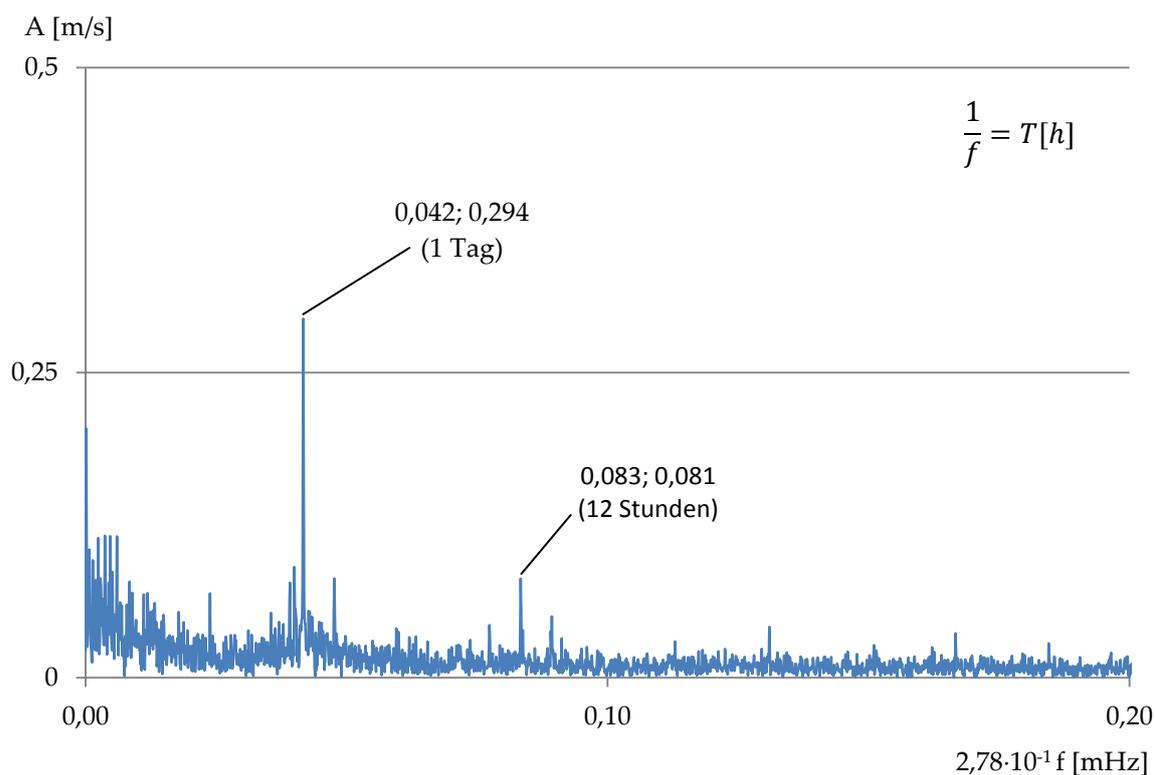


Abbildung C. 146: FFT - Tunnelluftströmung

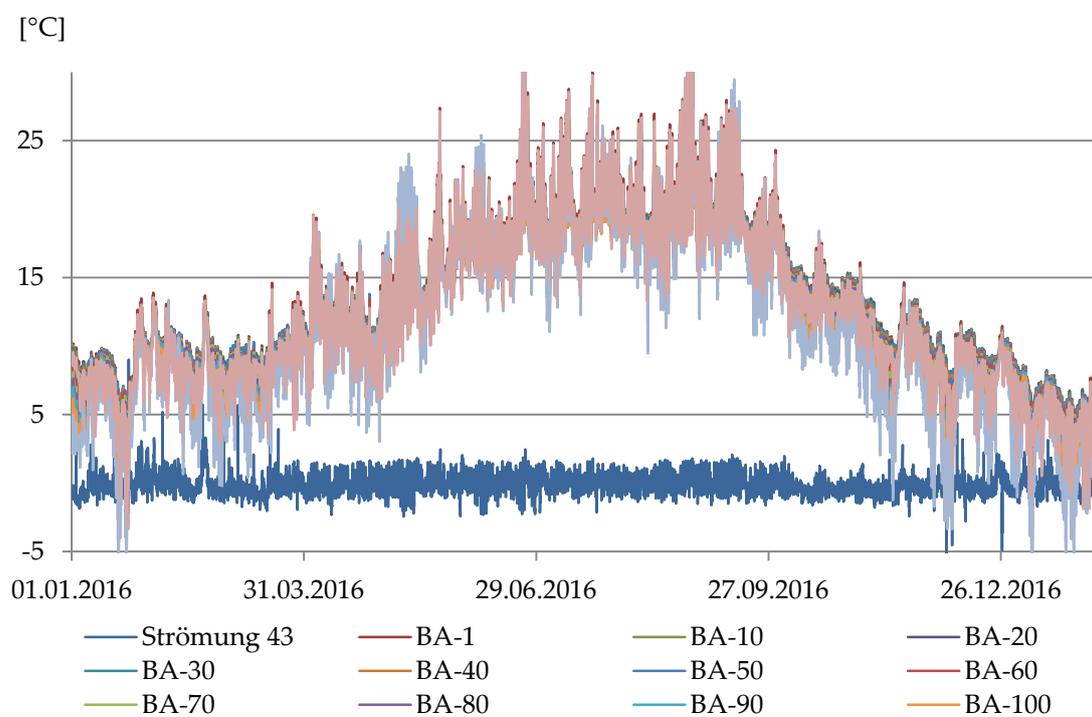


Abbildung C. 147: Tunnellufttemperatur im Jahresgang

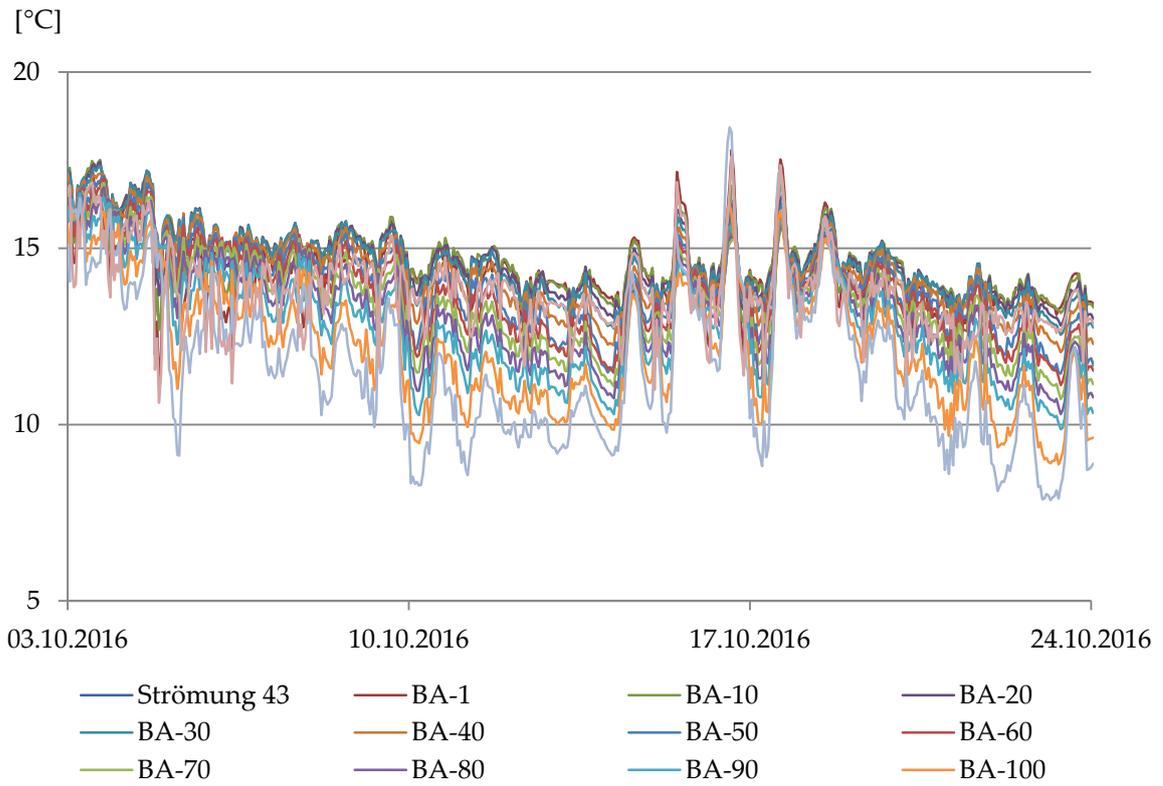


Abbildung C. 148: Tunnellufttemperatur im Wochengang

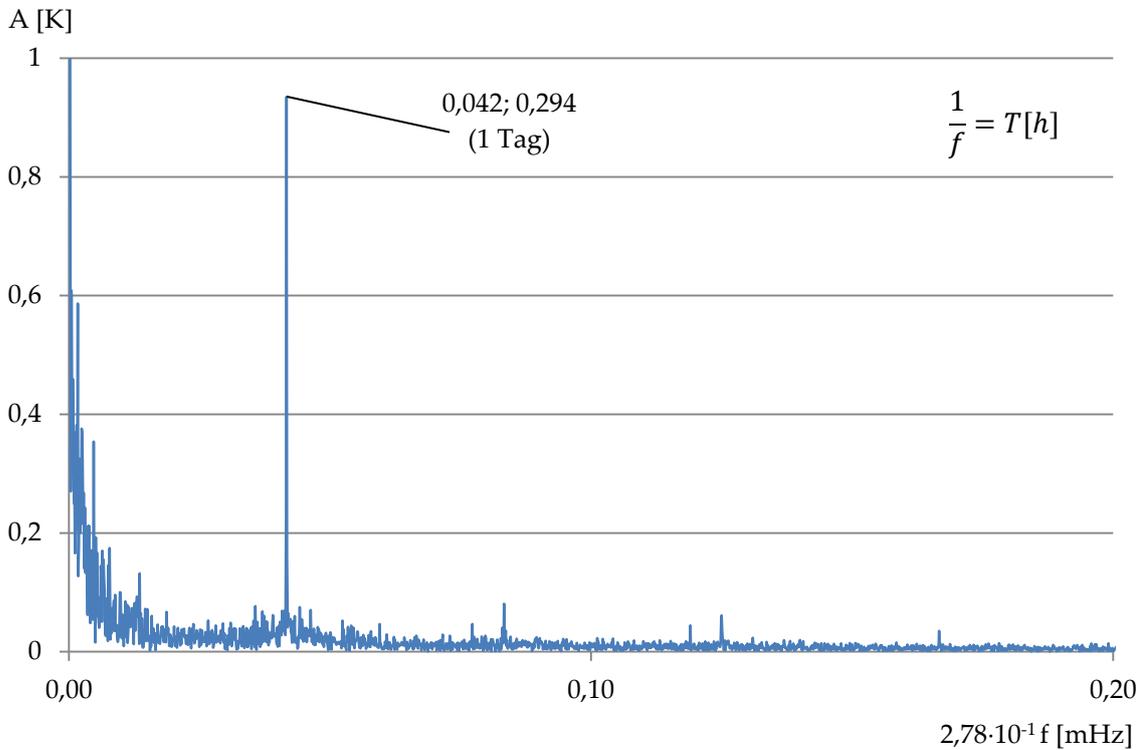


Abbildung C. 149: FFT - Tunnellufttemperatur

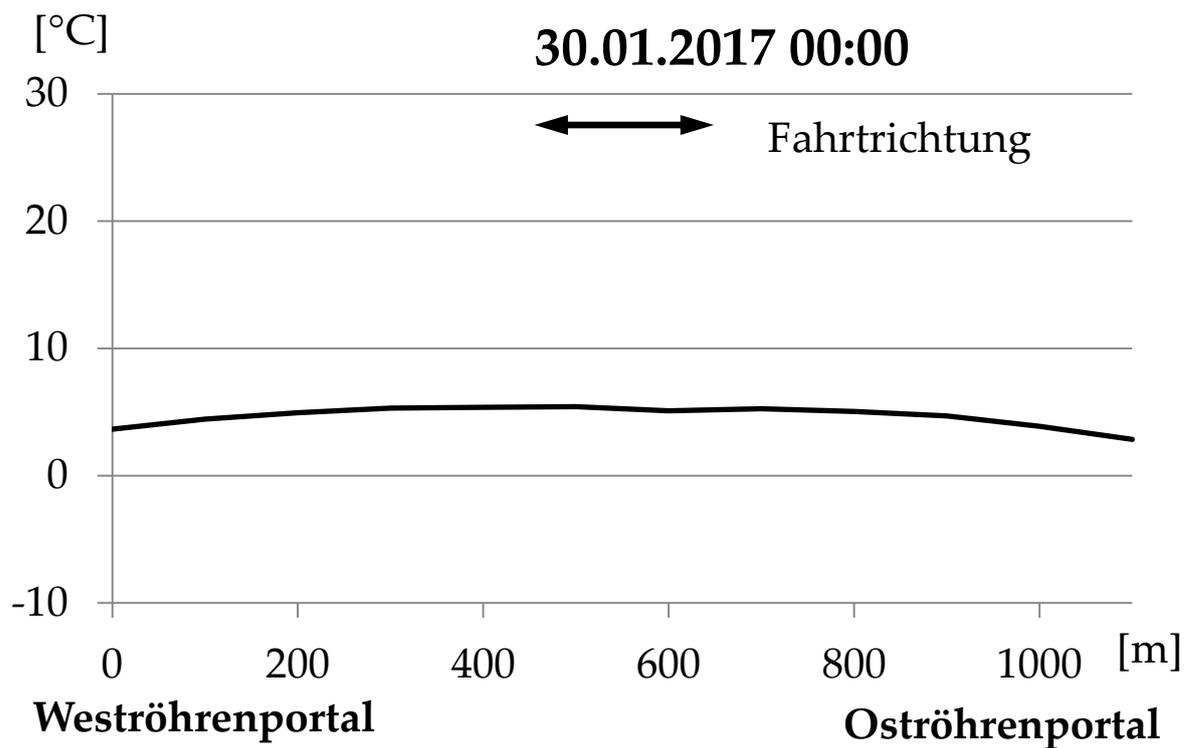


Abbildung C. 150: Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse, exemplarisch

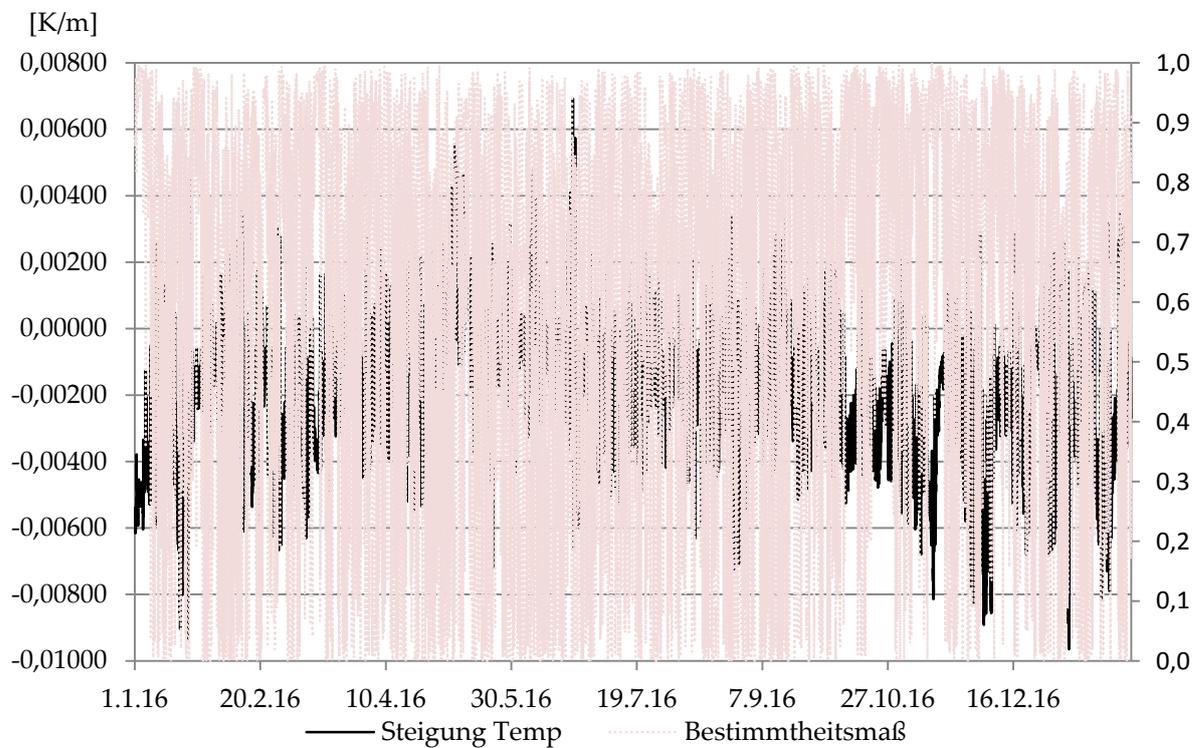
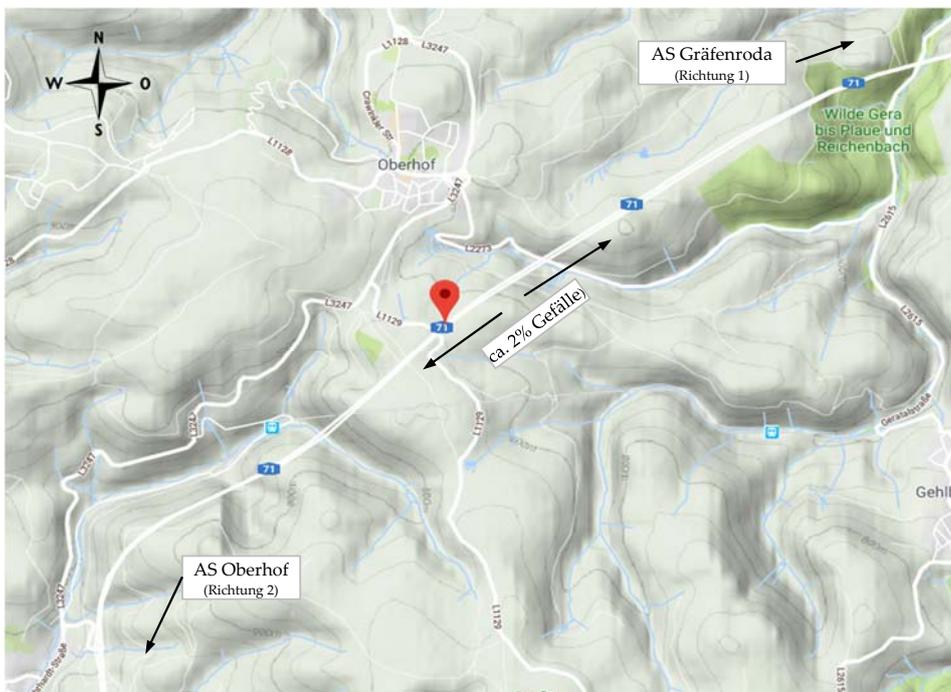


Abbildung C. 151: Steigung der Temperaturgradienten im Jahresgang,  
Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

### Tunnel Rennsteig



|                                       |           |                           |                   |
|---------------------------------------|-----------|---------------------------|-------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Thüringen | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 2                 |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | A71       | <u>Länge i.M.:</u>        | 7897 m            |
| <u>Gradiente:</u>                     | ~2% Kuppe | <u>Überdeckung:</u>       | 205 m             |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | 24092     | <u>Luftquerschnitt</u>    | 59 m <sup>2</sup> |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | ja        | 01.01.2016 - 31.01.2017   |                   |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja        | 01.01.2016 - 31.01.2017   |                   |



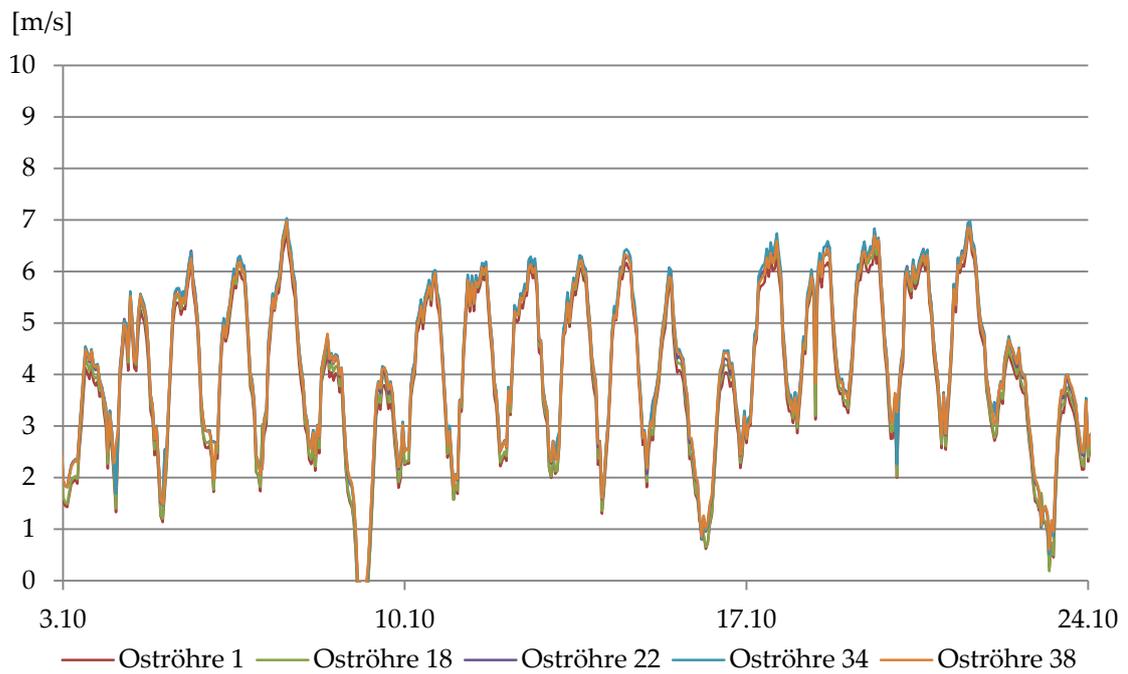


Abbildung C. 152: Tunnelluftströmung Oströhre

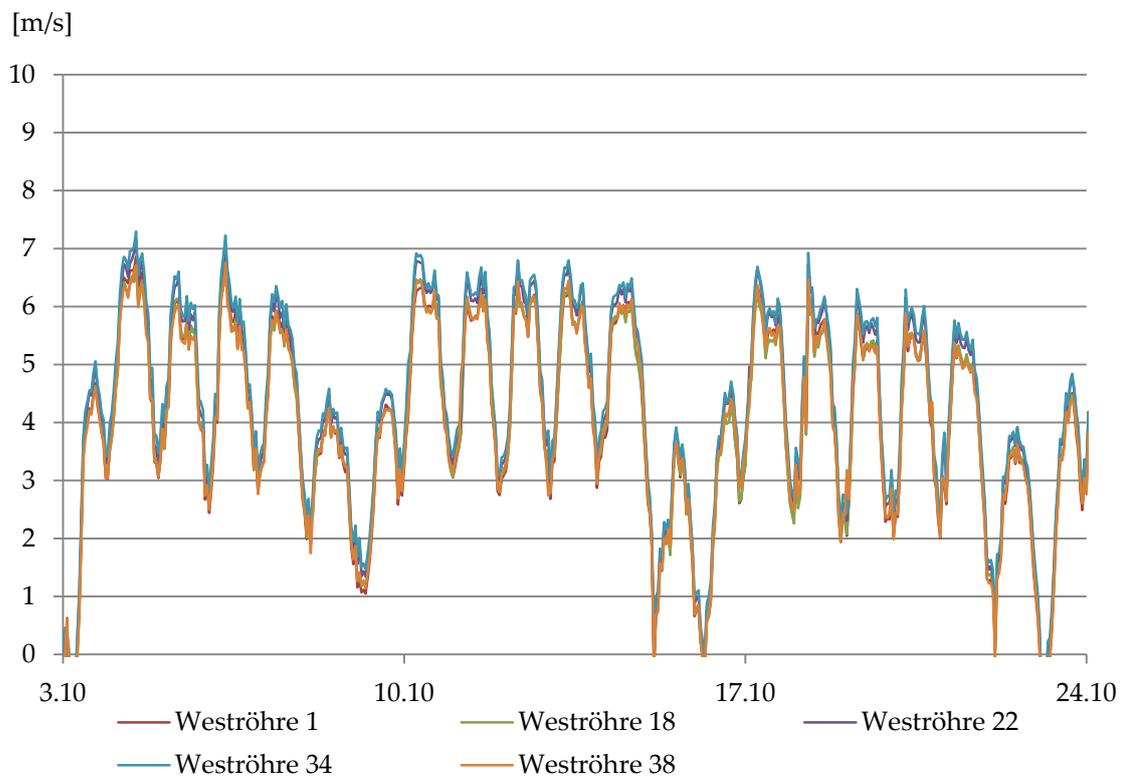


Abbildung C. 153: Tunnelluftströmung Weströhre

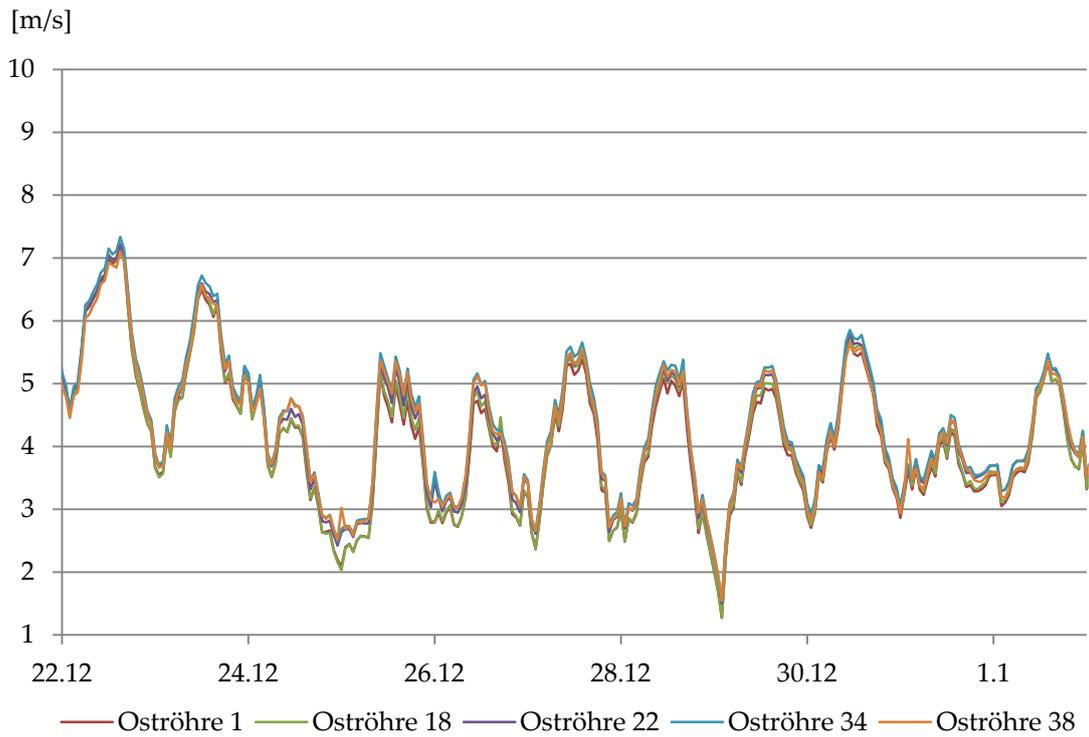


Abbildung C. 154: Tunnelluftströmung Oströhre über Weihnachten

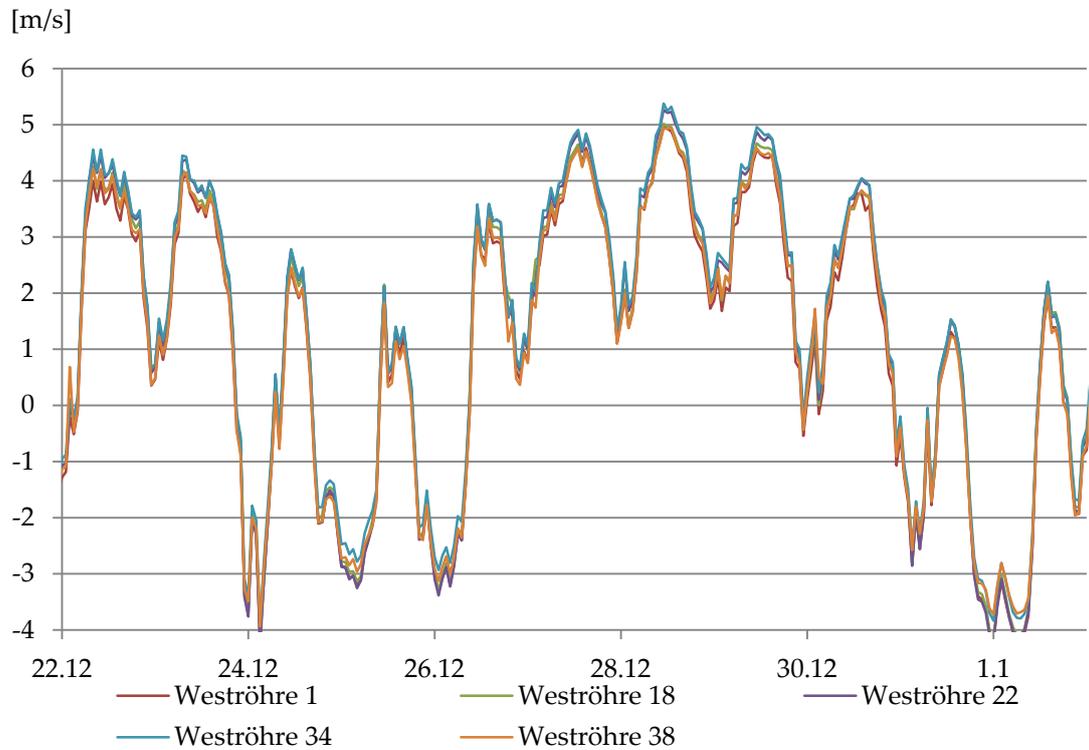


Abbildung C. 155: Tunnelluftströmung Weströhre über Weihnachten

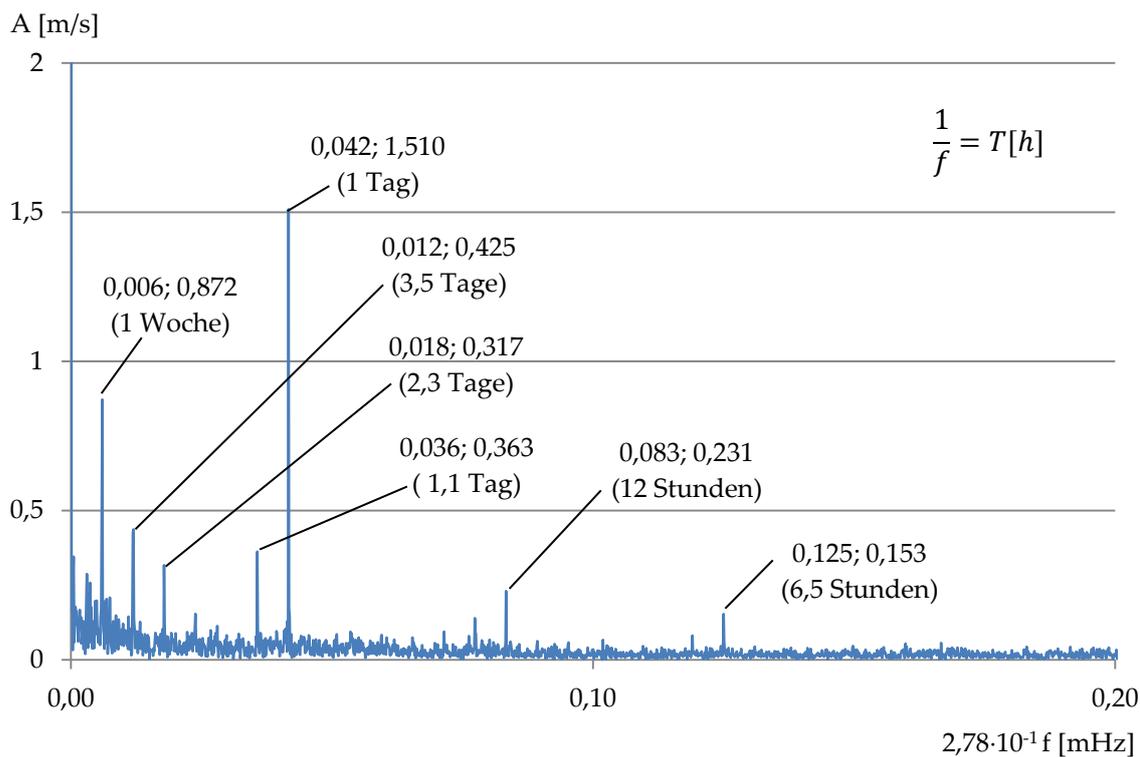


Abbildung C. 156: FFT – Tunnelluftströmung Oströhre

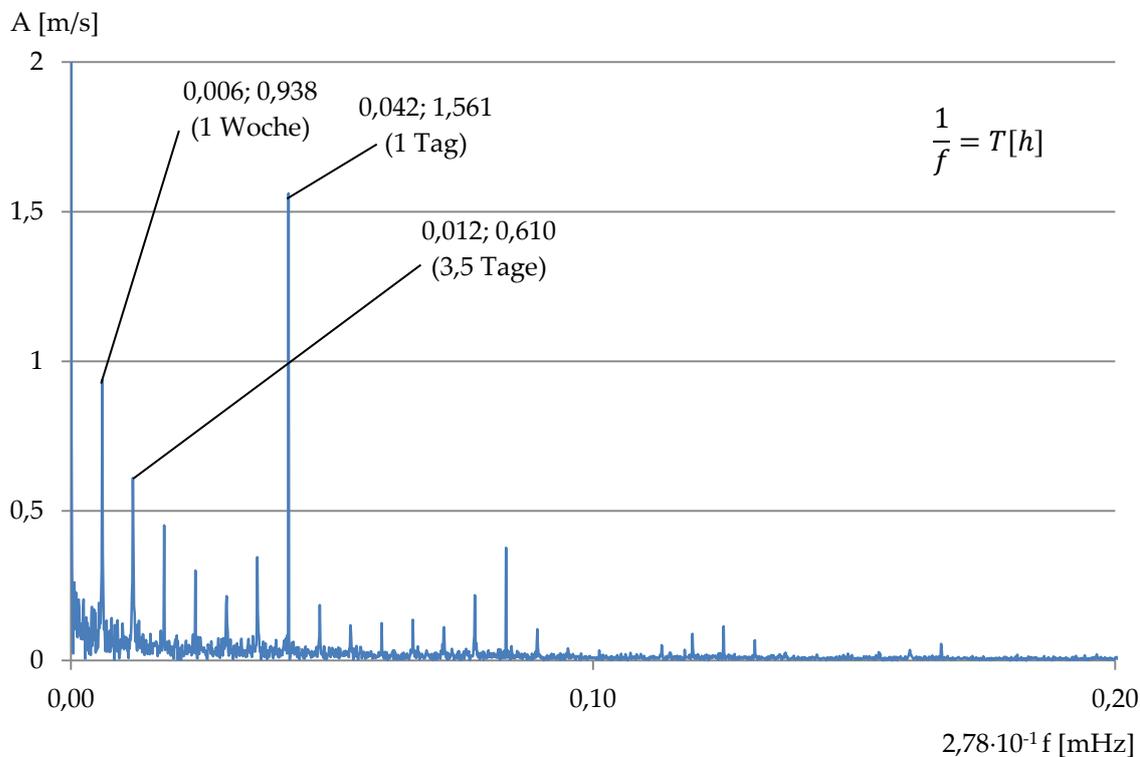


Abbildung C. 157: FFT - Tunnelluftströmung Weströhre

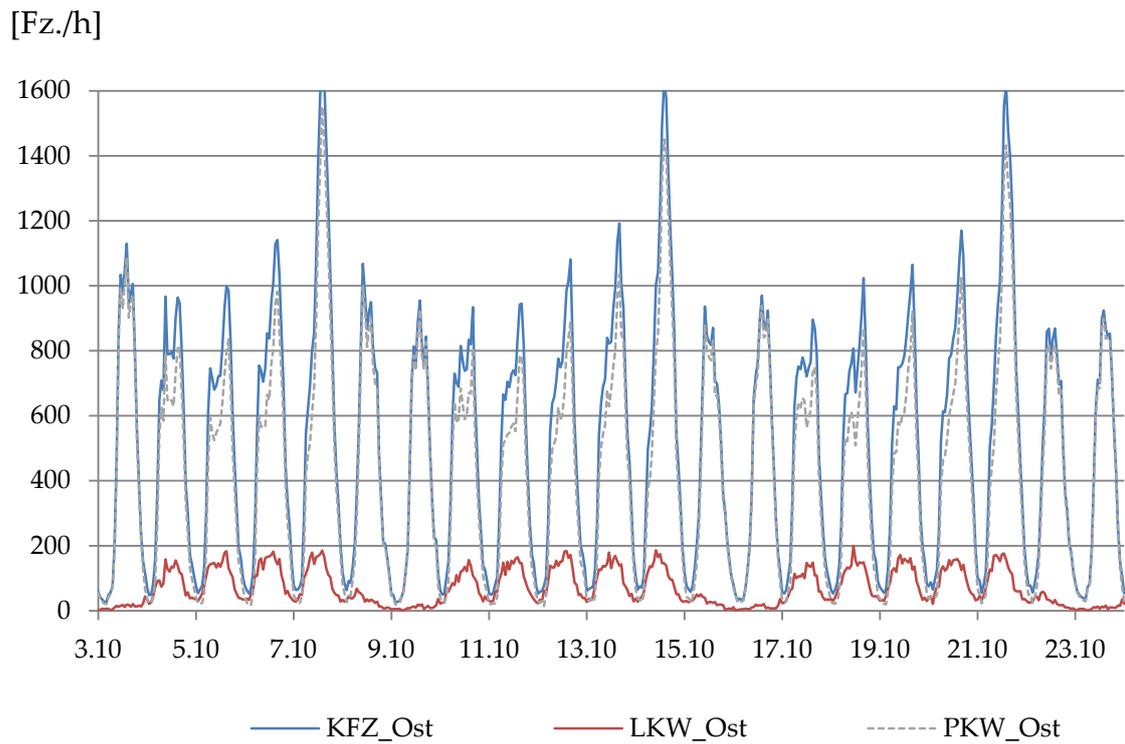


Abbildung C. 158: Verkehrsdaten Oströhre

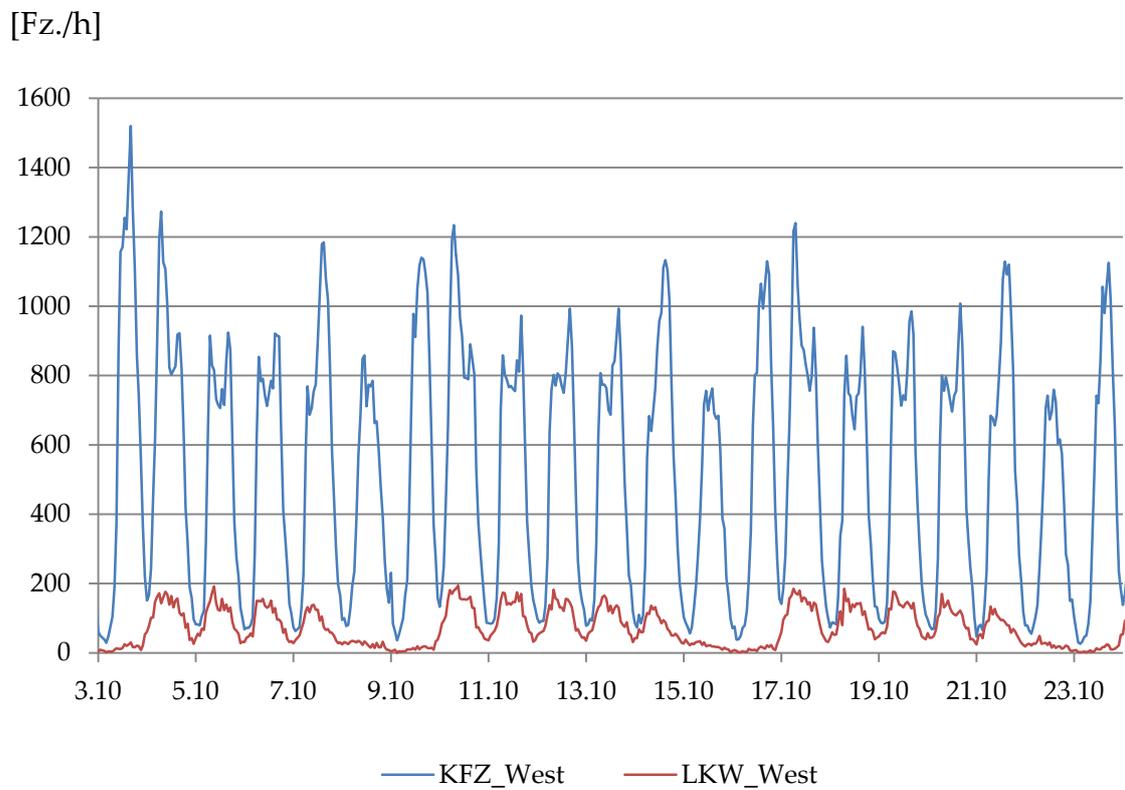


Abbildung C. 159: Verkehrsdaten Weströhre

---

[Fz./h]

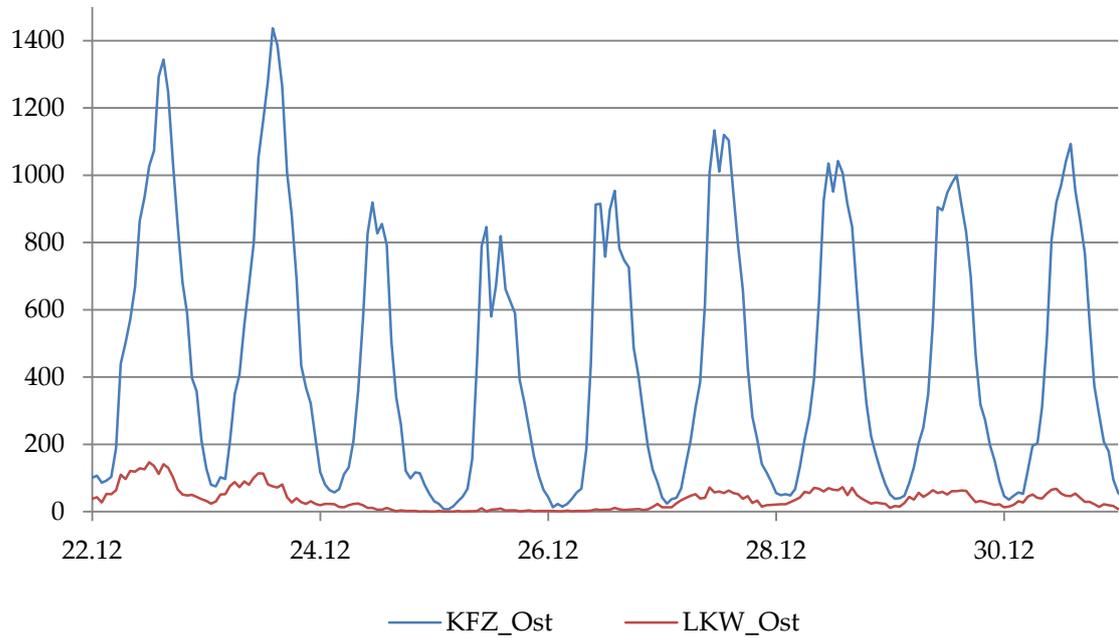


Abbildung C. 160: Verkehrsdaten Oströhre über Weihnachten

[Fz./h]

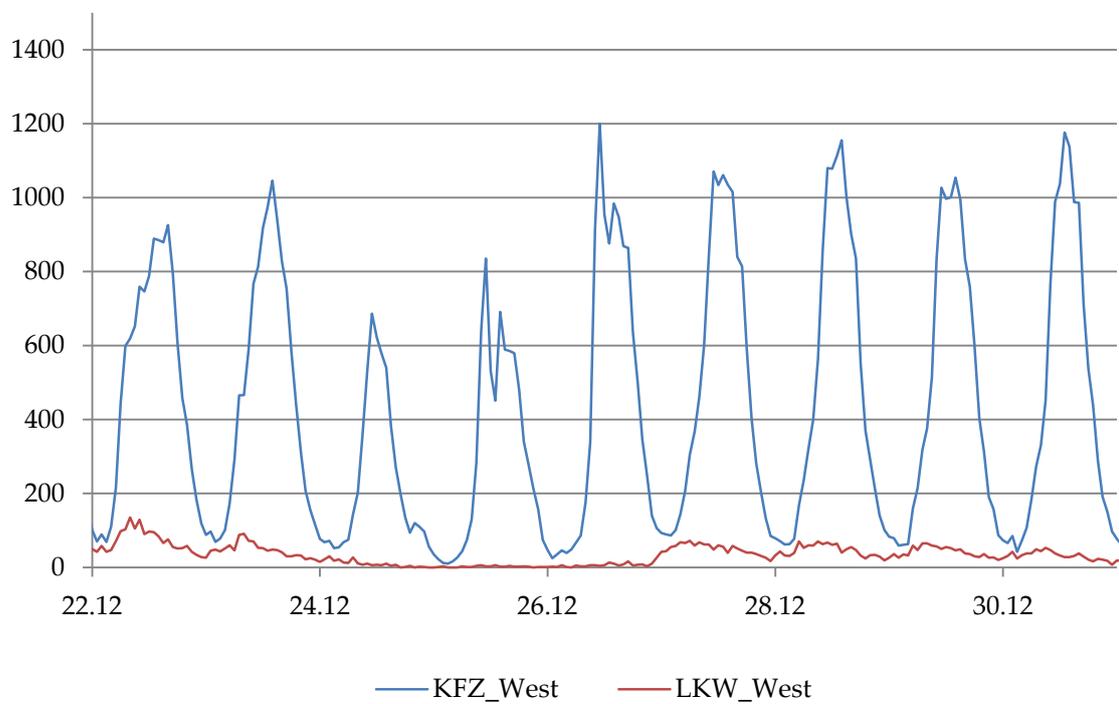


Abbildung C. 161: Verkehrsdaten Weströhre über Weihnachten

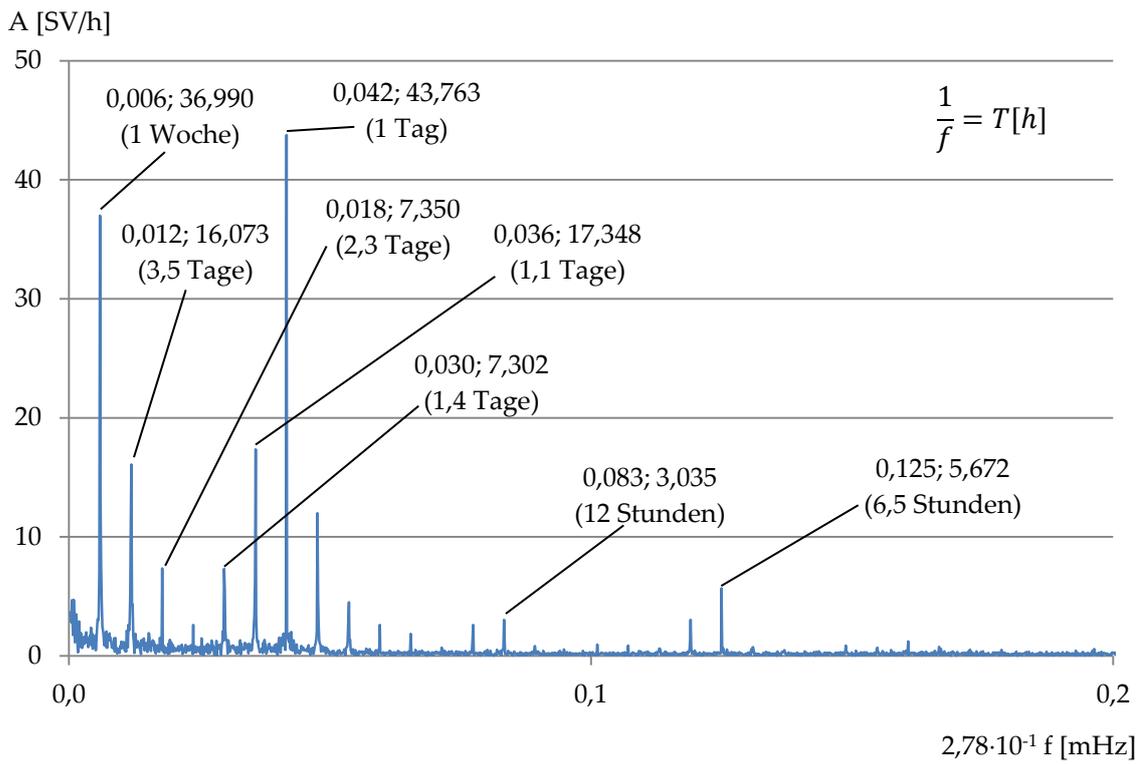


Abbildung C. 162: FFT - Schwerverkehr Oströhre

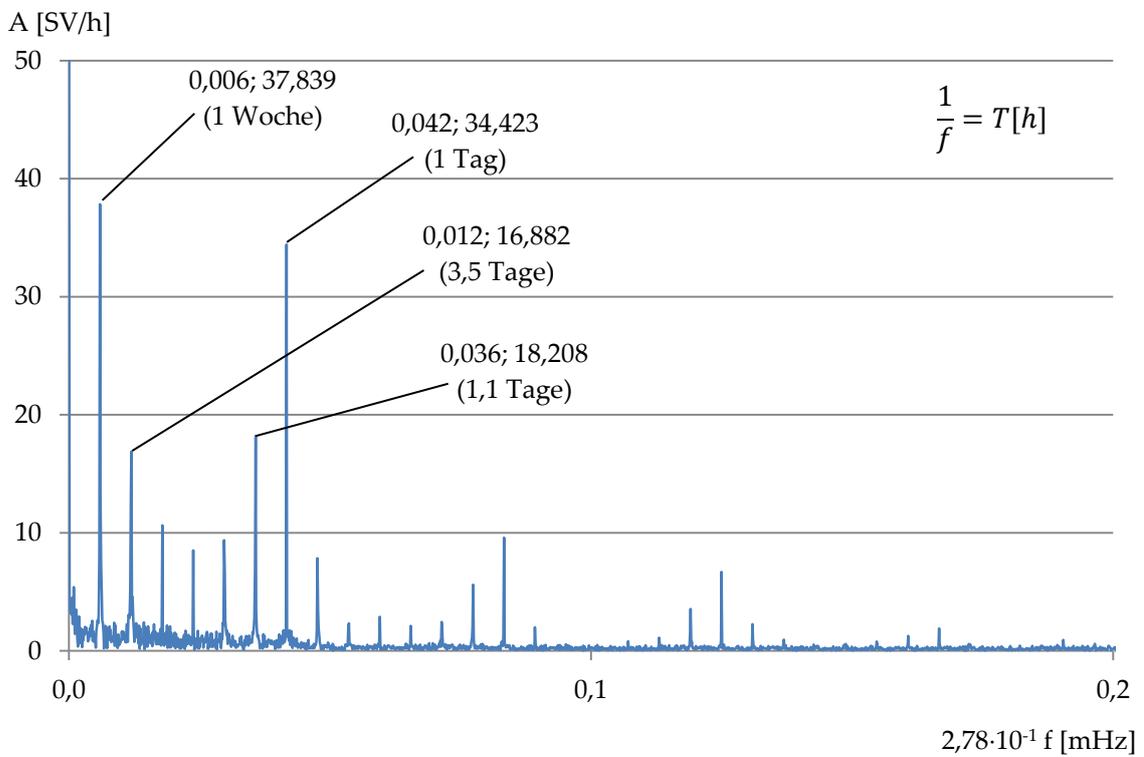


Abbildung C. 163: FFT - Schwerverkehr Weströhre

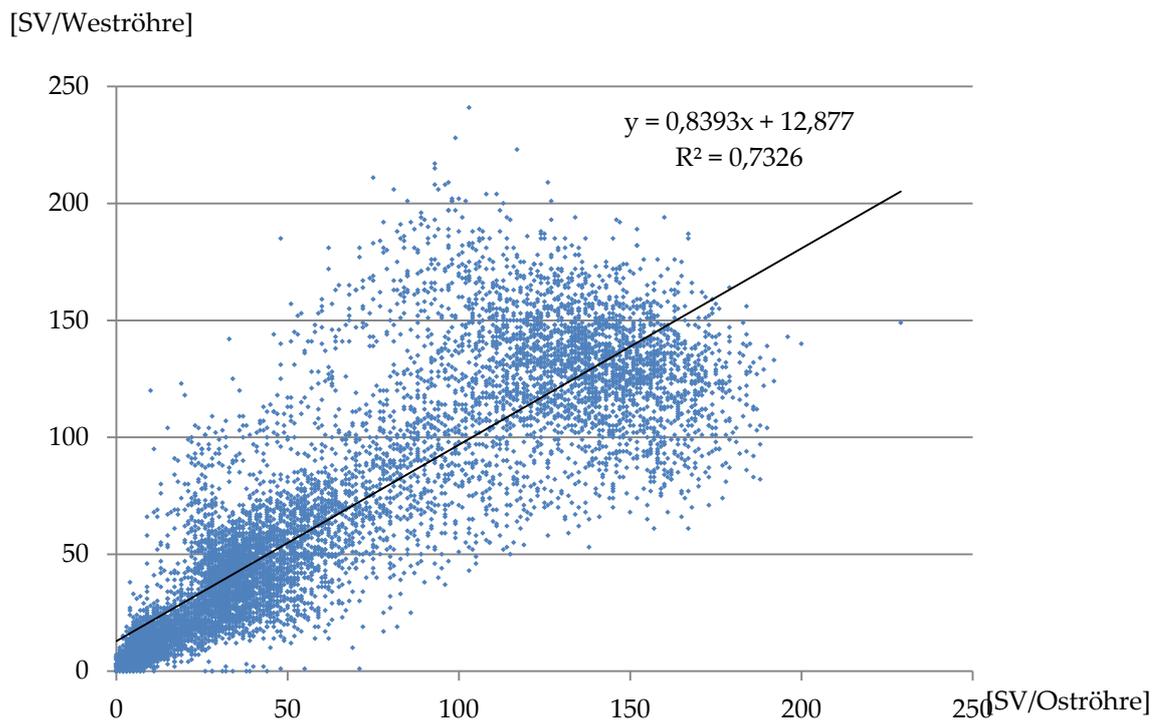


Abbildung C. 164: Korrelation Schwerverkehr Oströhre gegen Weströhre

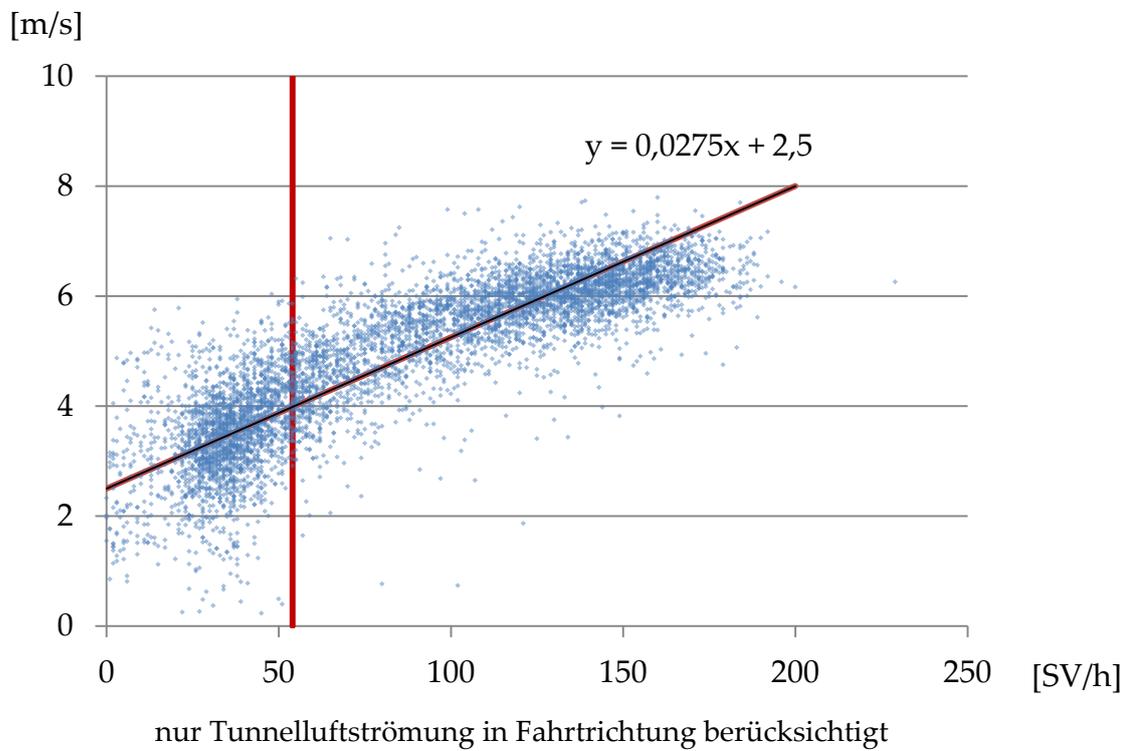


Abbildung C. 165: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Oströhre, ohne Berücksichtigung der Wochenenden

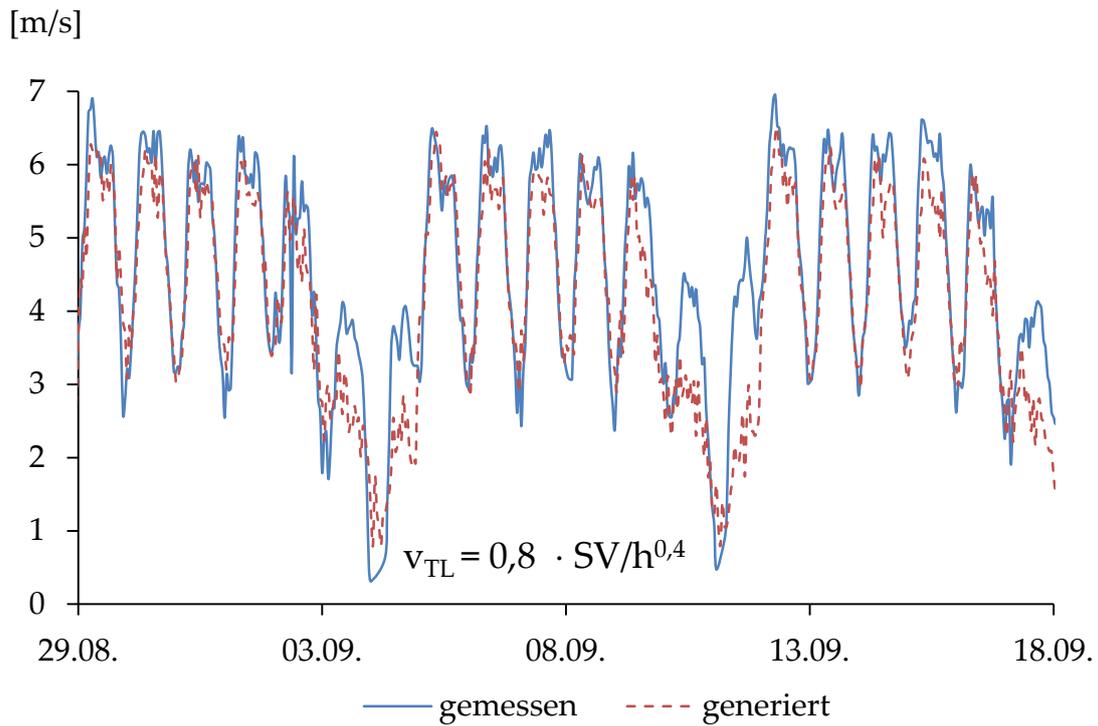


Abbildung C. 166: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Weströhre

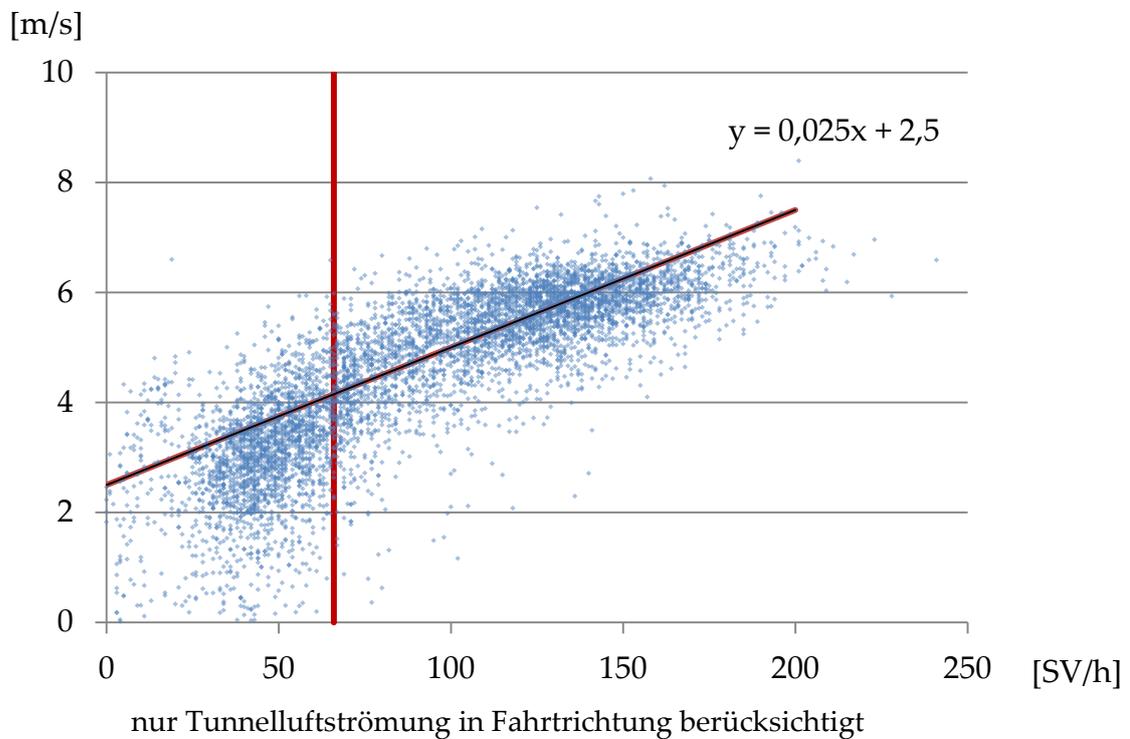


Abbildung C. 167: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Oströhre, ohne Berücksichtigung der Wochenenden

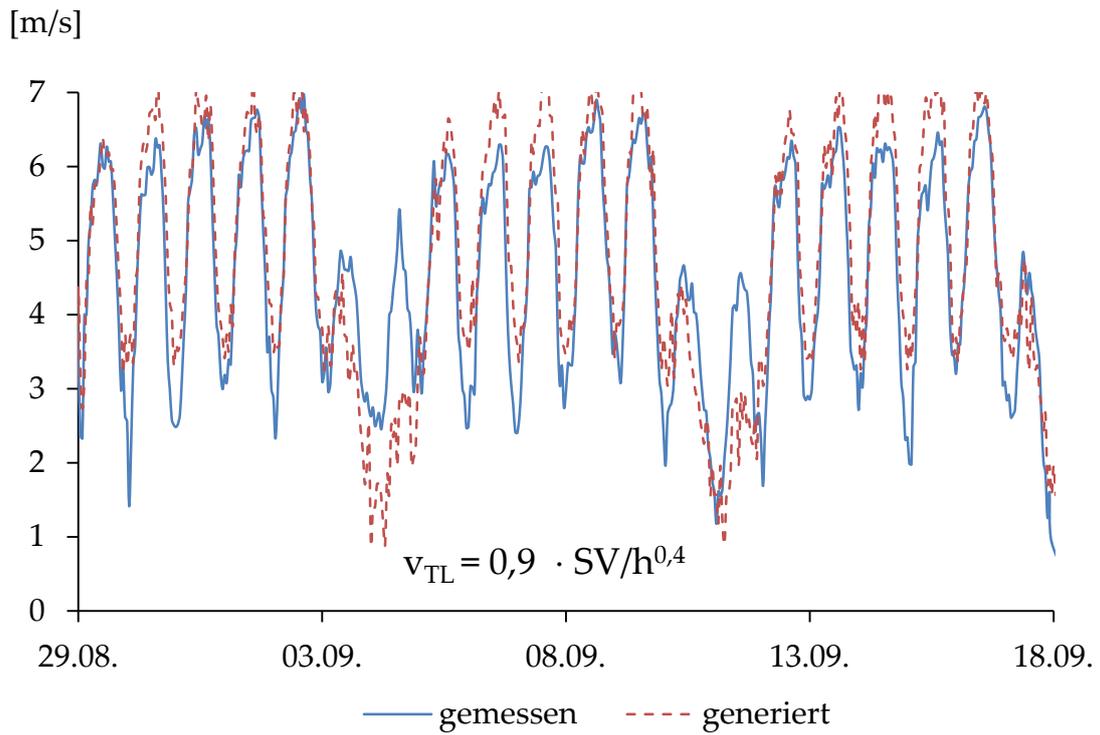


Abbildung C. 168: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Oströhre

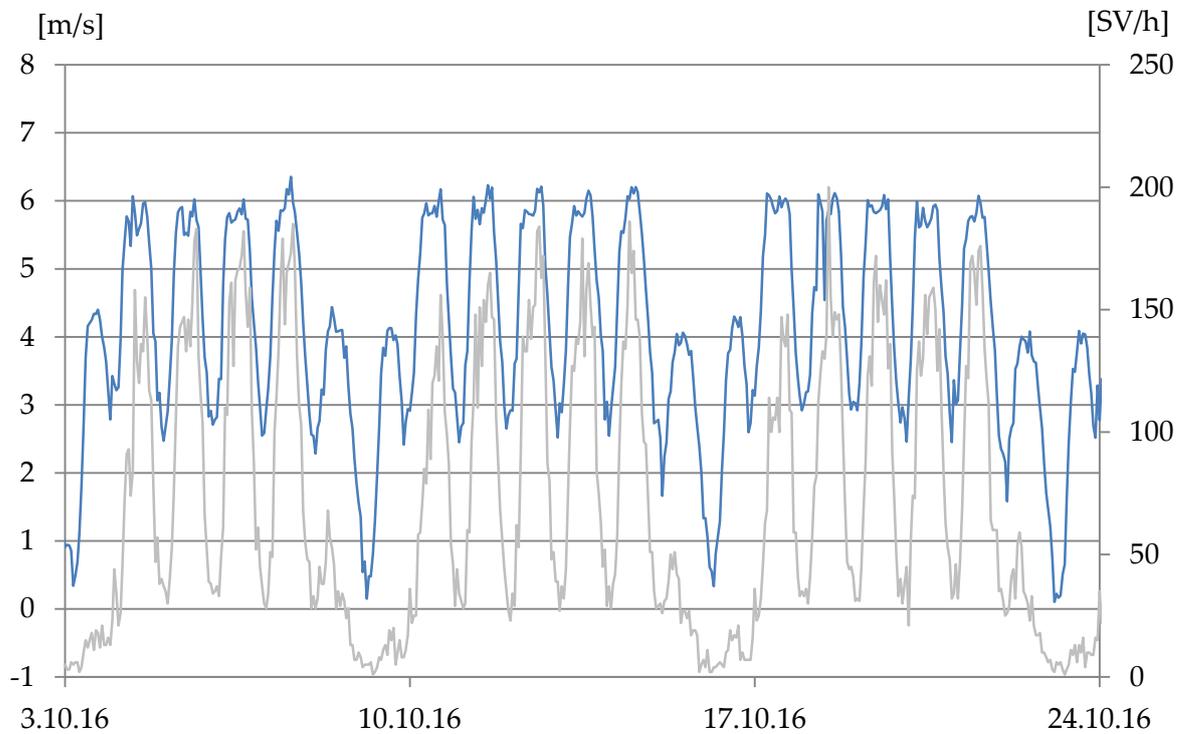


Abbildung C. 169: Anteil Schwerverkehr an Tunnelluftströmung

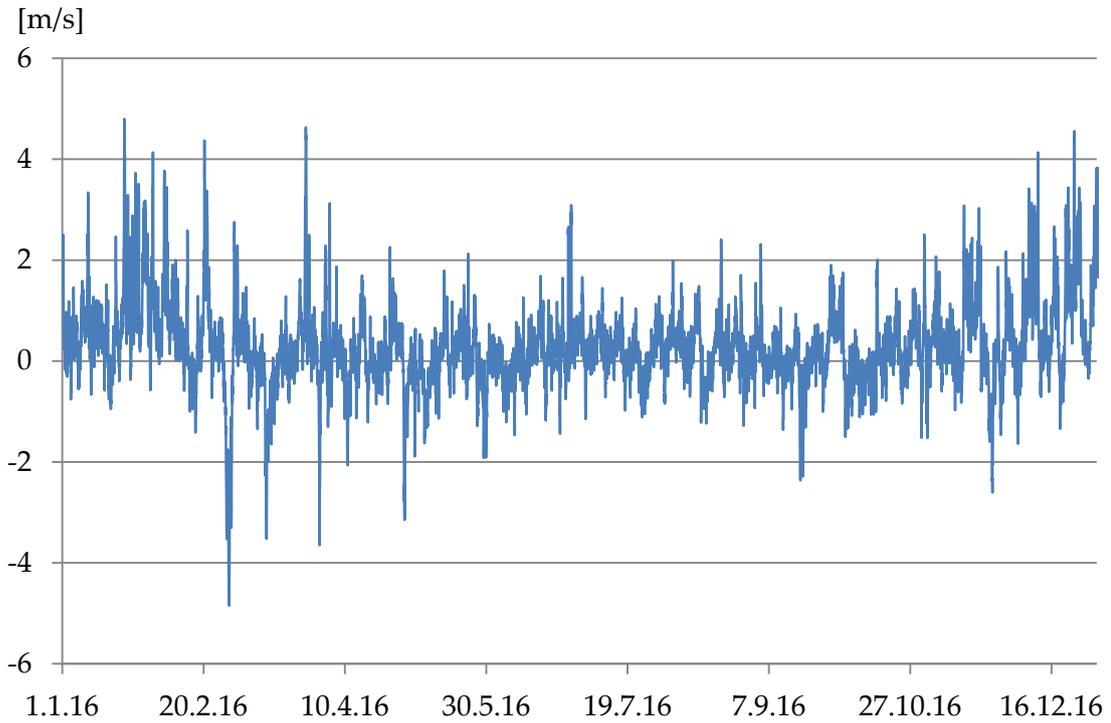


Abbildung C. 170: Grundströmung

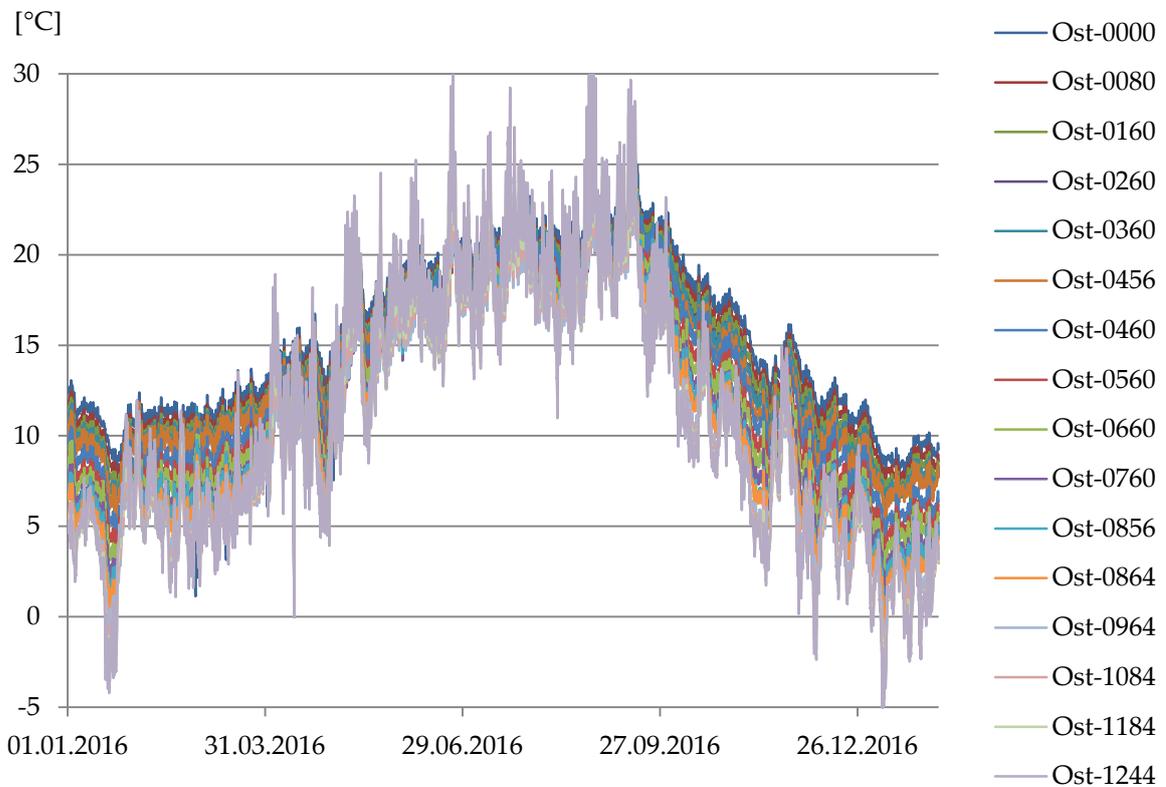


Abbildung C. 171: Tunnellufttemperatur Oströhre im Jahresgang

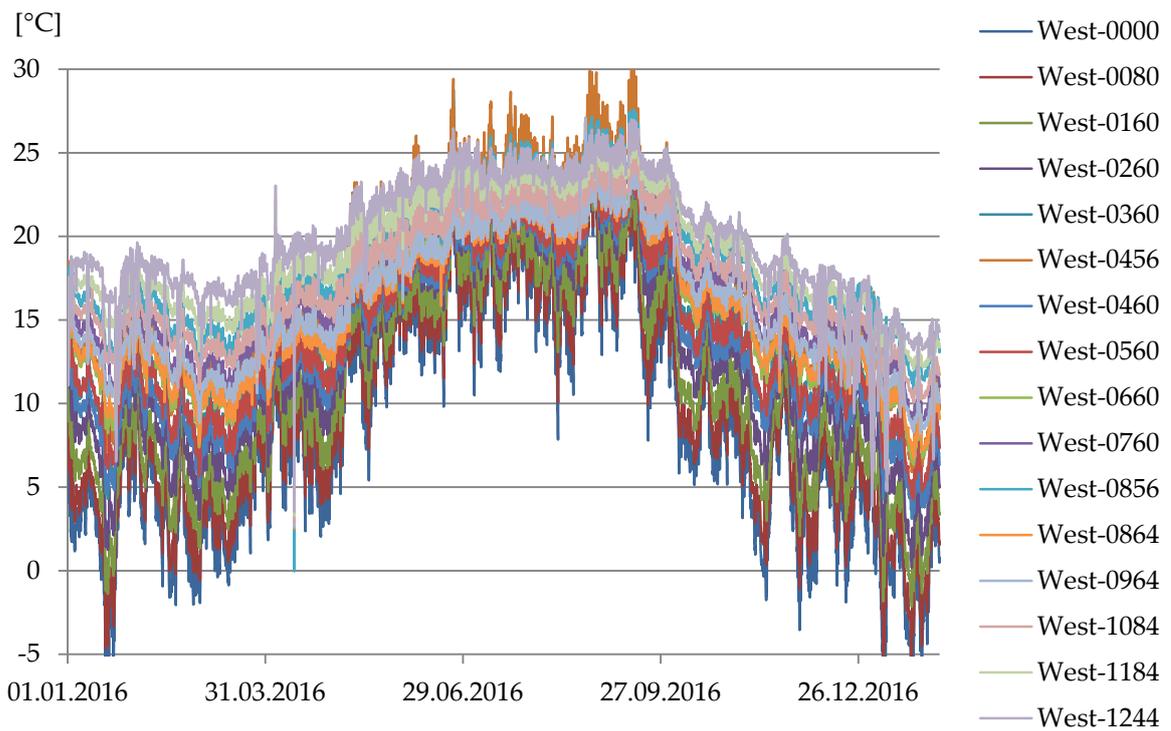


Abbildung C. 172: Tunnellufttemperatur Weströhre im Jahresgang

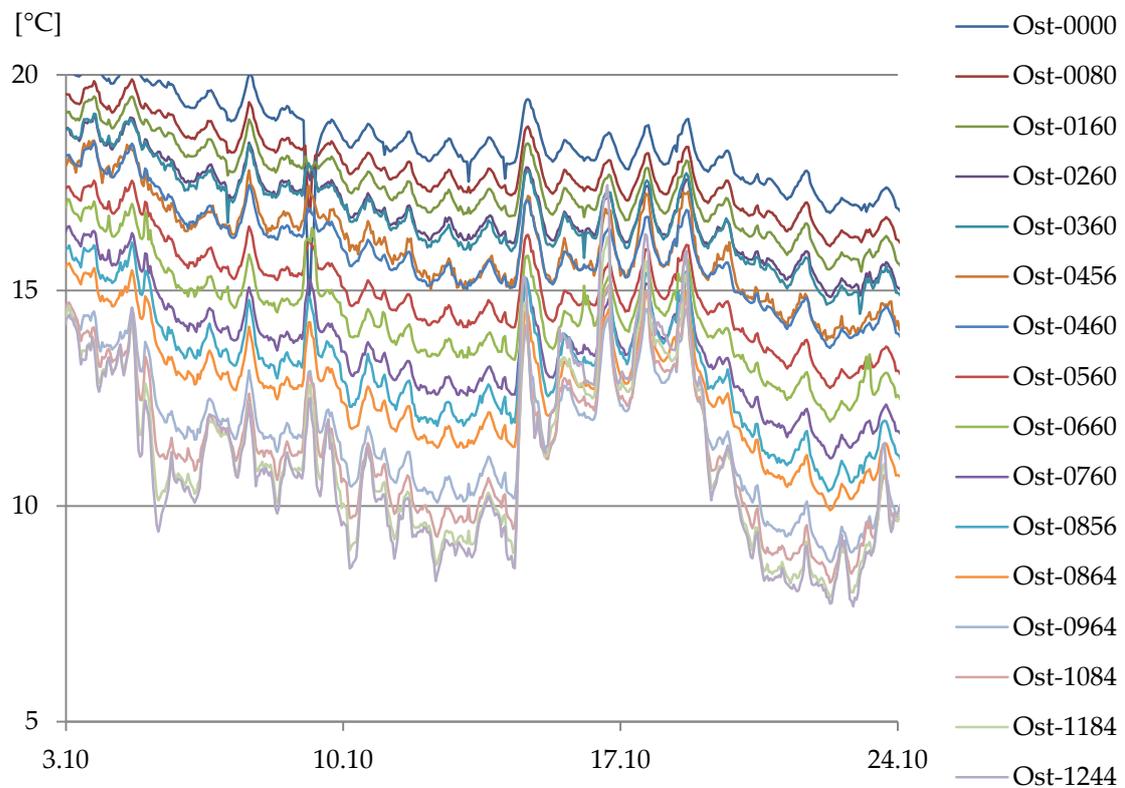


Abbildung C. 173: Tunnellufttemperatur Oströhre im Wochengang

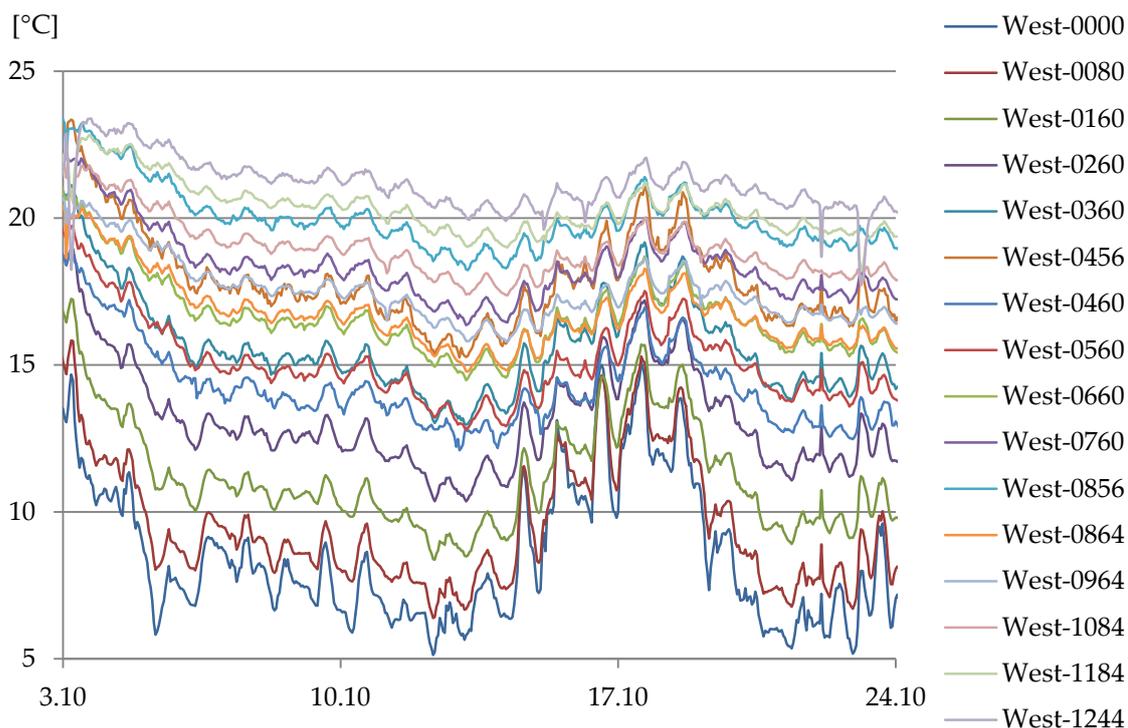


Abbildung C. 174: Tunnellufttemperatur Weströhre im Wochengang

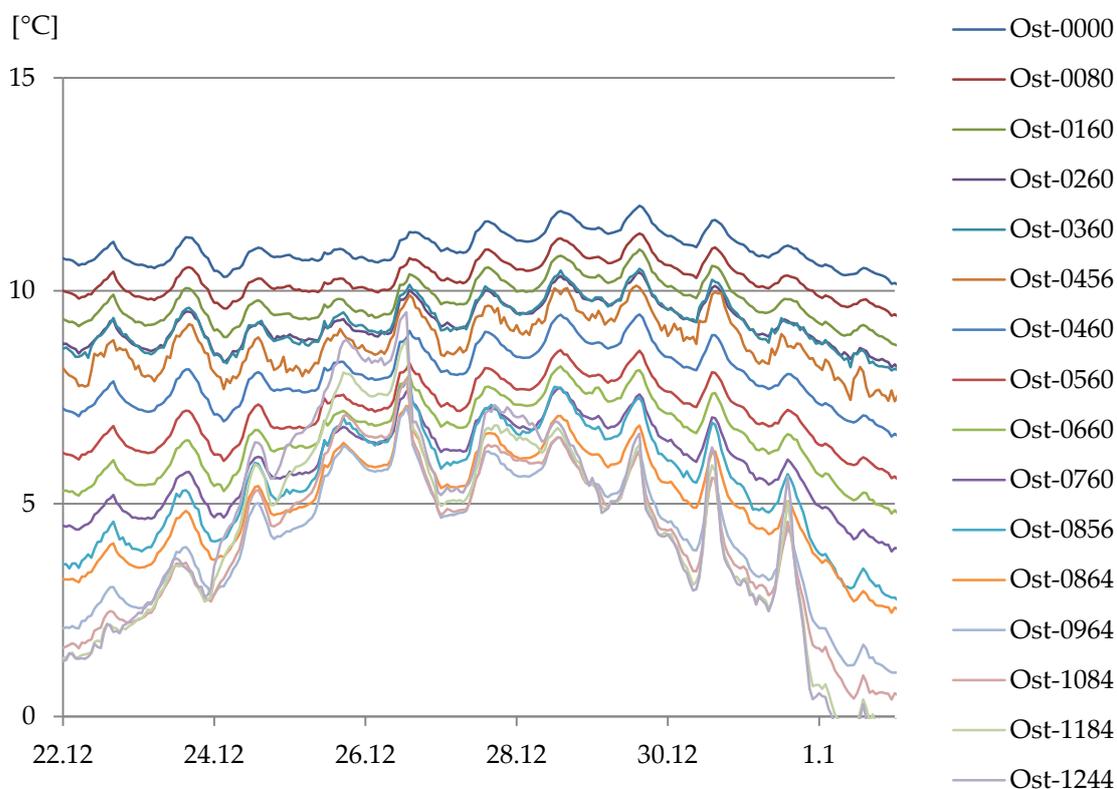


Abbildung C. 175: Tunnellufttemperatur Oströhre über Weihnachten

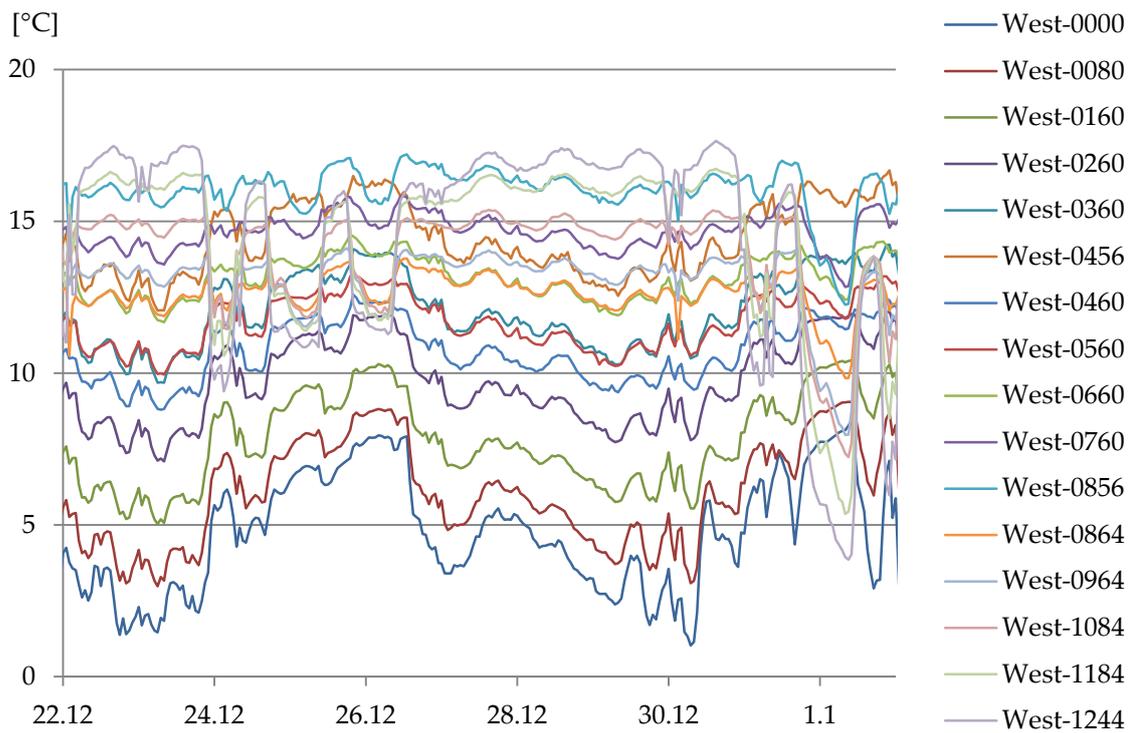


Abbildung C. 176: Tunnellufttemperatur Weströhre über Weihnachten

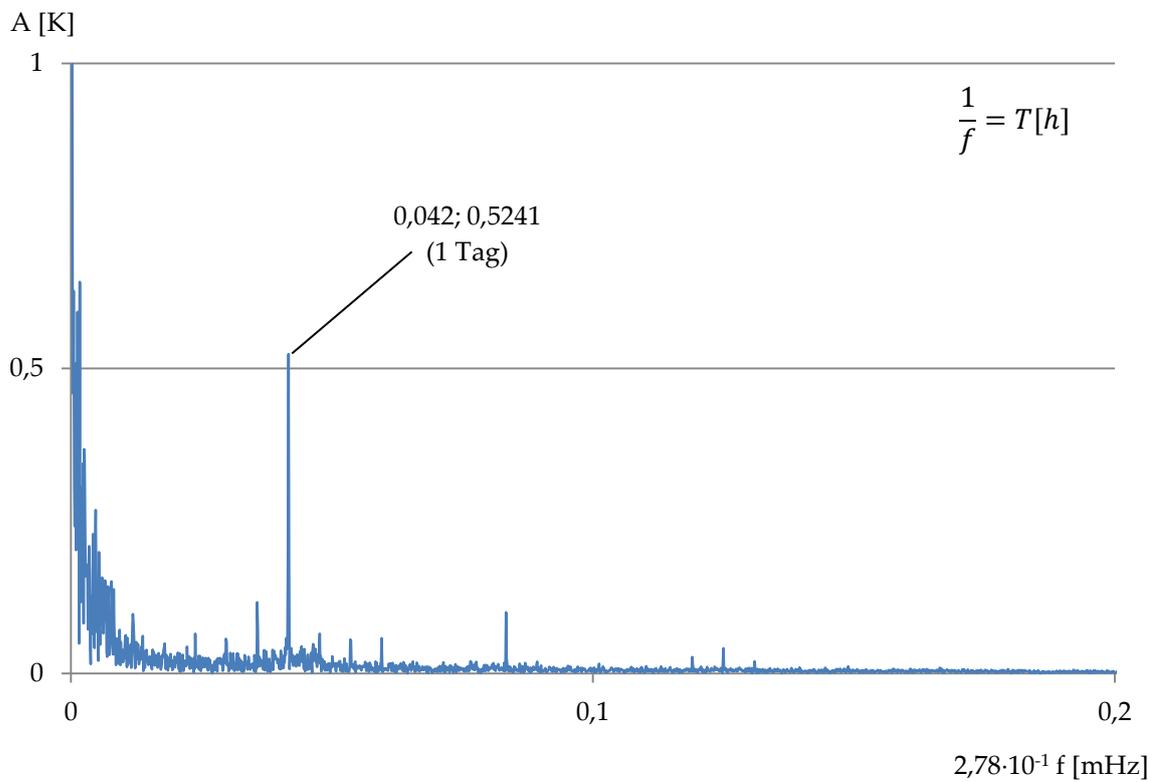


Abbildung C. 177: FFT - Tunnellufttemperatur Oströhre

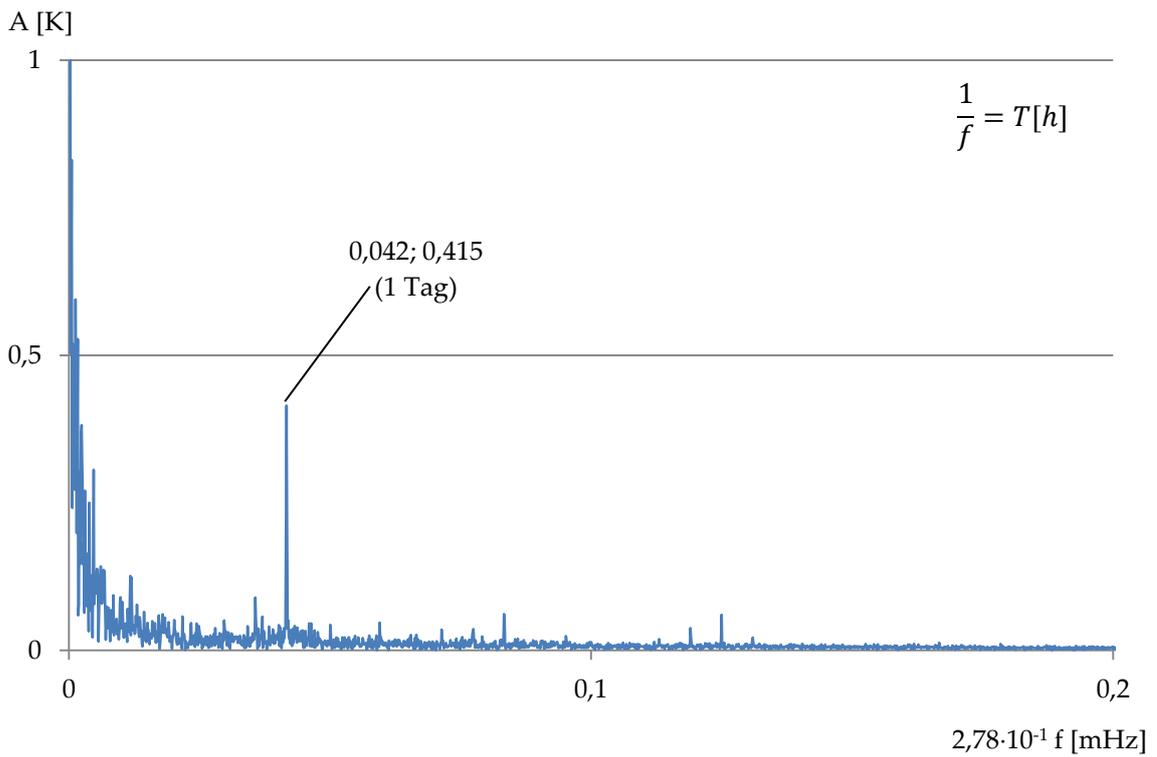


Abbildung C. 178: Tunnellufttemperatur Weströhre

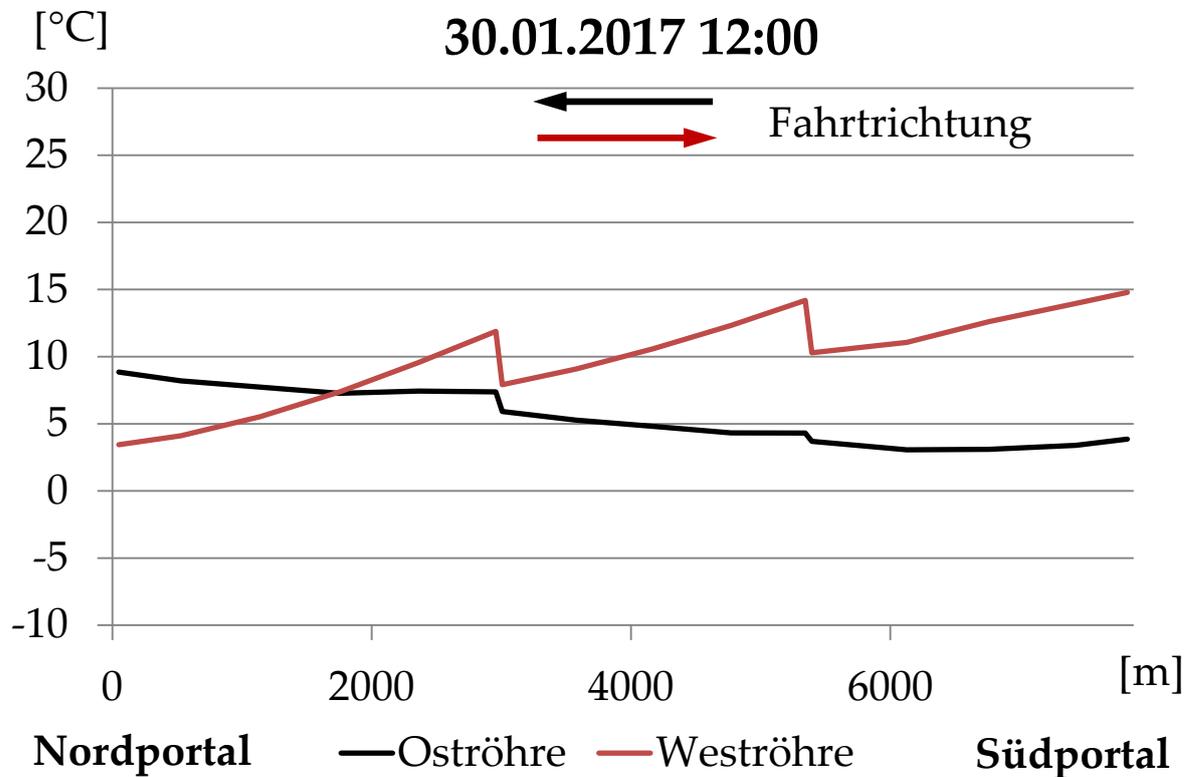


Abbildung C. 179: Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse, exemplarisch

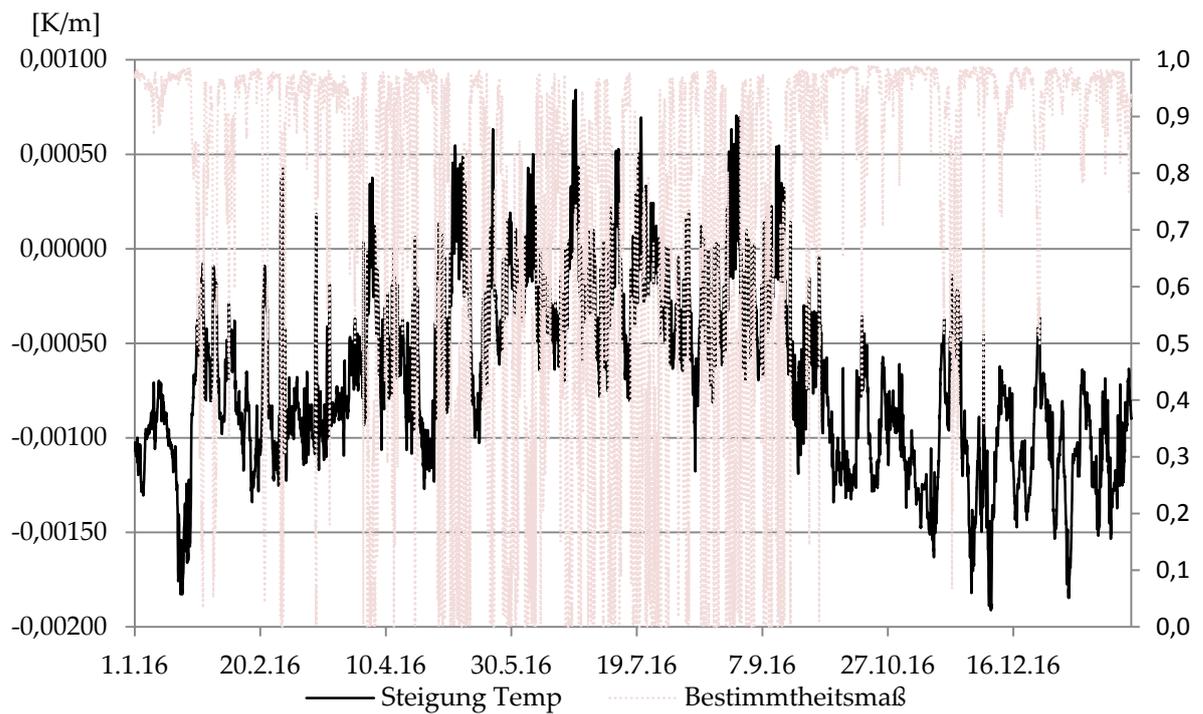


Abbildung C. 180: Steigung der Temperaturgradienten Oströhre im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

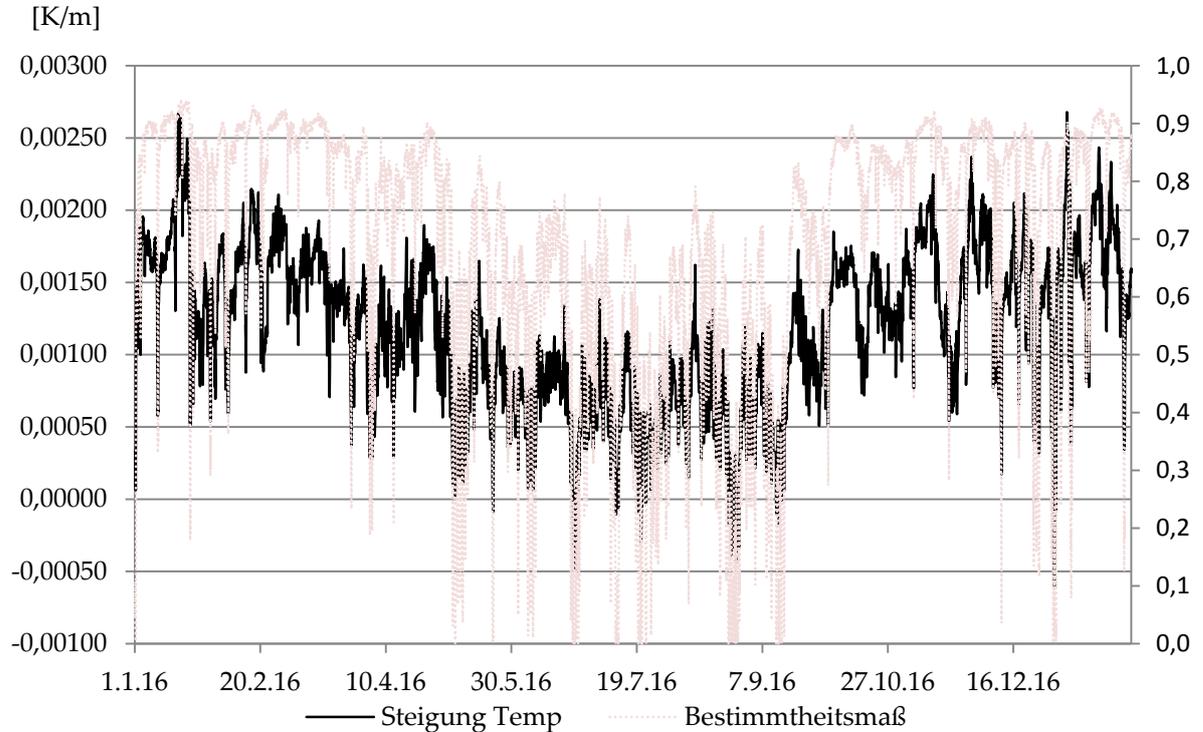


Abbildung C. 181: Steigung der Temperaturgradienten Oströhre im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

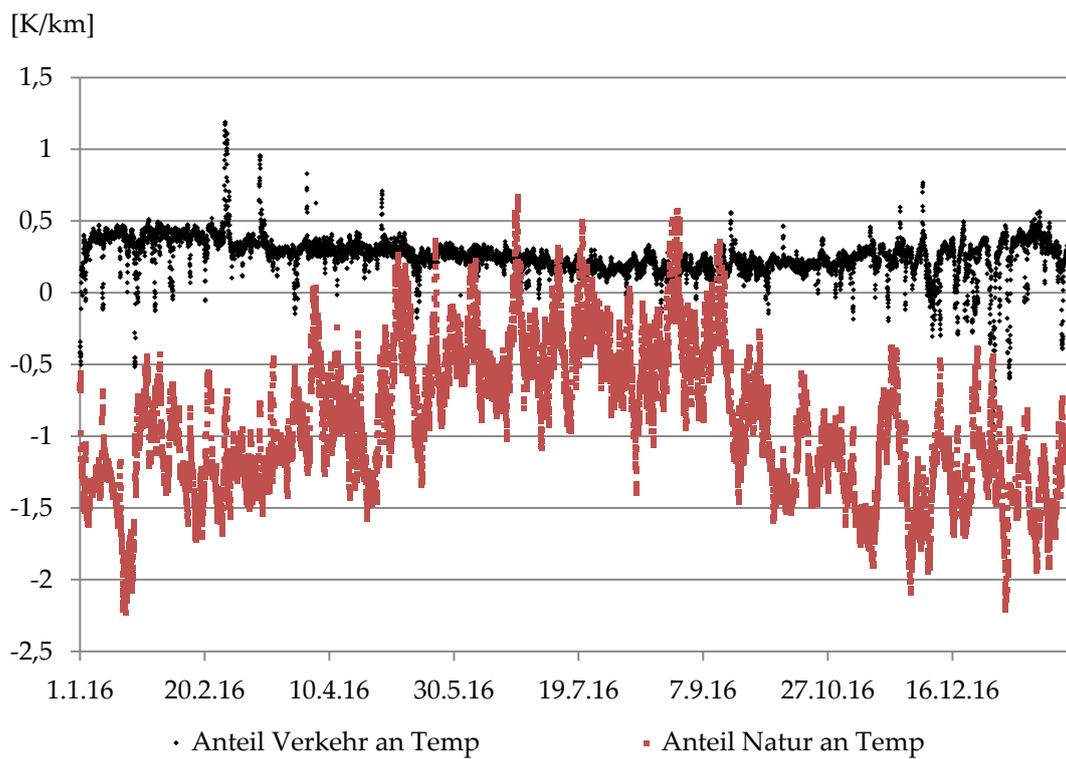


Abbildung C. 182: Anteile an Temperaturgradienten getrennt nach Fahrzeugen und sonstigen Einflüssen

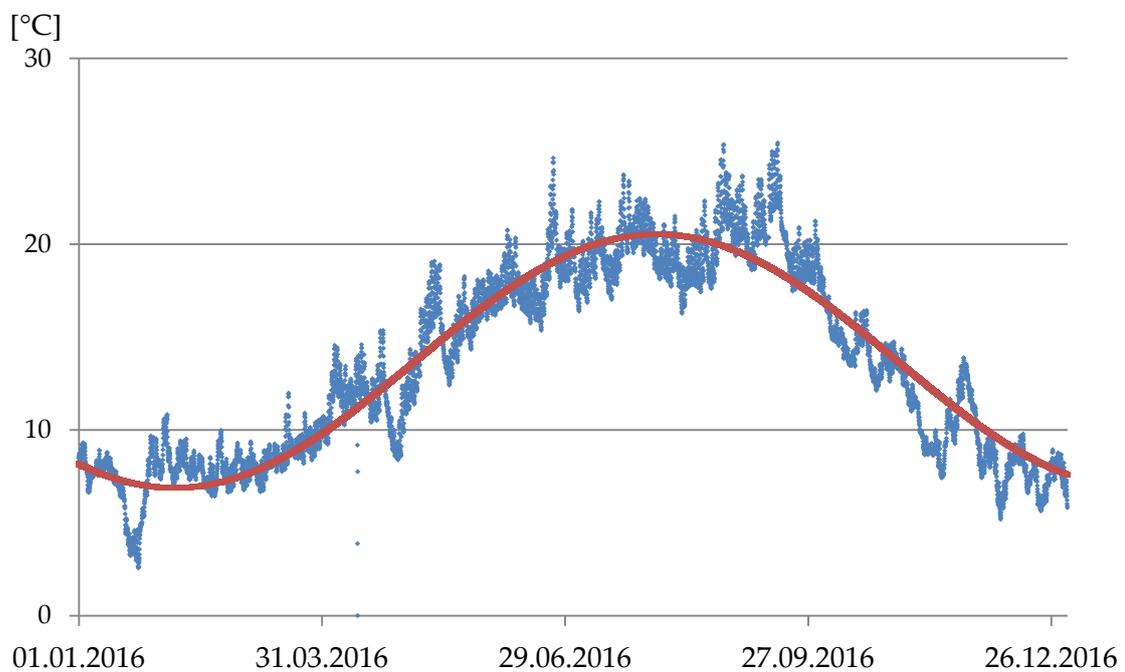


Abbildung C. 183: Sinusregression der gemessenen Tunnellufttemperatur Oströhre, Mittelwert über alle Messgeber

$$v_t = 13,699 + 6,827 * \sin\left(\pi \cdot \frac{t - 2992,588}{4282,028}\right) \text{ mit } t \text{ in [h]}$$

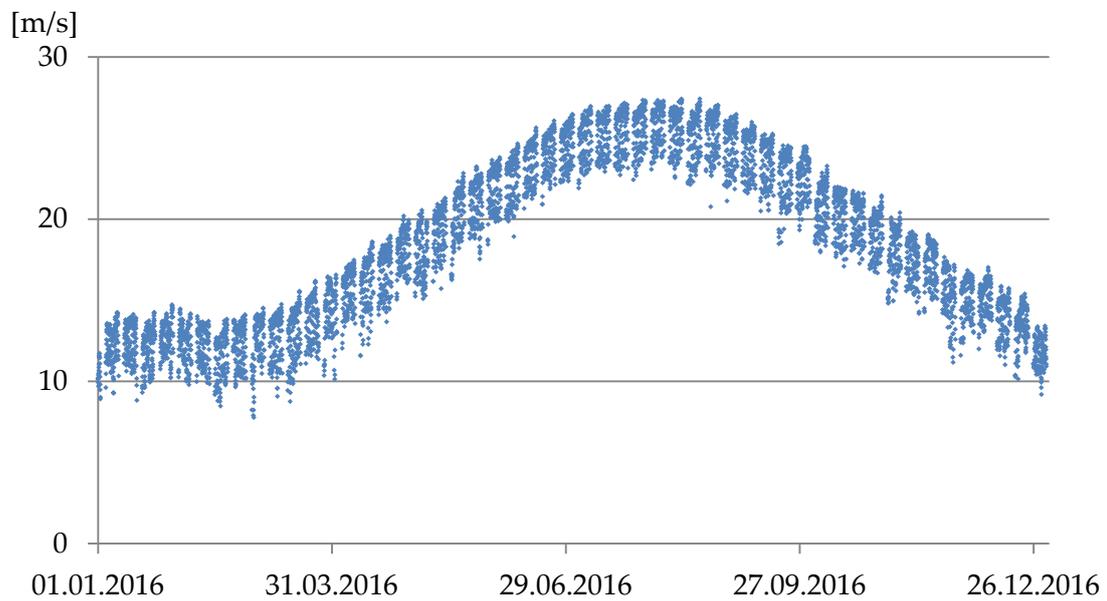


Abbildung C. 184: Um Sinusregression angepasste  
Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit (absolute  
Strömungsgeschwindigkeit nicht aussagekräftig)

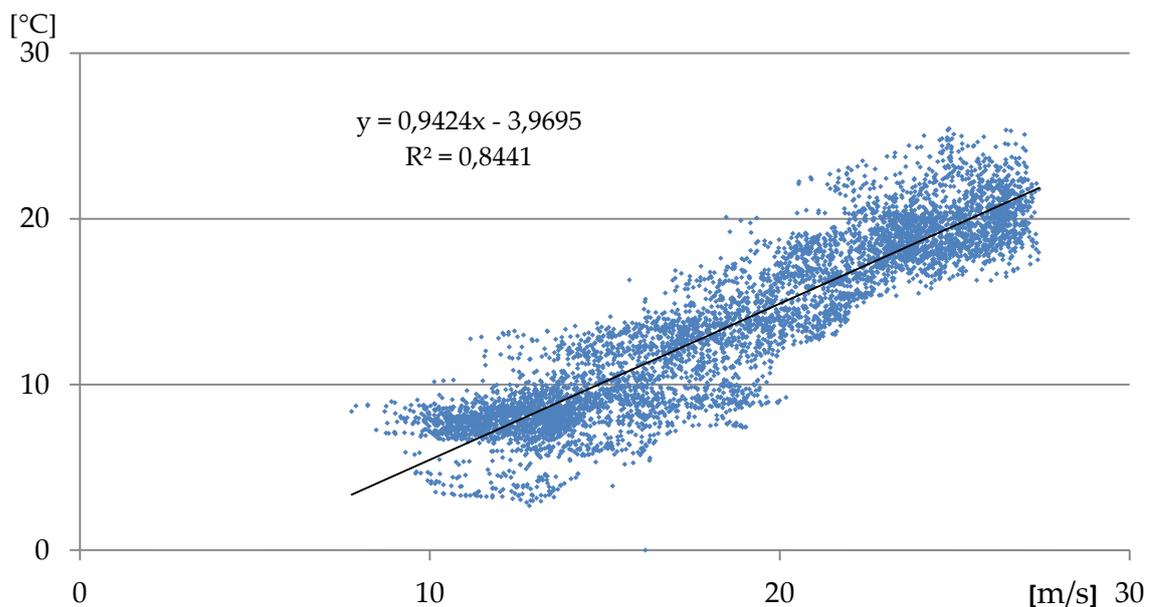
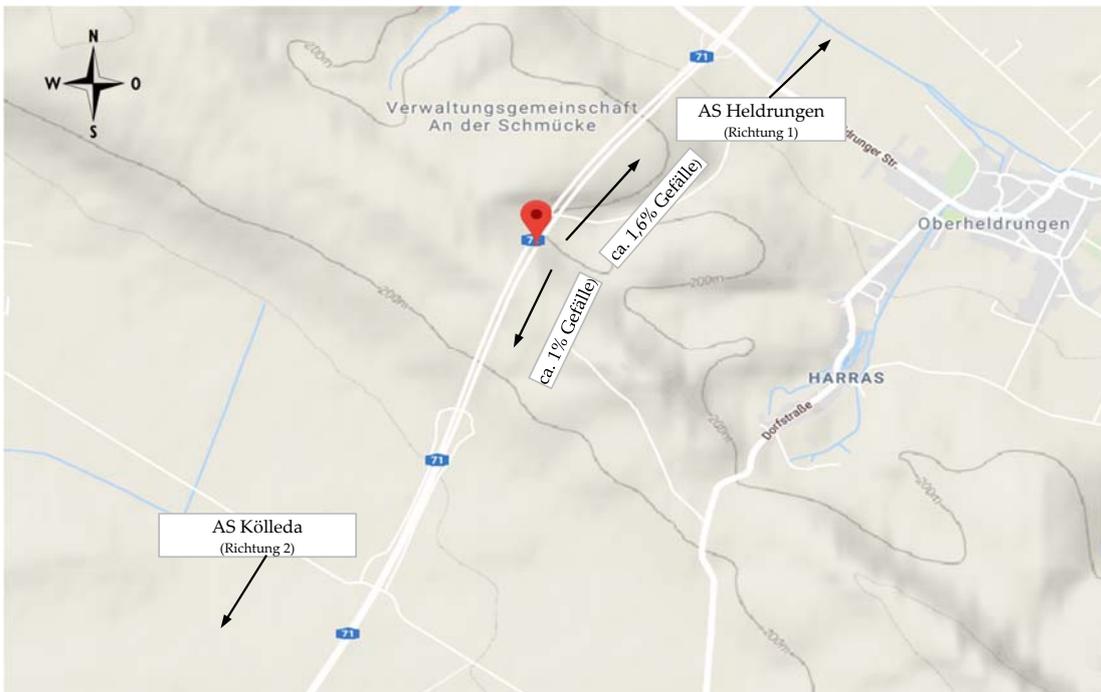


Abbildung C. 185: Korrelation der angepassten Strömungsgeschwindigkeit gegen  
die mittleren Tunnellufttemperaturen

**Tunnel Schmücke**



|                                       |             |                           |                         |
|---------------------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Thüringen   | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 2                       |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | A71         | <u>Länge i.M.:</u>        | 1725 m                  |
| <u>Gradiente:</u>                     | ~1,5% Kuppe | <u>Überdeckung:</u>       | 65 m                    |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | 12804       | <u>Luftquerschnitt</u>    | 61 m <sup>2</sup>       |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | ja          |                           | 24.08.2016 - 31.01.2017 |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja          |                           | 24.08.2016 - 31.01.2017 |



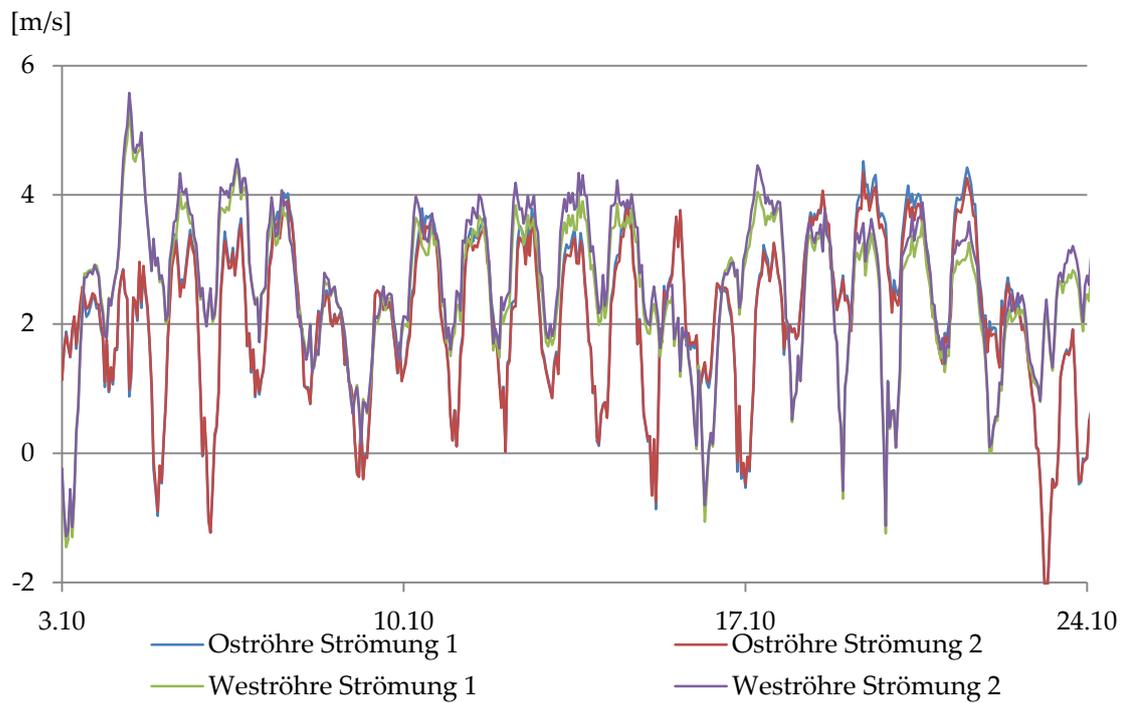


Abbildung C. 186: Tunnelluftströmung Oströhre- und Weströhre

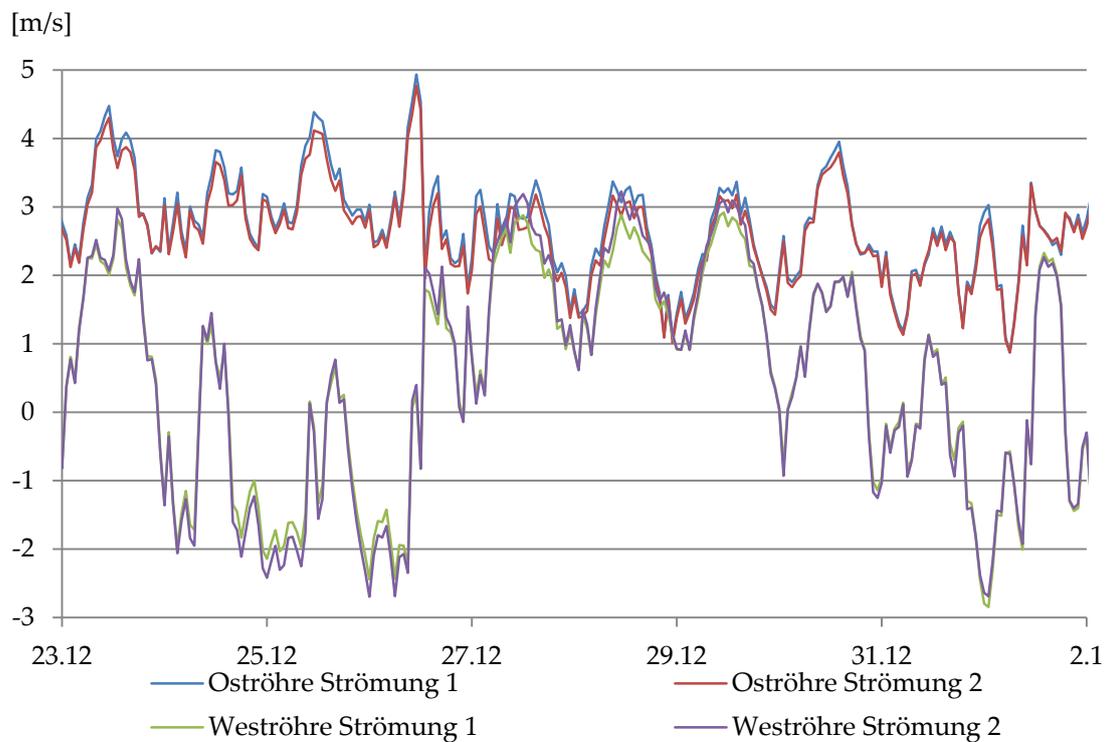


Abbildung C. 187: Tunnelluftströmung Oströhre- und Weströhre über Weihnachten

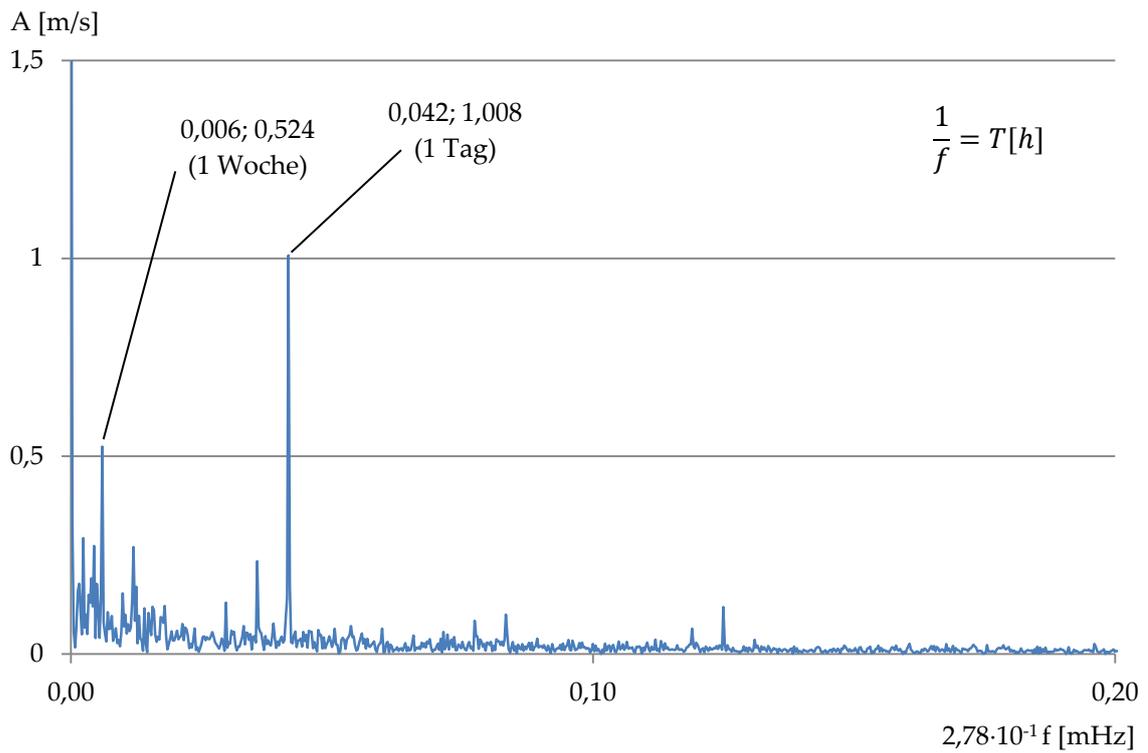


Abbildung C. 188: FFT - Tunnelluftströmung Oströhre

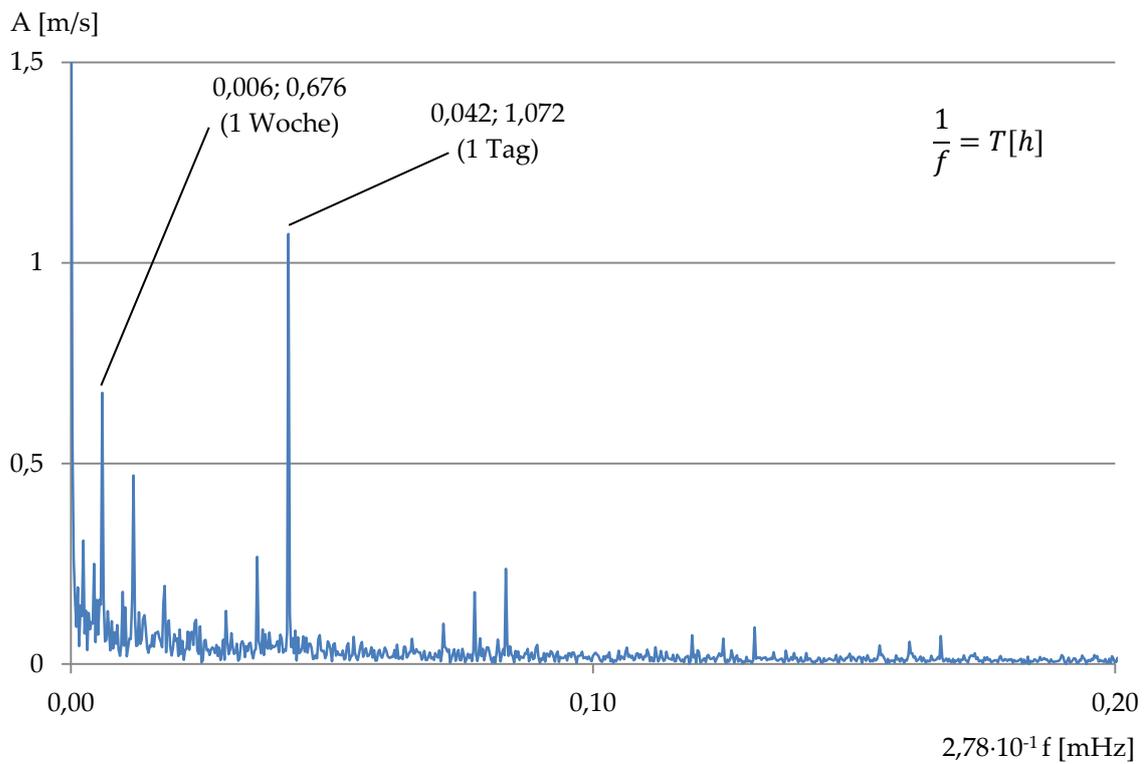


Abbildung C. 189: FFT - Tunnelluftströmung Weströhre

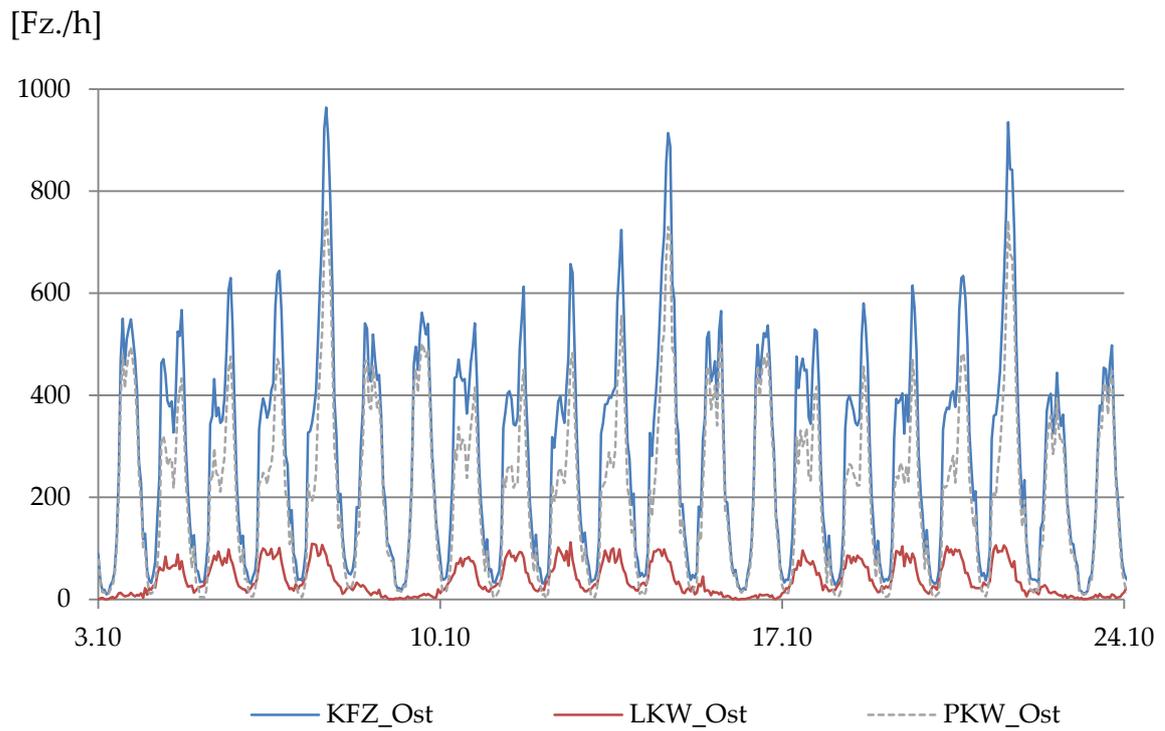


Abbildung C. 190: Verkehrsdaten Oströhre

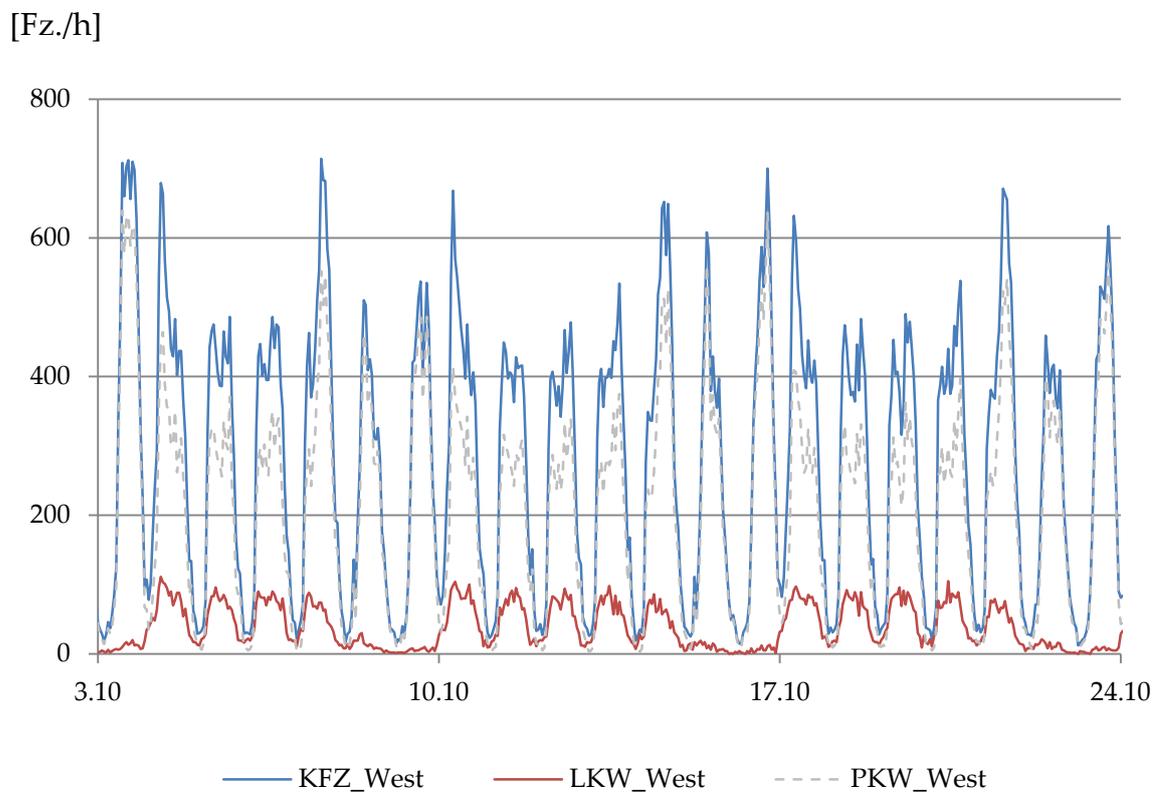


Abbildung C. 191: Verkehrsdaten Weströhre

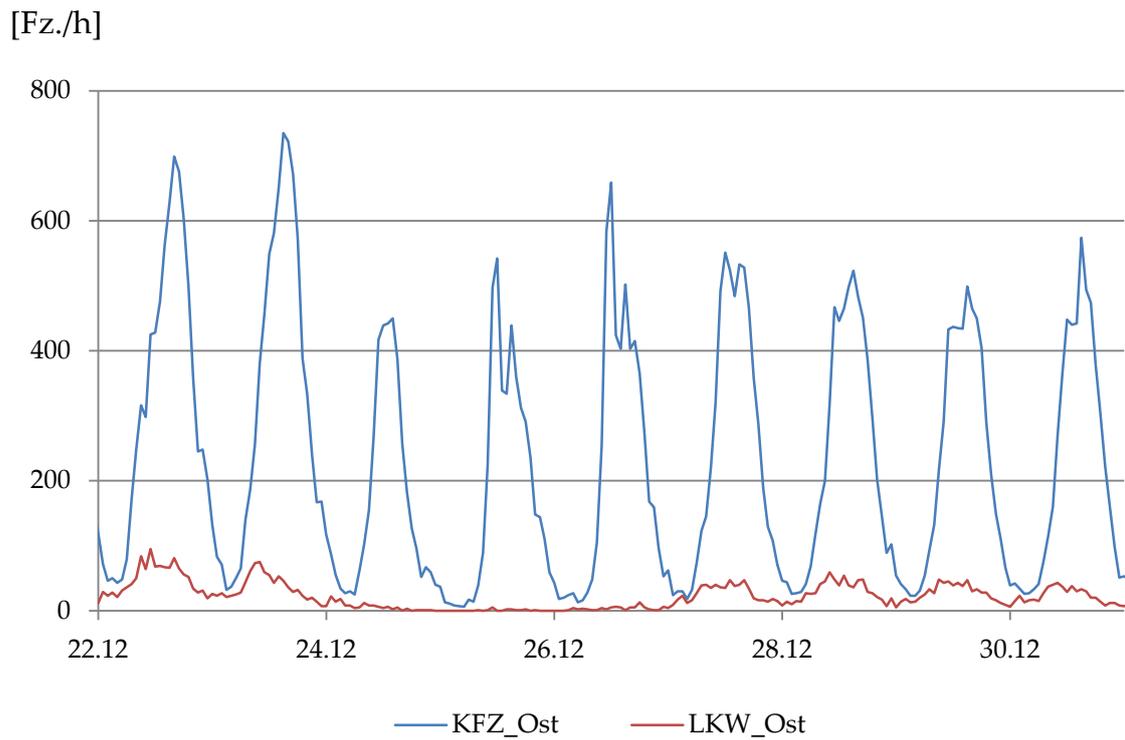


Abbildung C. 192: Verkehrsdaten über Weihnachten Oströhre

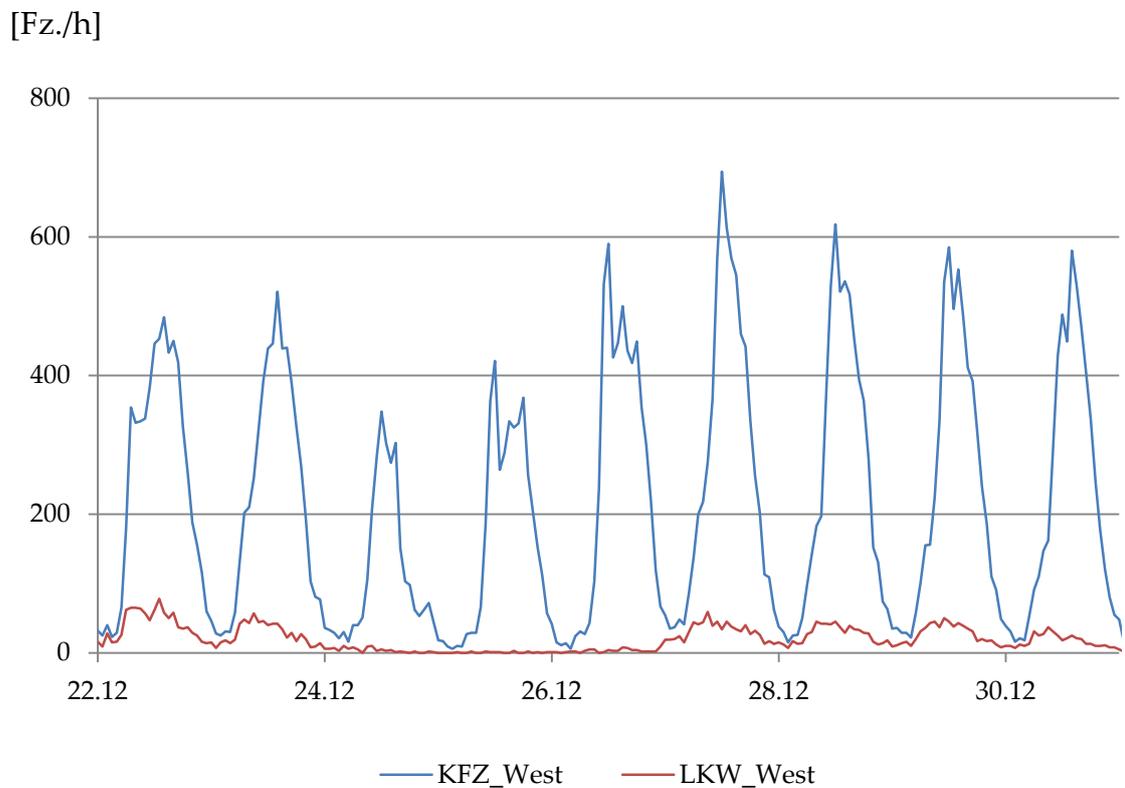


Abbildung C. 193: Verkehrsdaten über Weihnachten Weströhre

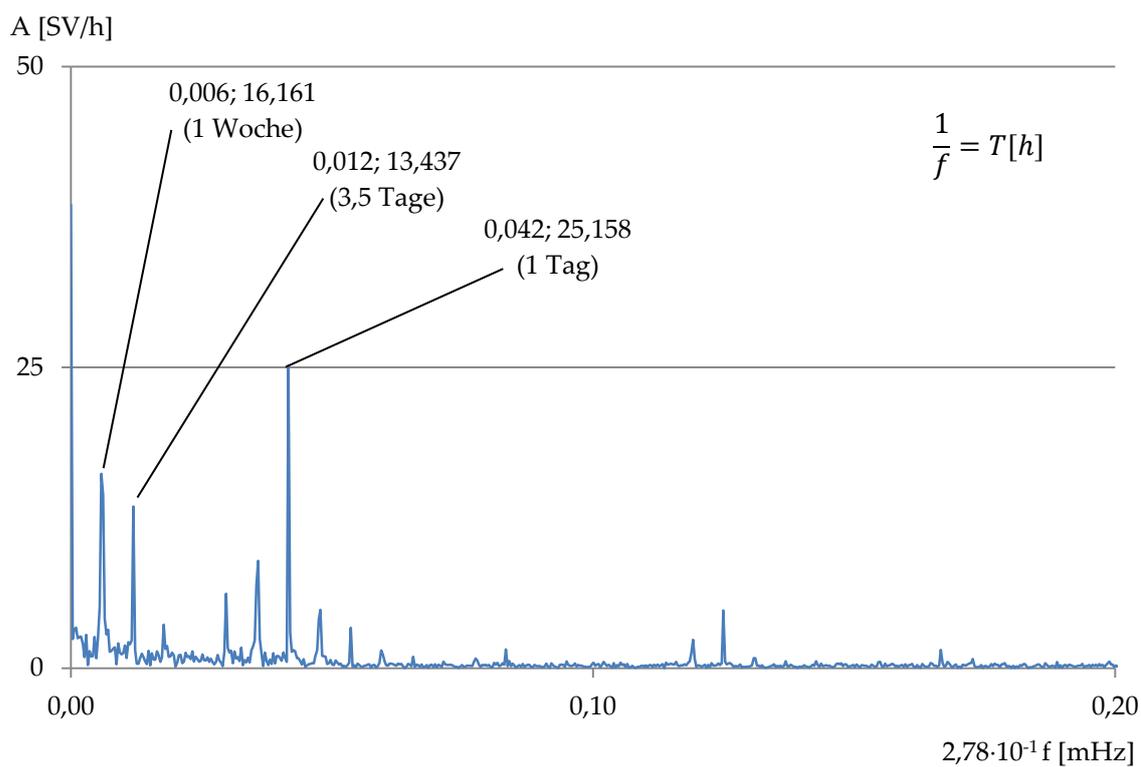


Abbildung C. 194: FFT - Schwerverkehr Oströhre

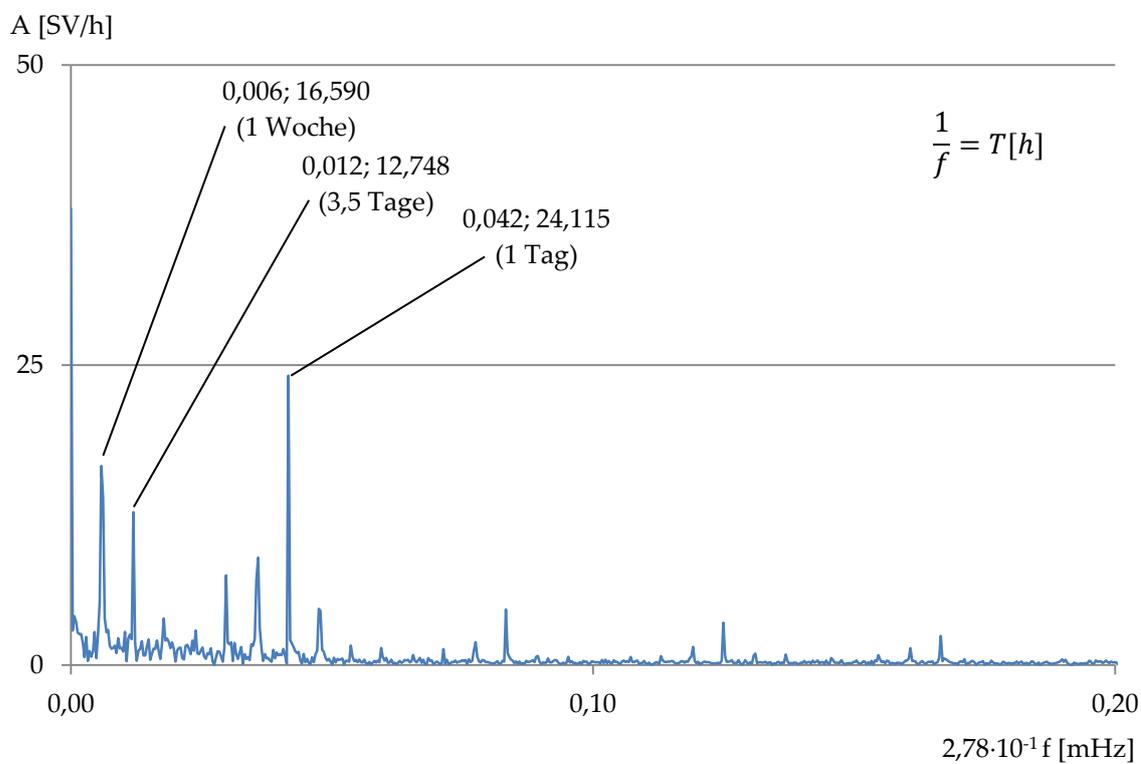


Abbildung C. 195: Schwerverkehr Weströhre

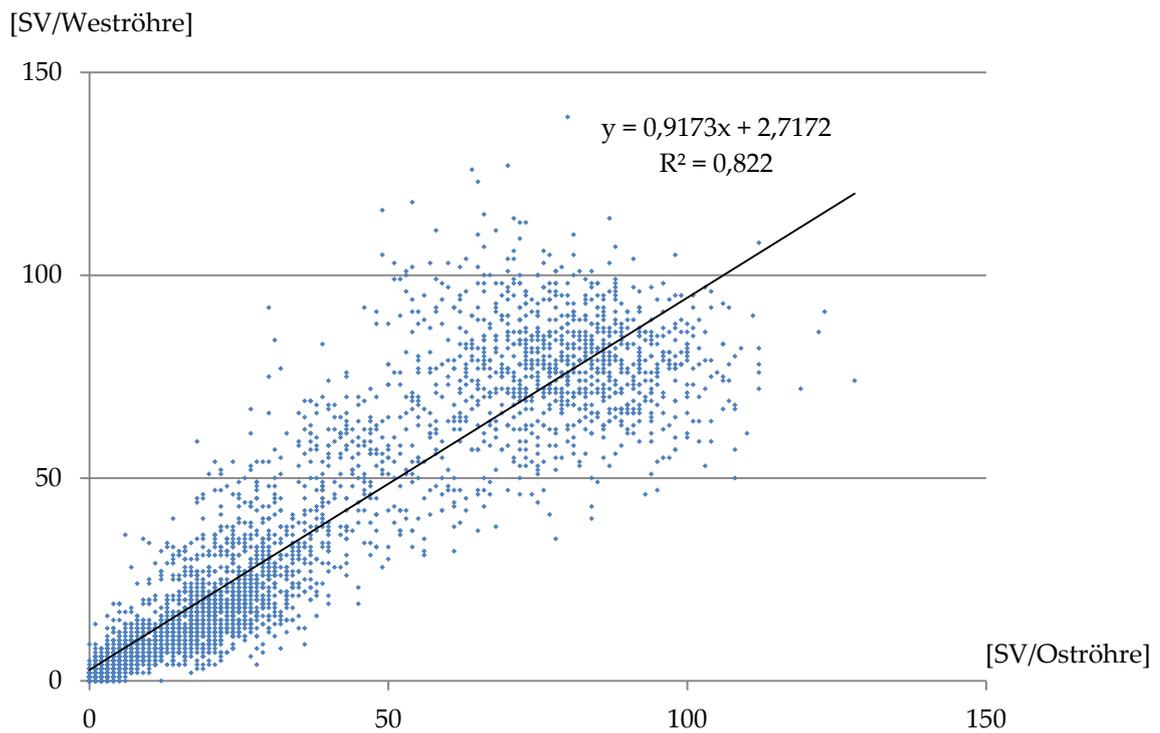


Abbildung C. 196: Korrelation Schwerverkehr Oströhre gegen Weströhre

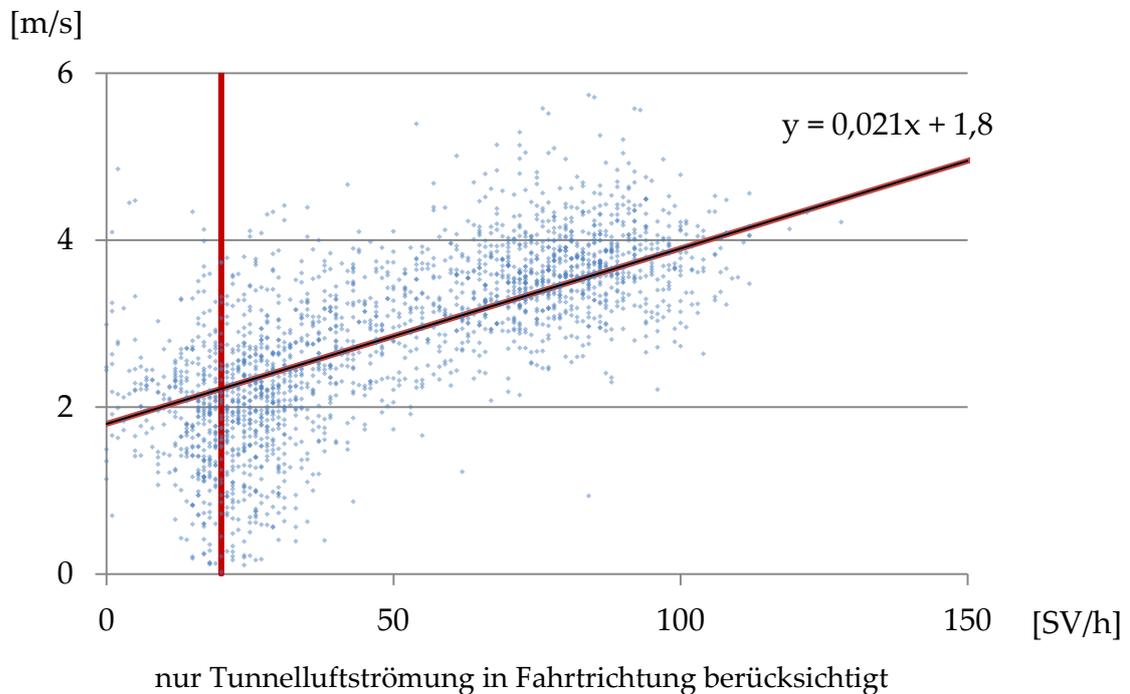


Abbildung C. 197: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Oströhre, ohne Berücksichtigung der Wochenenden

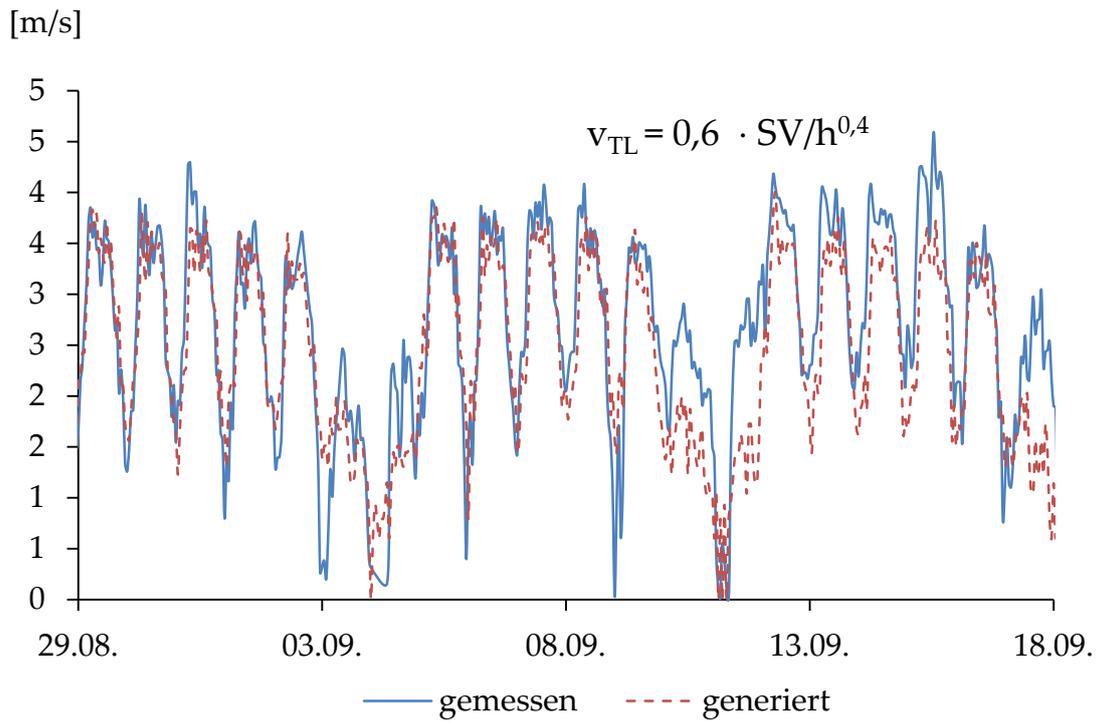


Abbildung C. 198: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Oströhre

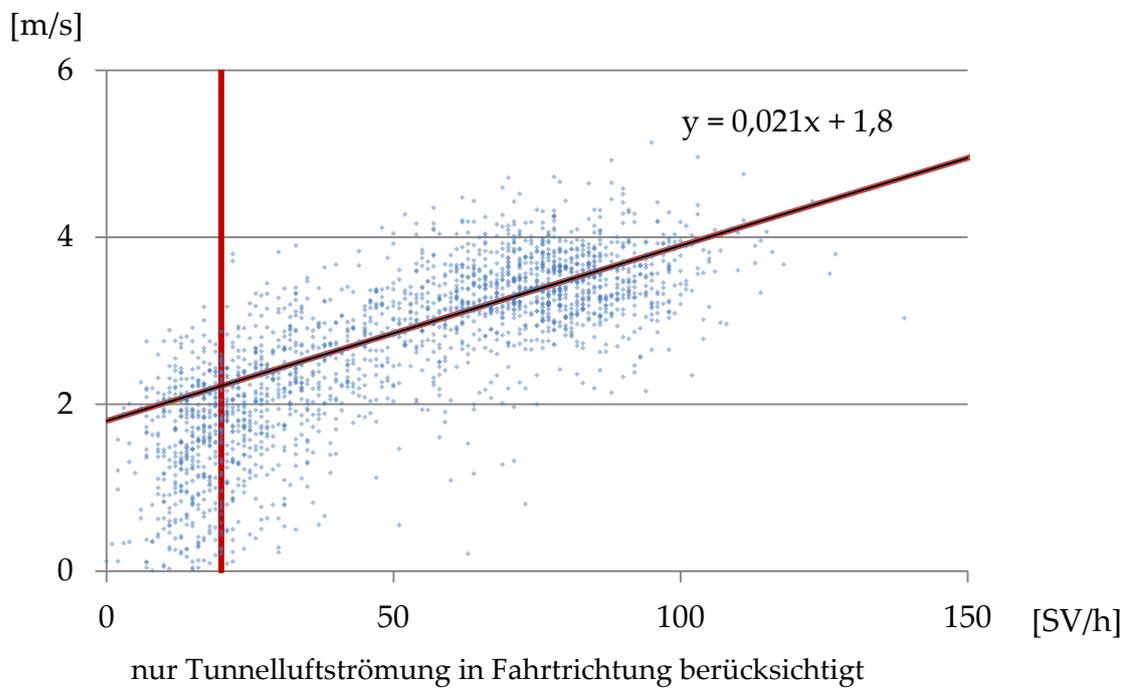


Abbildung C. 199: Korrelation Schwerverkehr gegen Tunnelluftströmung Weströhre, ohne Berücksichtigung der Wochenenden

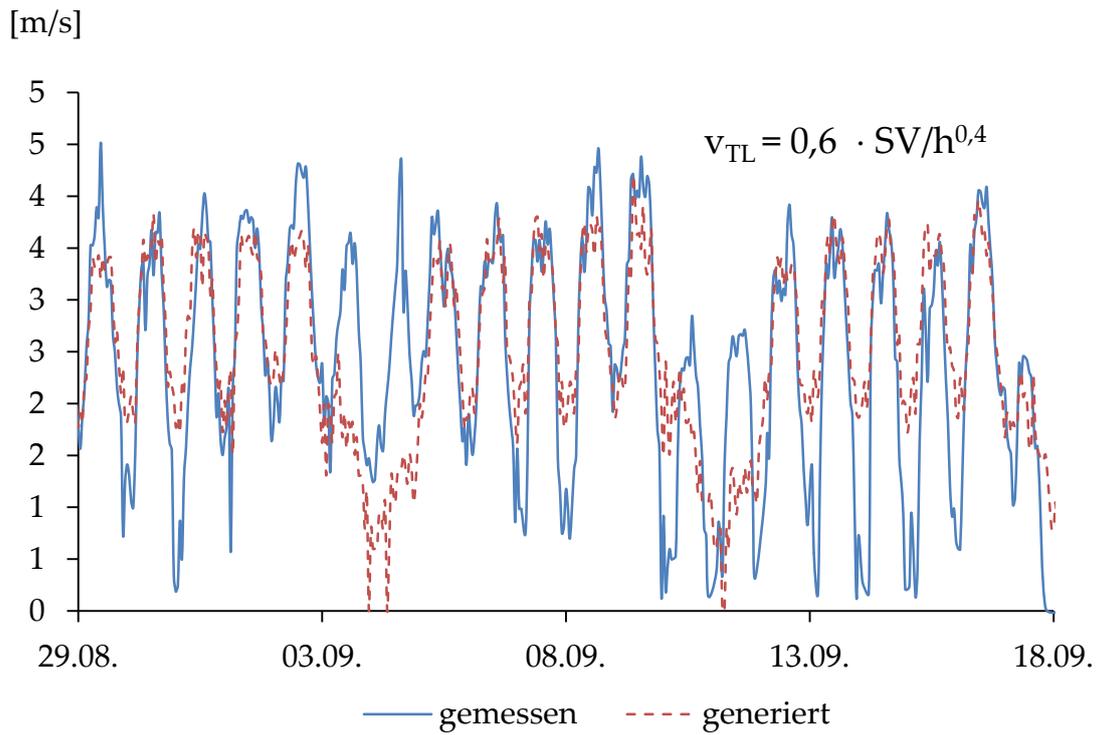


Abbildung C. 200: Synthetisch generierte Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit Weströhre

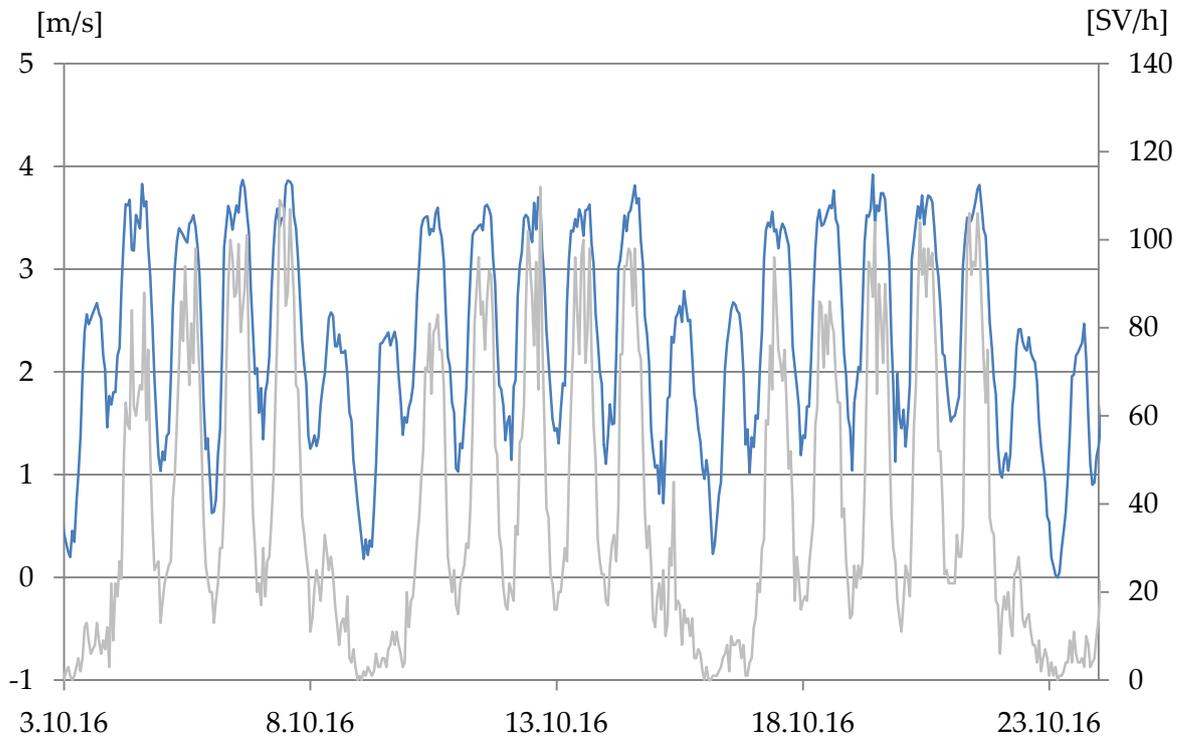


Abbildung C. 201: Anteil Schwerverkehr an Tunnelluftströmung

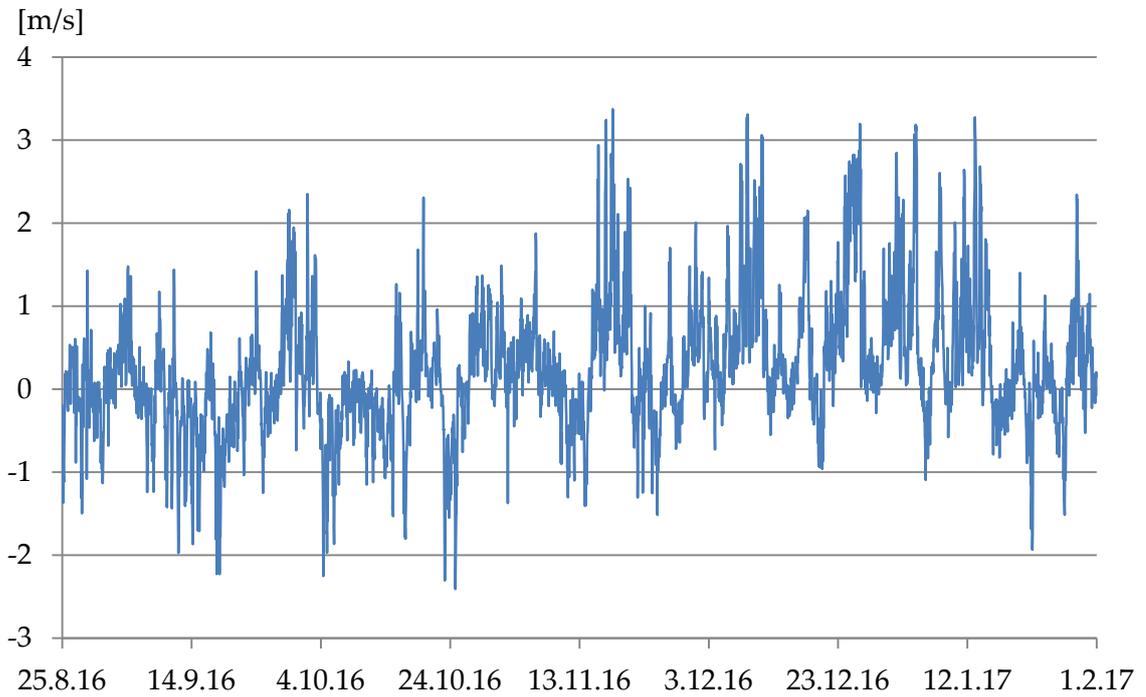


Abbildung C. 202: Grundströmung

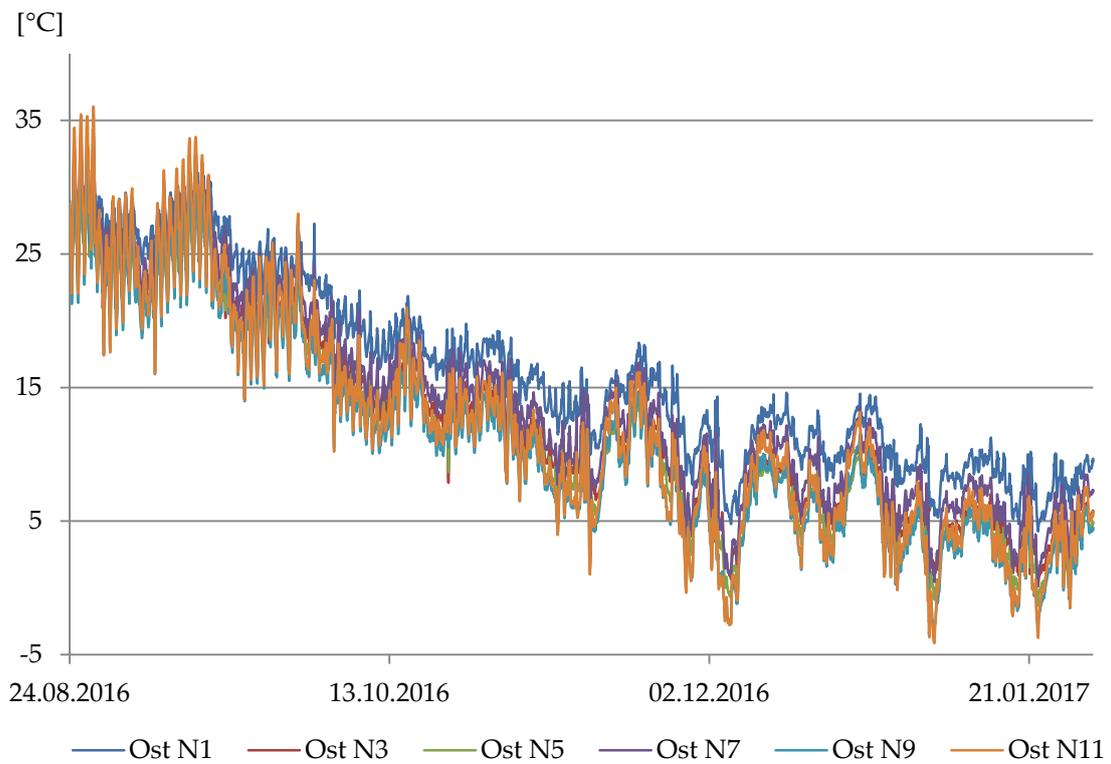


Abbildung C. 203: Tunnellufttemperatur Oströhre im Jahresgang

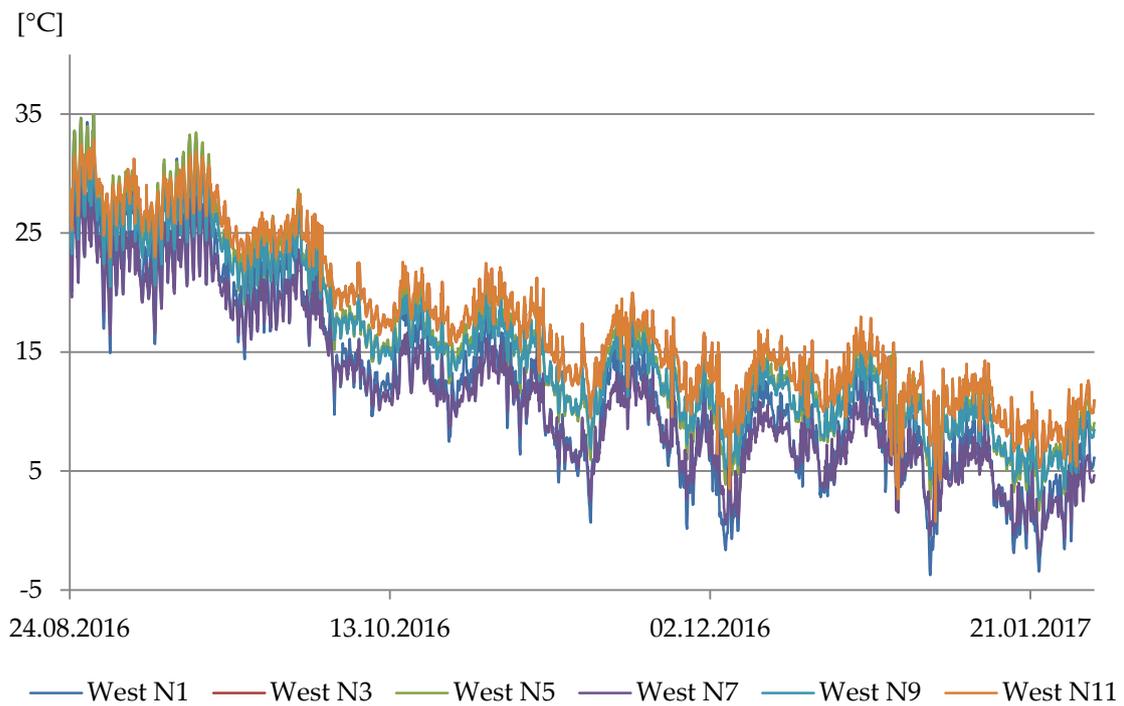


Abbildung C. 204: Tunnellufttemperatur Weströhre im Jahresgang

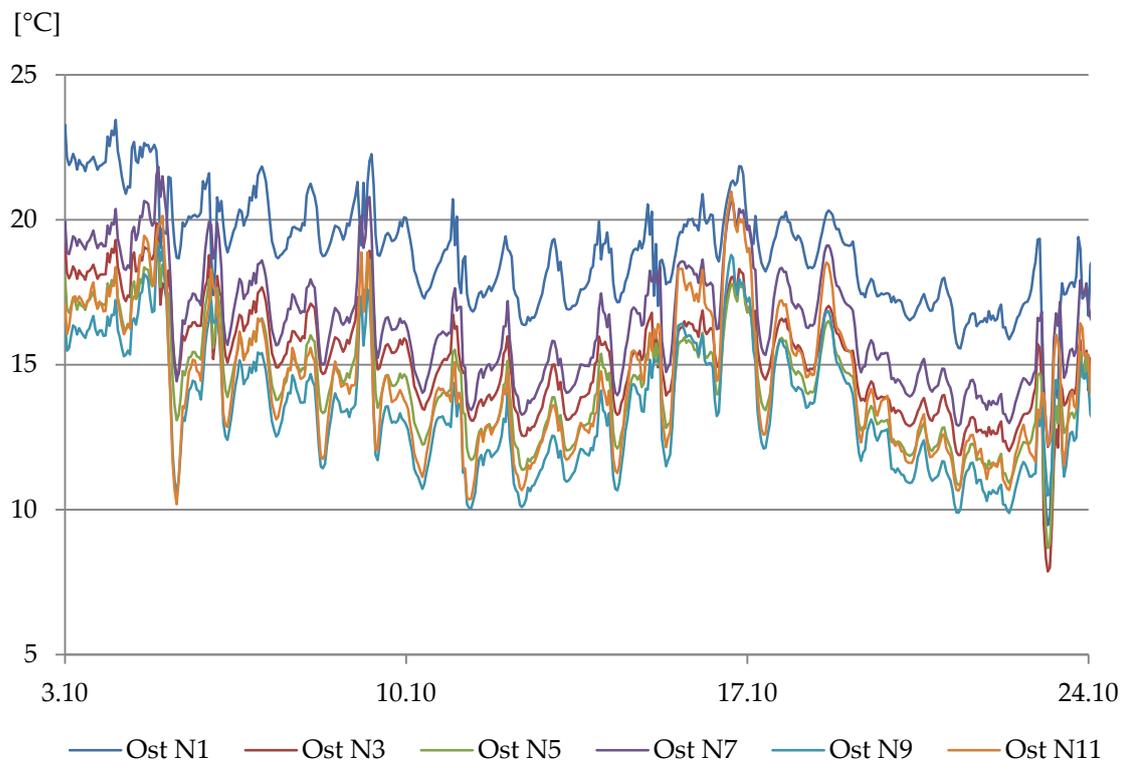


Abbildung C. 205: Tunnellufttemperatur Oströhre im Wochengang

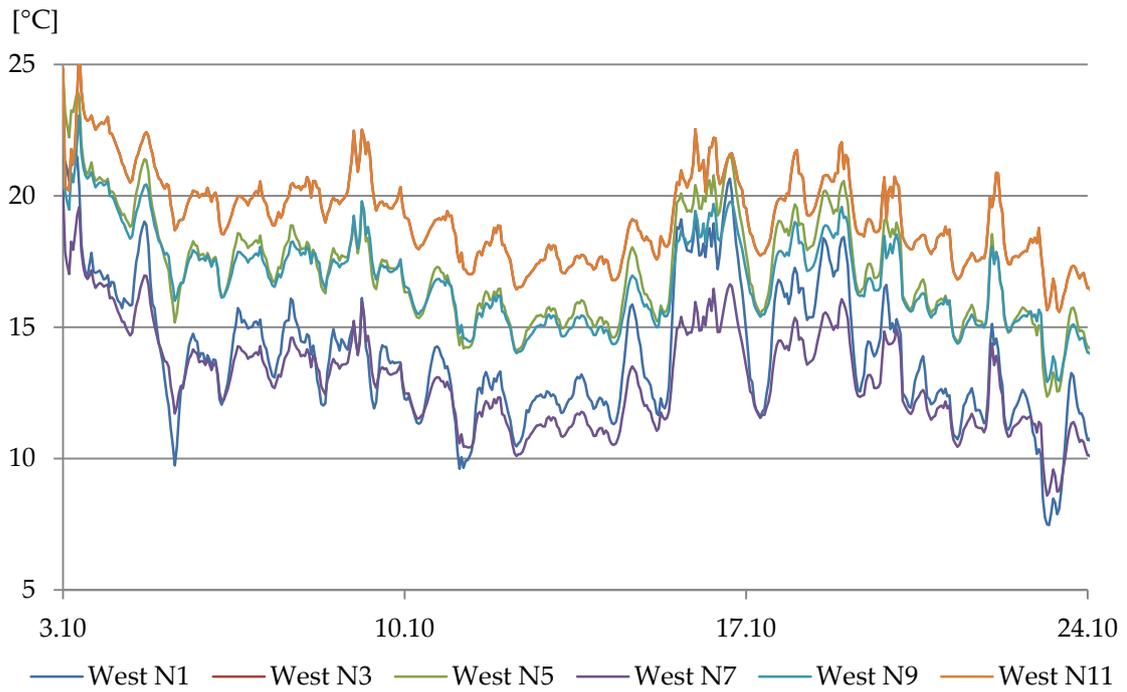


Abbildung C. 206: Tunnellufttemperatur Weströhre im Wochengang

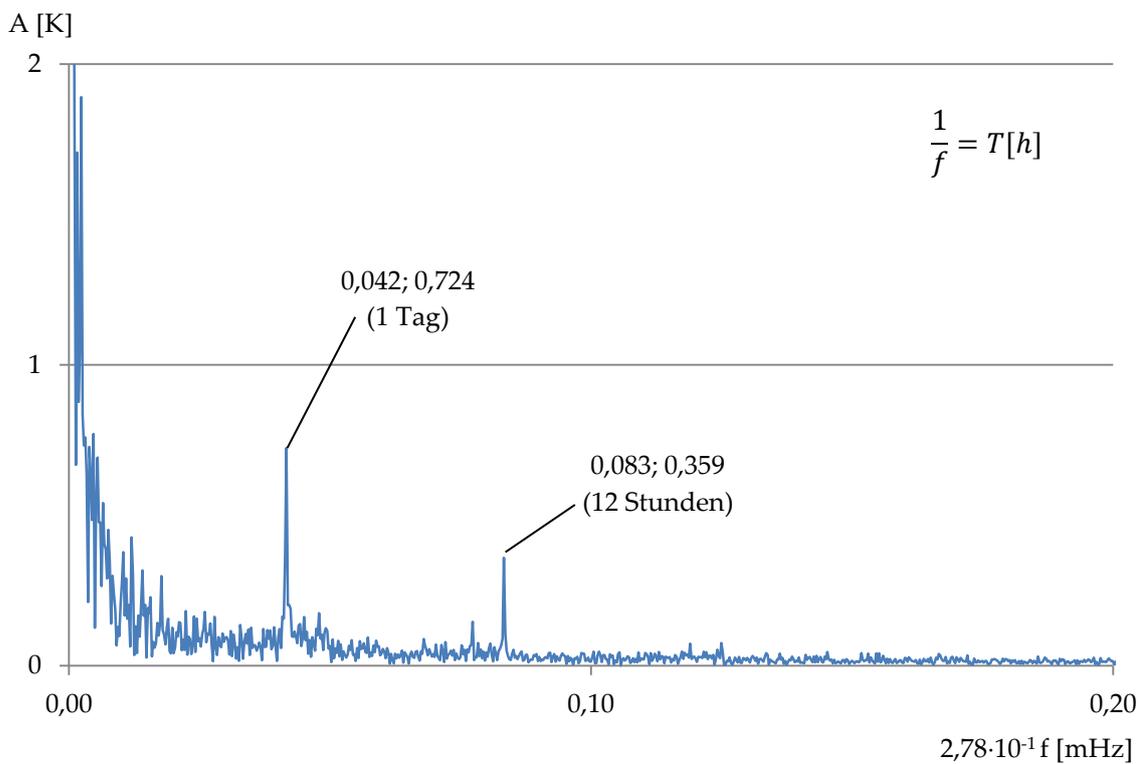


Abbildung C. 207: FFT - Tunnellufttemperatur Oströhre

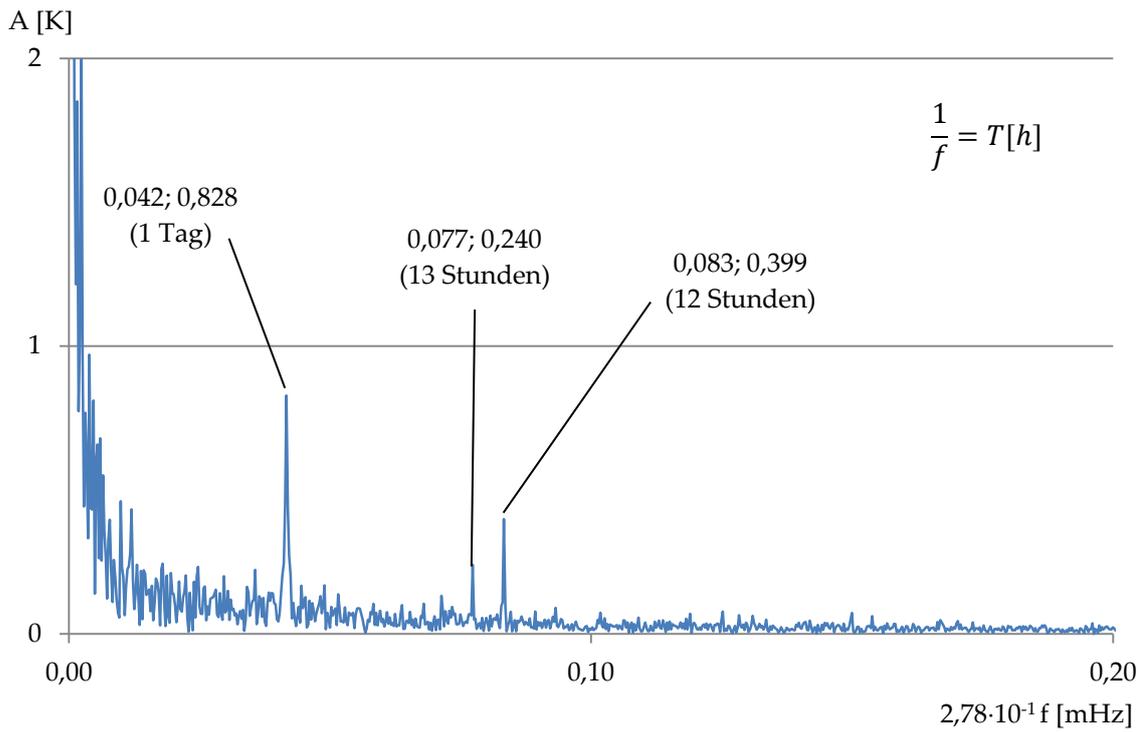


Abbildung C. 208: FFT - Tunnellufttemperatur Weströhre

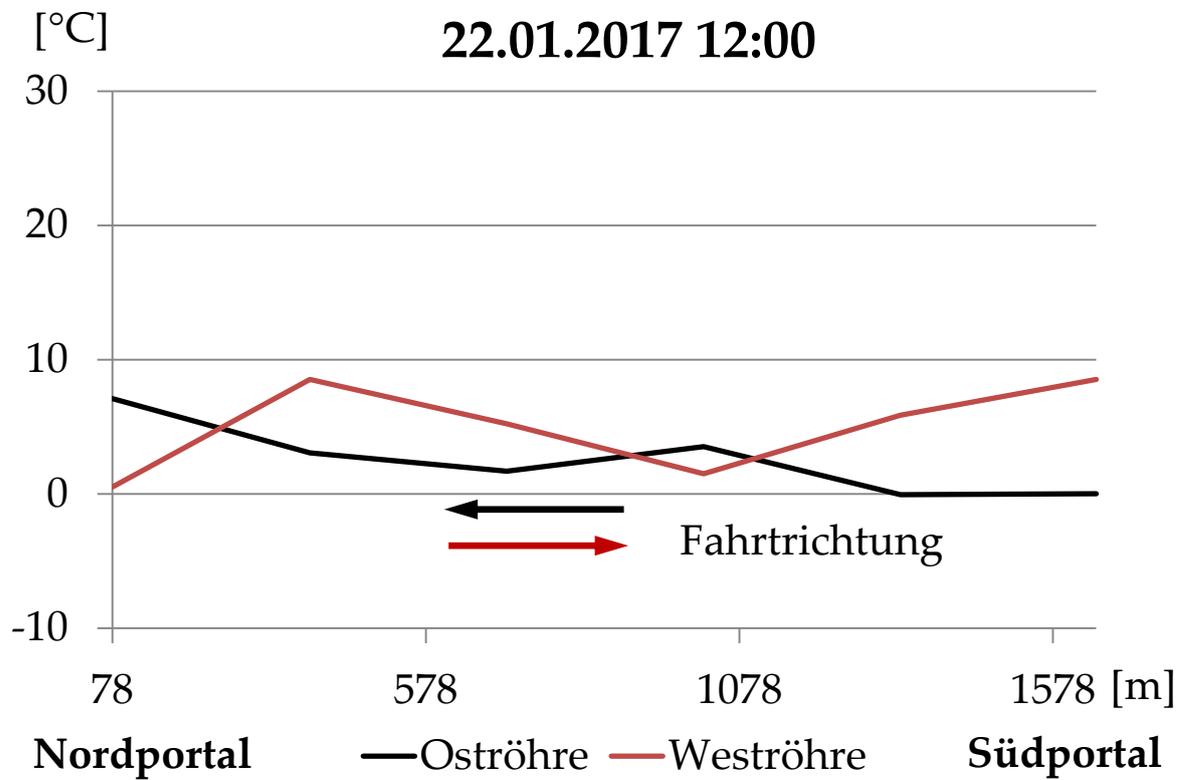


Abbildung C. 209: Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse, exemplarisch

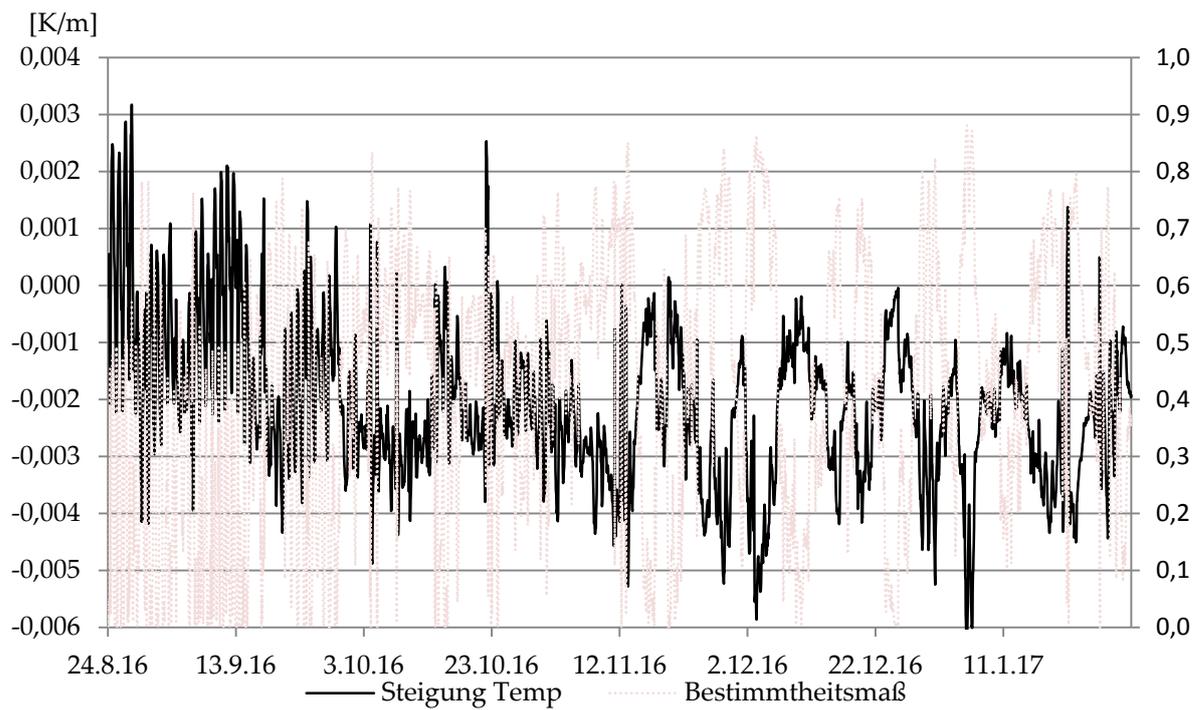


Abbildung C. 210: Steigung der Temperaturgradienten Oströhre im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

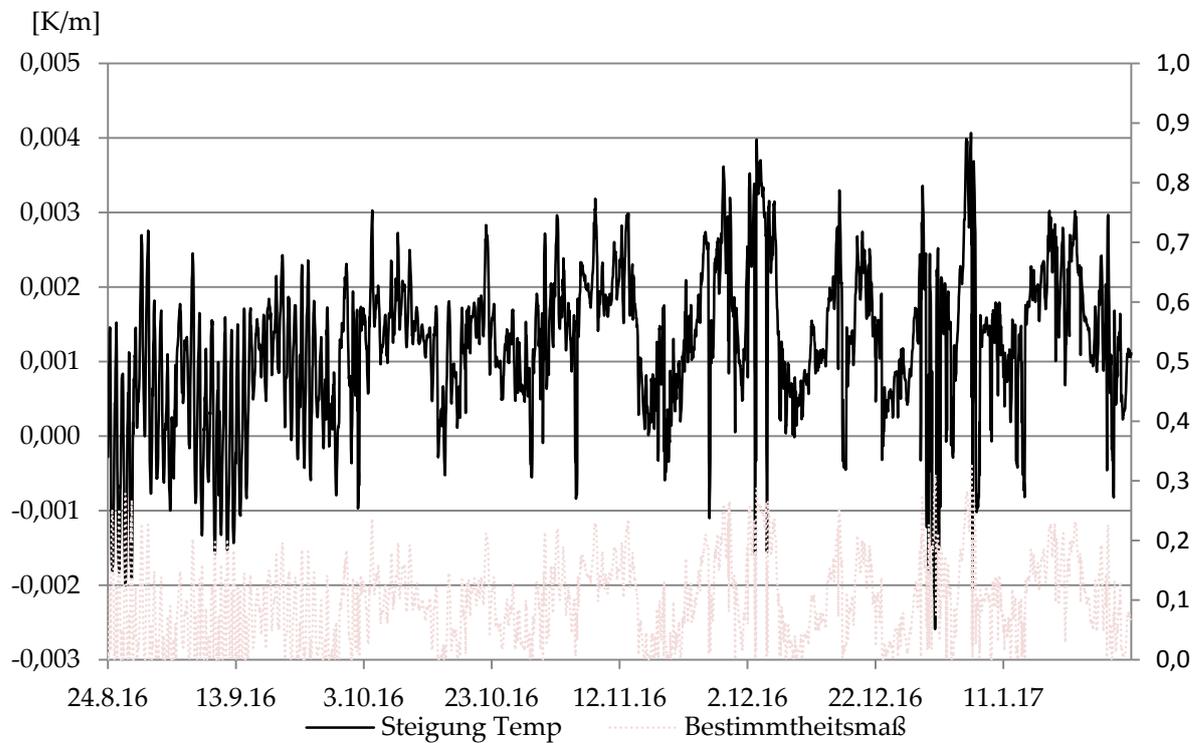


Abbildung C. 211: Steigung der Temperaturgradienten Weströhre im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

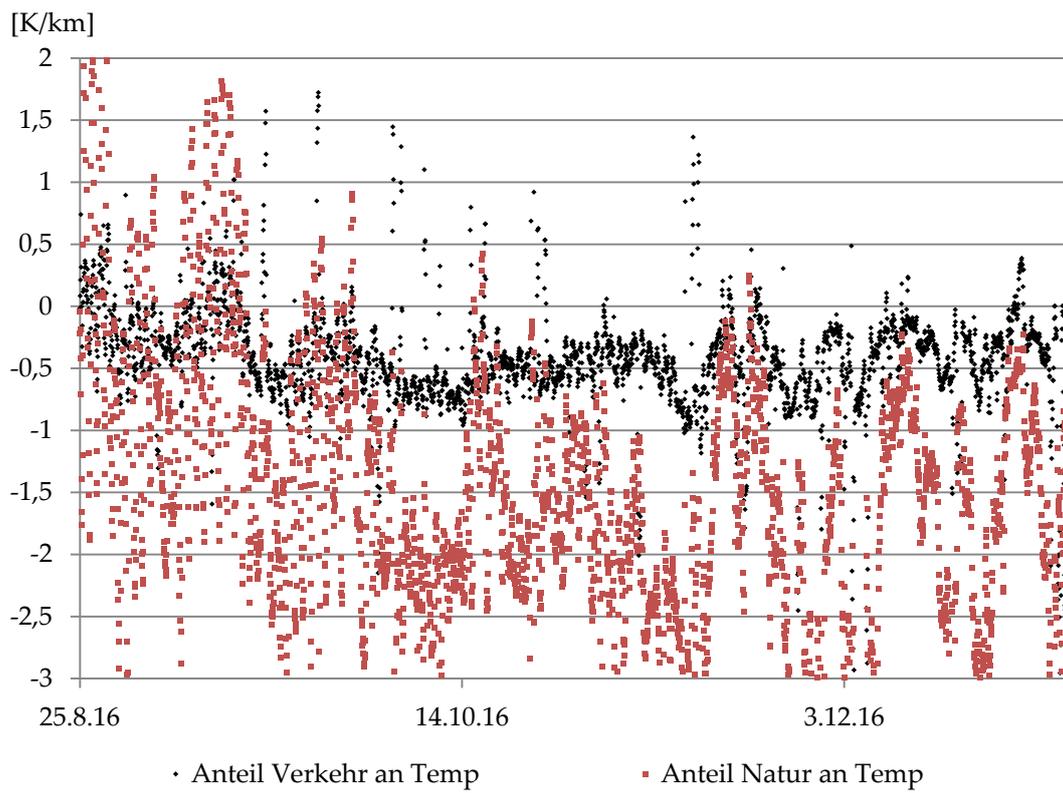


Abbildung C. 212: Anteile an Temperaturgradienten getrennt nach Fahrzeugen und sonstigen Einflüssen

## Tunnel Hornberg



|                                       |                 |                           |                         |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Baden-Württemb. | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 1                       |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | B33             | <u>Länge i.M.:</u>        | 1885 m                  |
| <u>Gradiente:</u>                     | 2,1% Norden     | <u>Überdeckung:</u>       | 50 m                    |
| <u>Kfz/24h (2016):</u>                | 5000            | <u>Luftquerschnitt</u>    | 50 m <sup>2</sup>       |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | ja              |                           | 06.11.2006 - 18.08.2011 |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja              |                           | 06.11.2006 - 18.08.2011 |



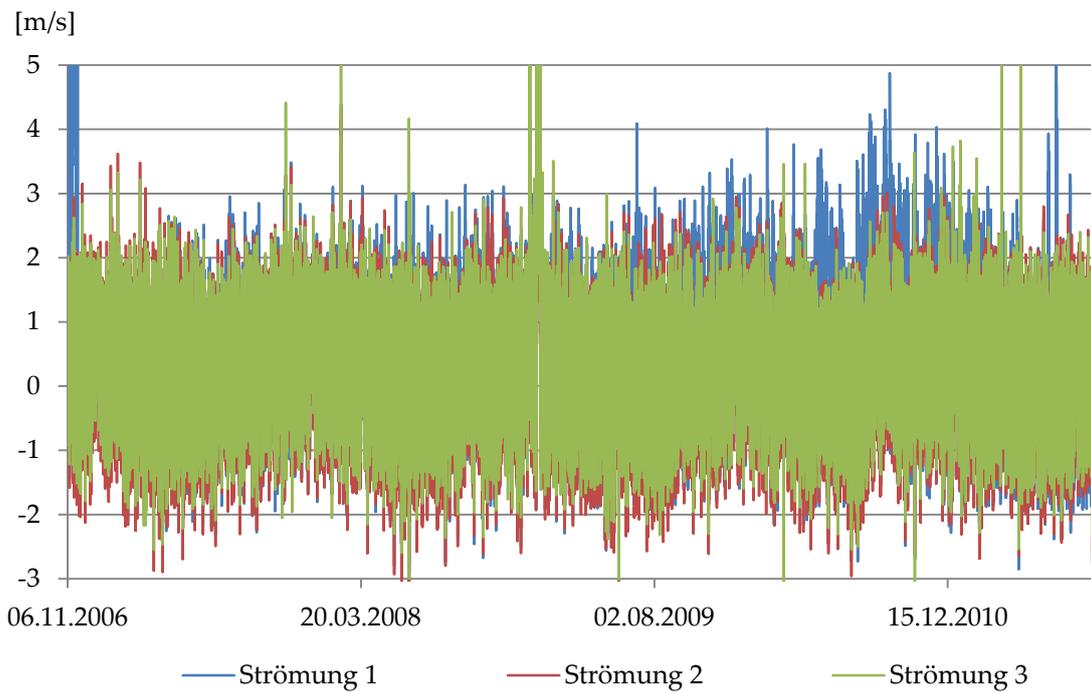


Abbildung C. 213: Tunnelluftströmung im Jahrgang

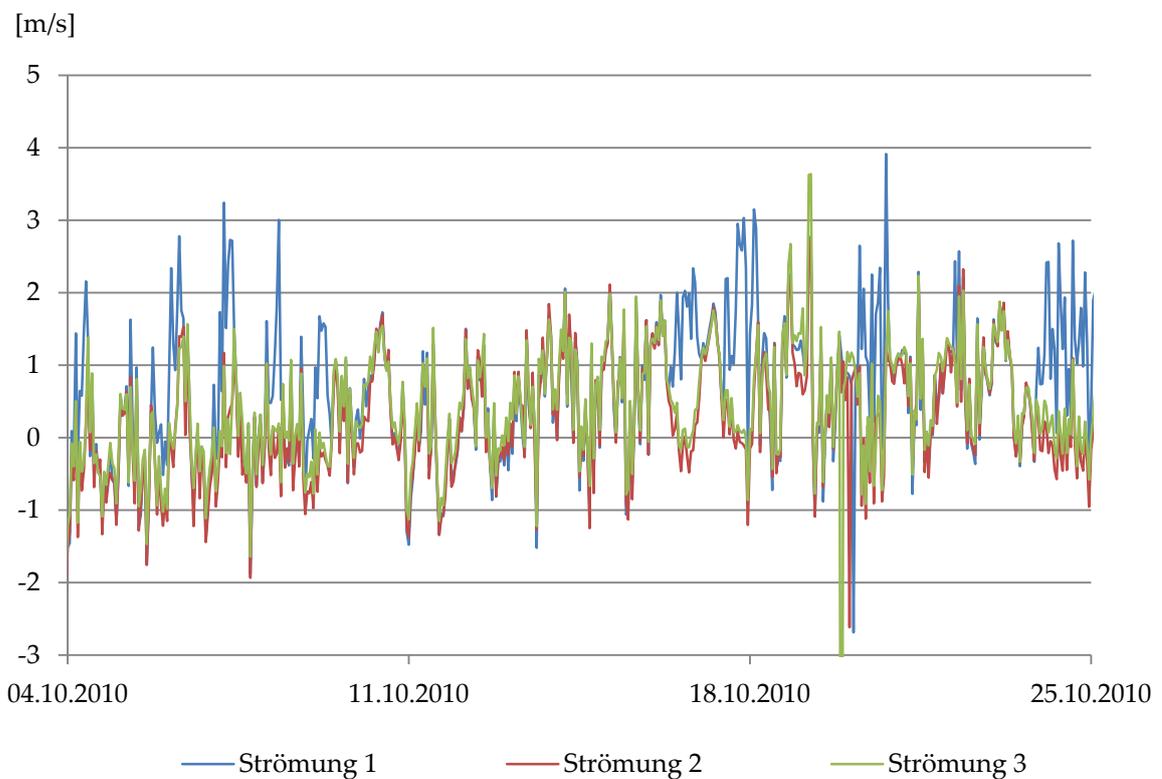


Abbildung C. 214: Tunnelluftströmung im Wochengang

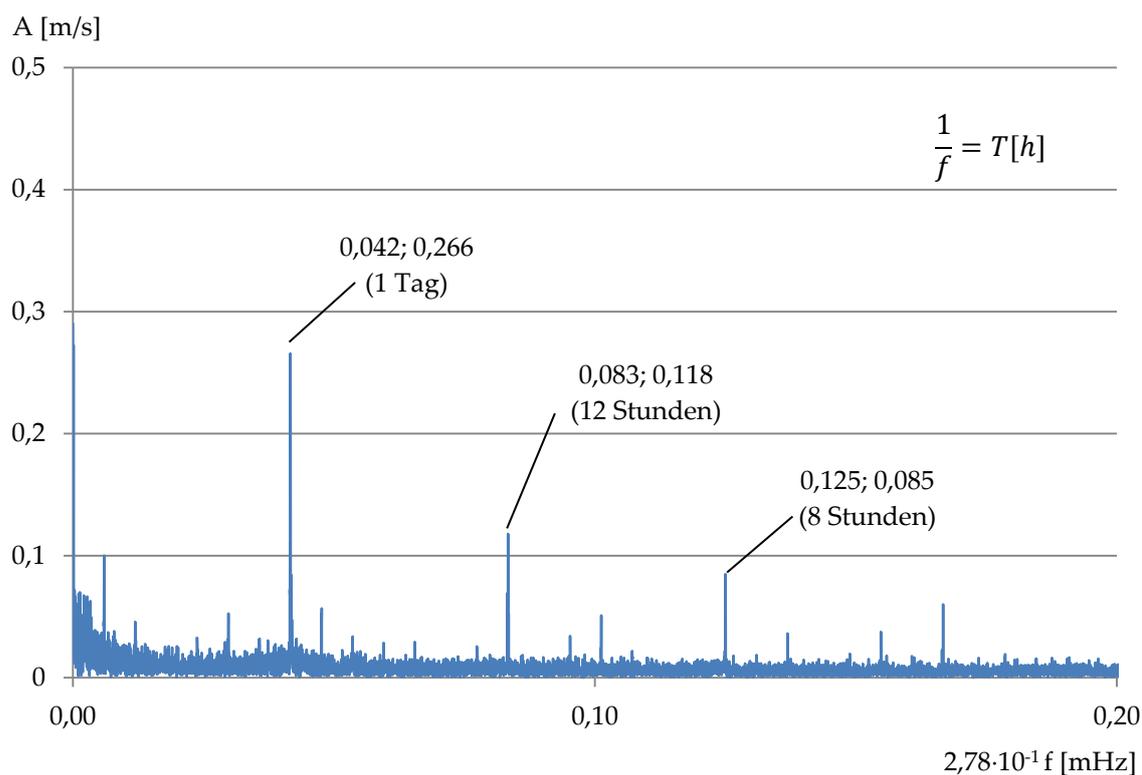


Abbildung C. 215: FFT - Tunnelluftströmung

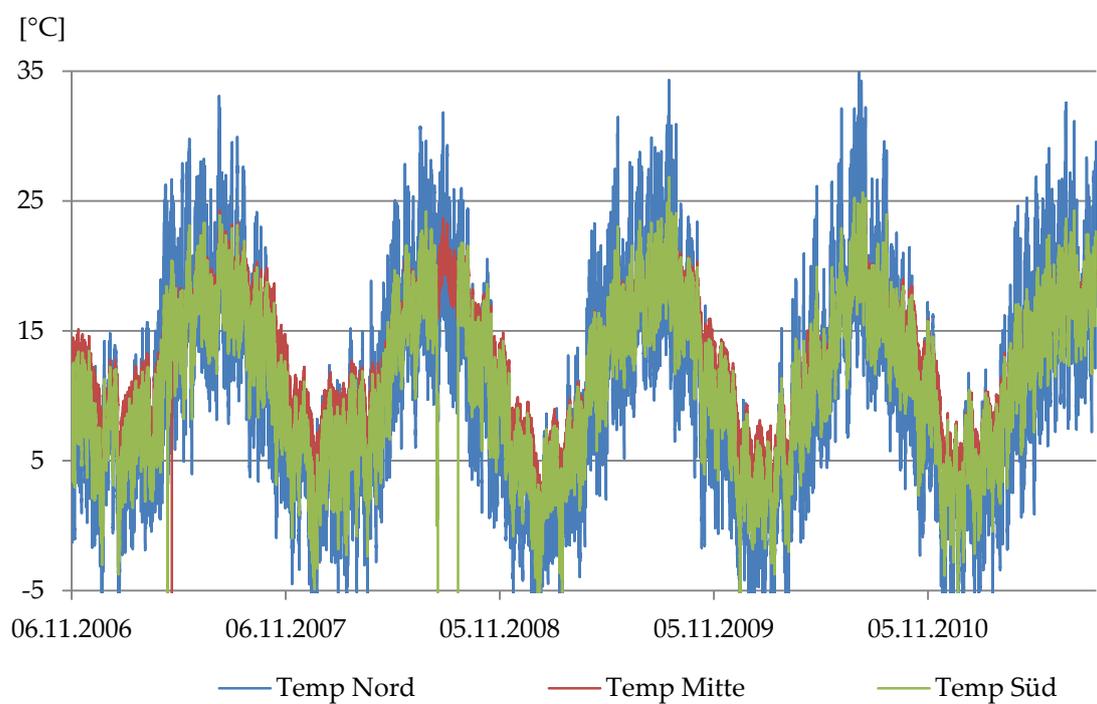


Abbildung C. 216: Tunnellufttemperaturen im Jahresgang

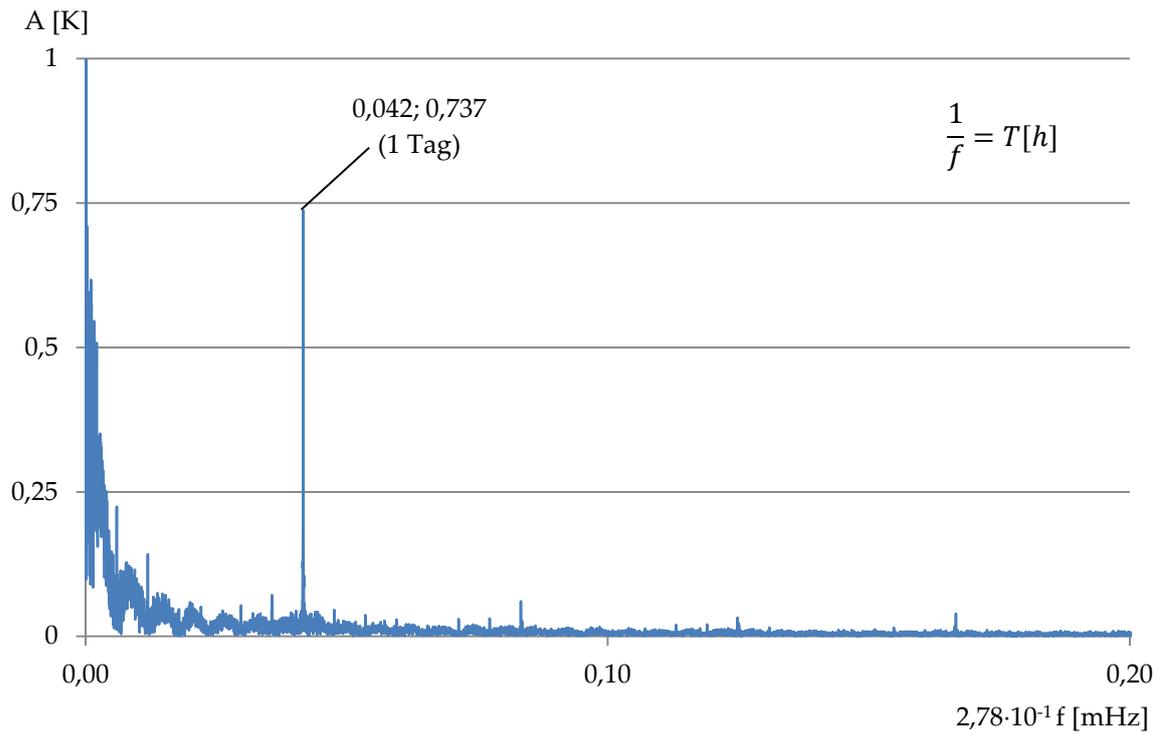


Abbildung C. 217: FFT - Tunnellufttemperatur

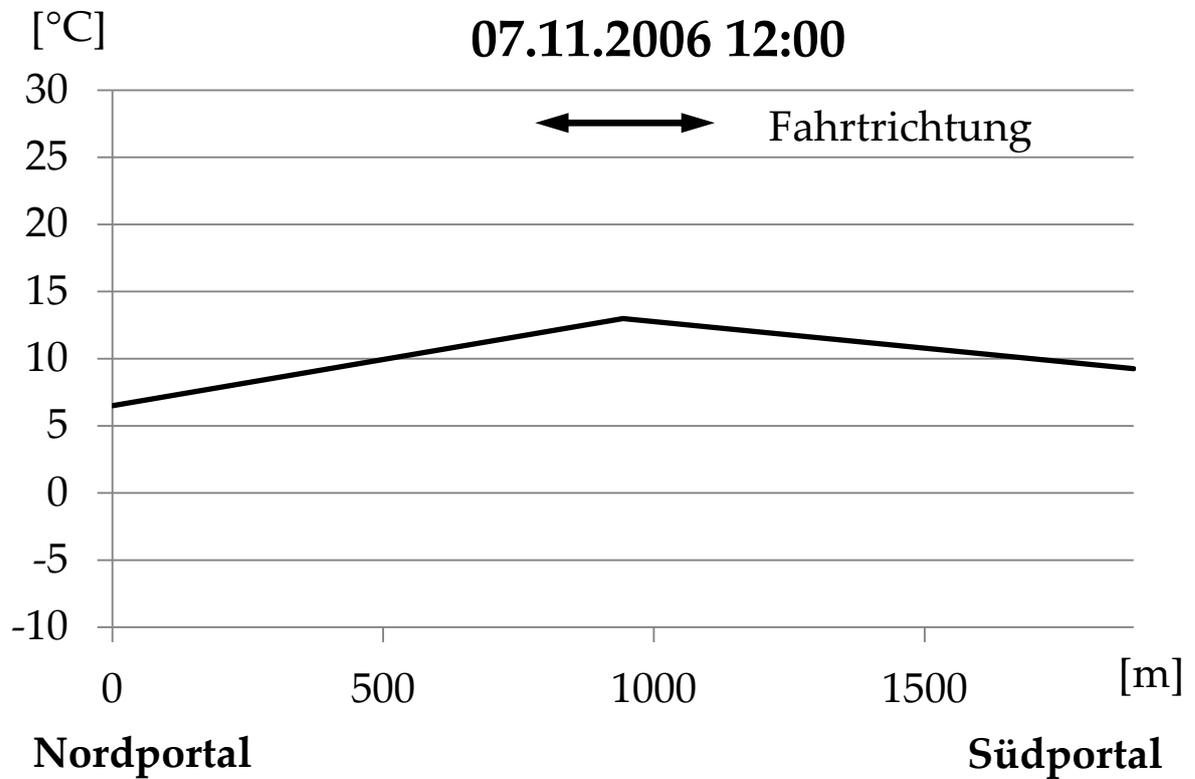


Abbildung C. 218: Temperaturverteilung entlang der Tunnelachse, exemplarisch

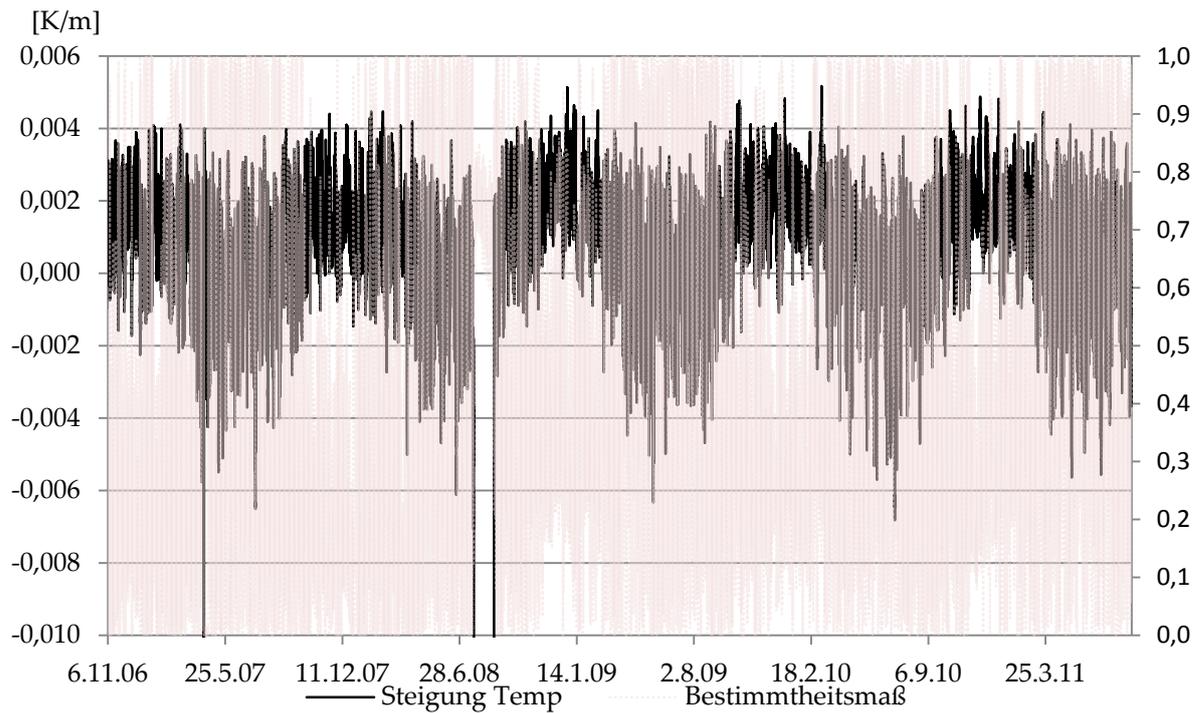


Abbildung C. 219: Steigung der Temperaturgradienten im Jahresgang, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der linearen Regression

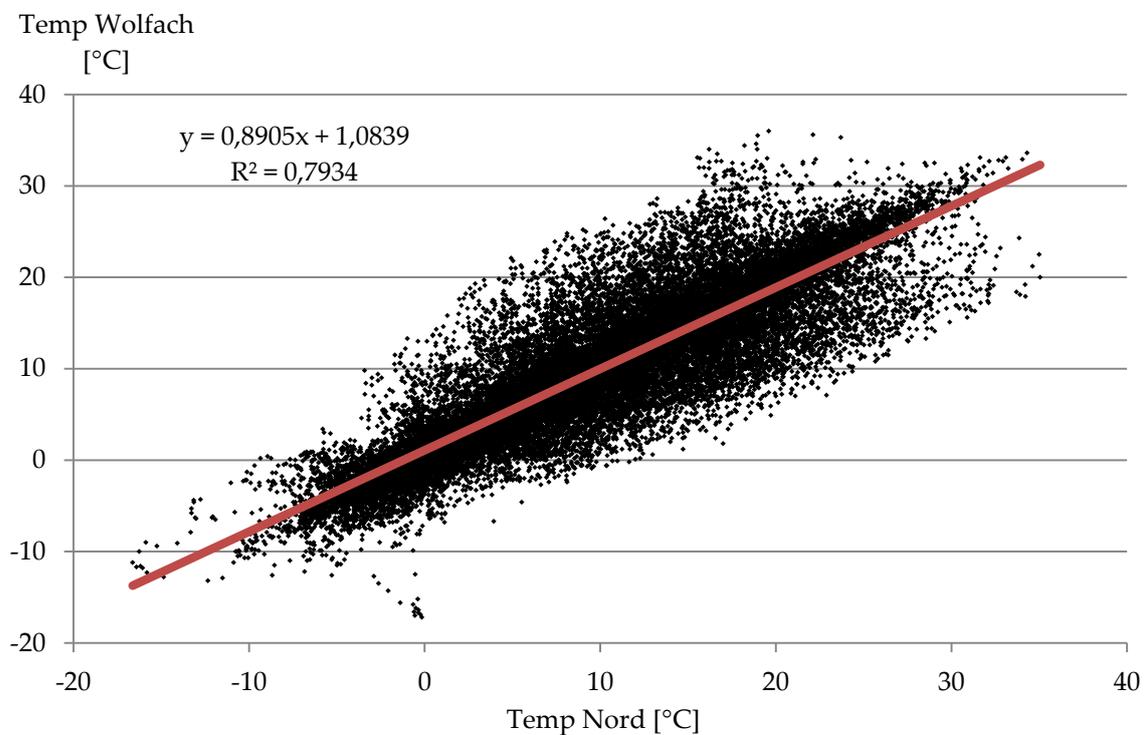


Abbildung C. 220: Korrelation zwischen DWD Wolfach und Tunnellufttemperatur Nord (Entfernung Lufflinie ca. 7,7 km)

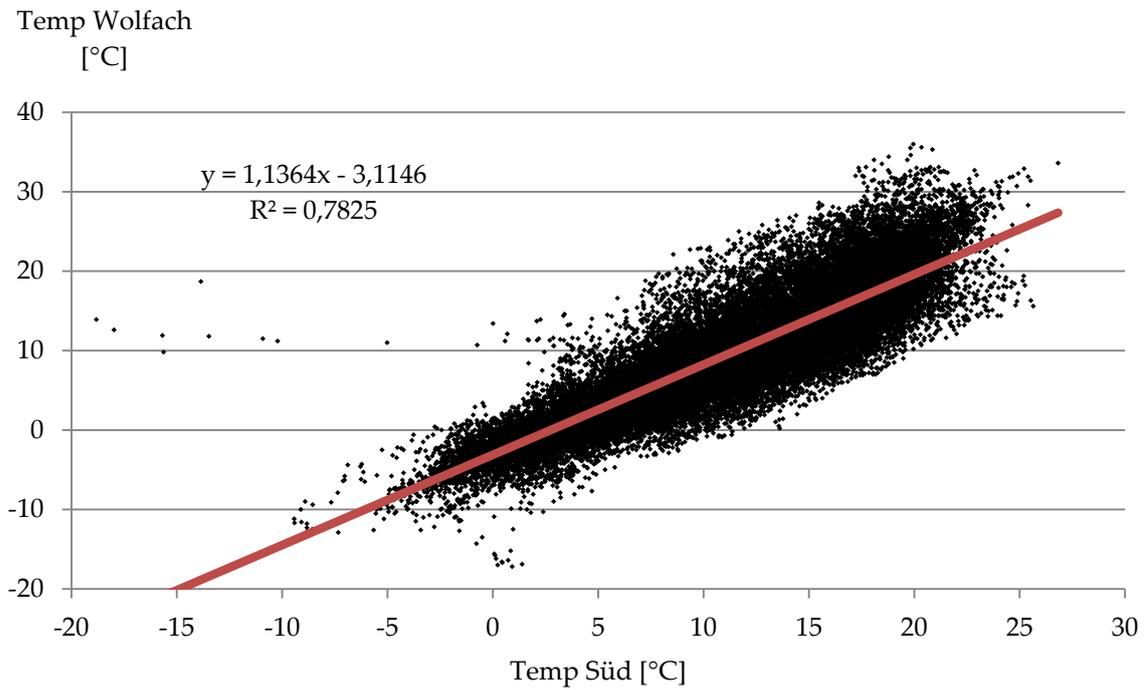


Abbildung C. 221: Korrelation zwischen DWD Wolfach und Tunnellufttemperatur Nord (Entfernung Luftlinie ca. 9,5 km)

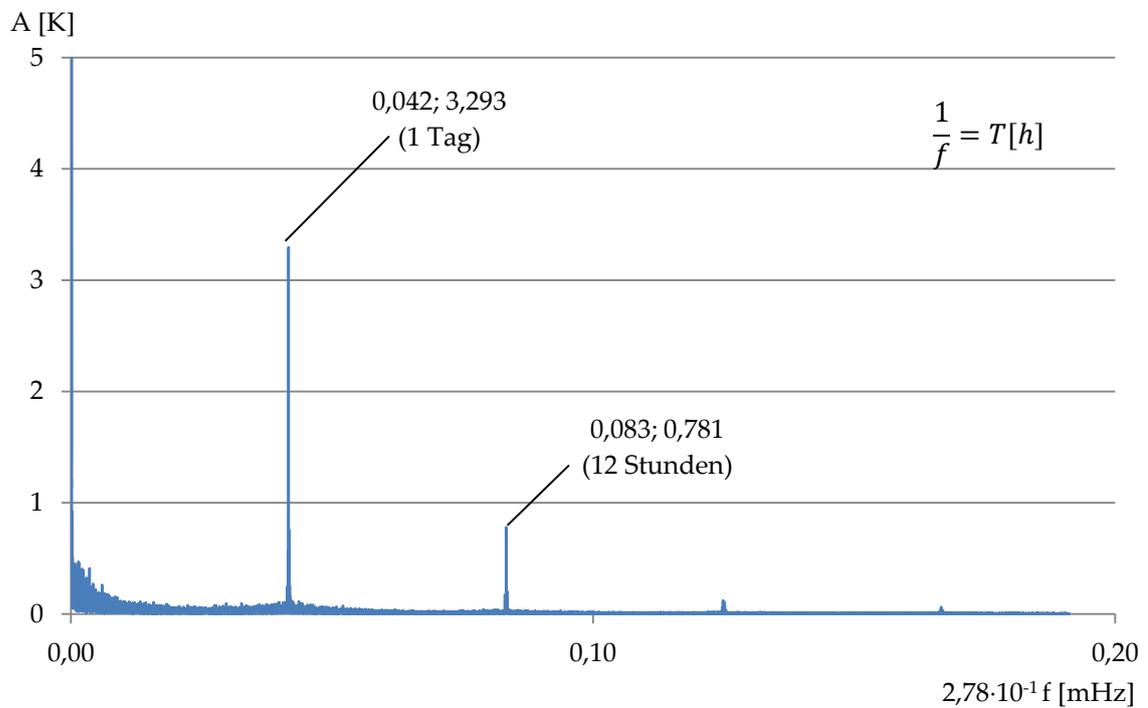
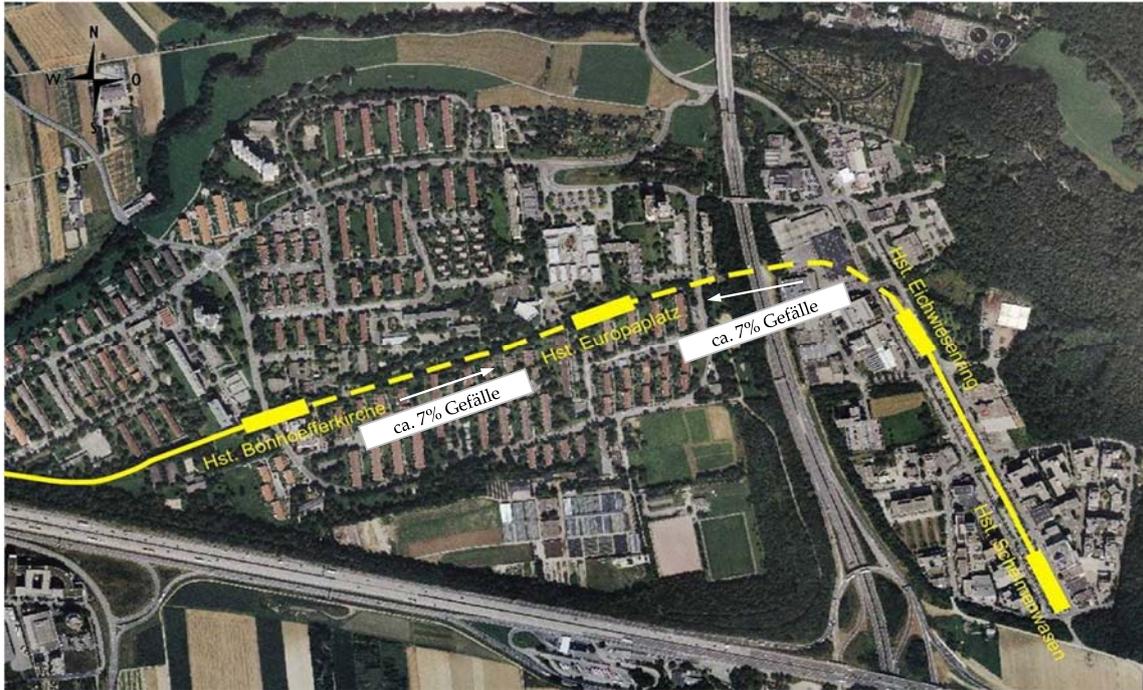


Abbildung C. 222: FFT - Tunnellufttemperatur 2m über Grund DWD Wolfach

## Tunnel Fasanenhof



|                                       |                 |                           |                         |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Baden-Württemb. | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 1                       |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | U6              | <u>Länge i.M.:</u>        | 367 m                   |
| <u>Gradiente:</u>                     | ~7% Wanne       | <u>Überdeckung:</u>       | 10 m                    |
|                                       |                 | <u>Luftquerschnitt</u>    | 41 m <sup>2</sup>       |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | ja              |                           | 12.04.2011 - 31.07.2017 |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | ja              |                           | 12.04.2011 - 31.07.2017 |



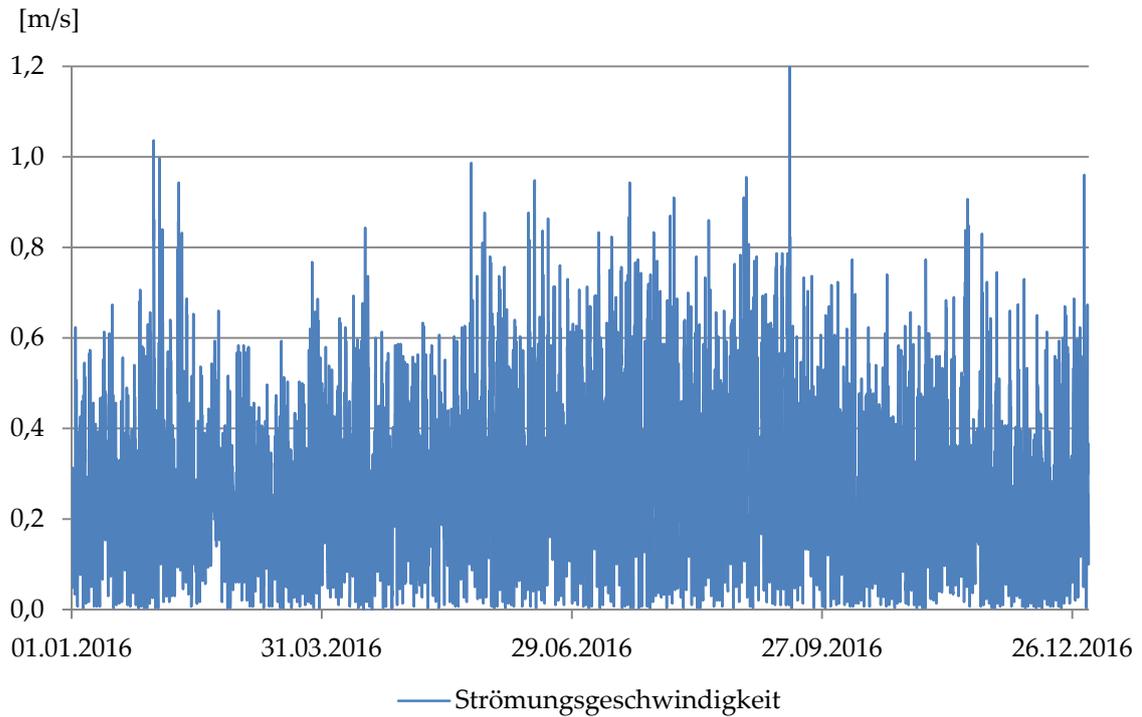


Abbildung C. 223: Tunnelluftströmung im Jahresgang

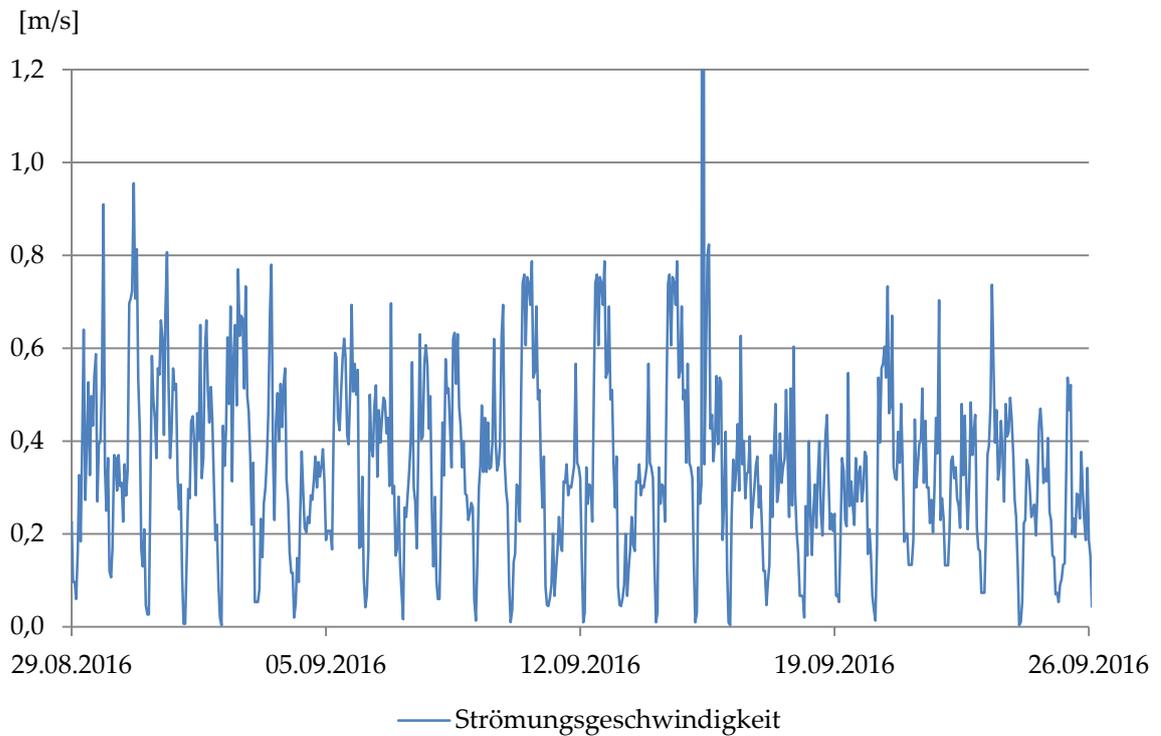


Abbildung C. 224: Tunnelluftströmung im Wochengang

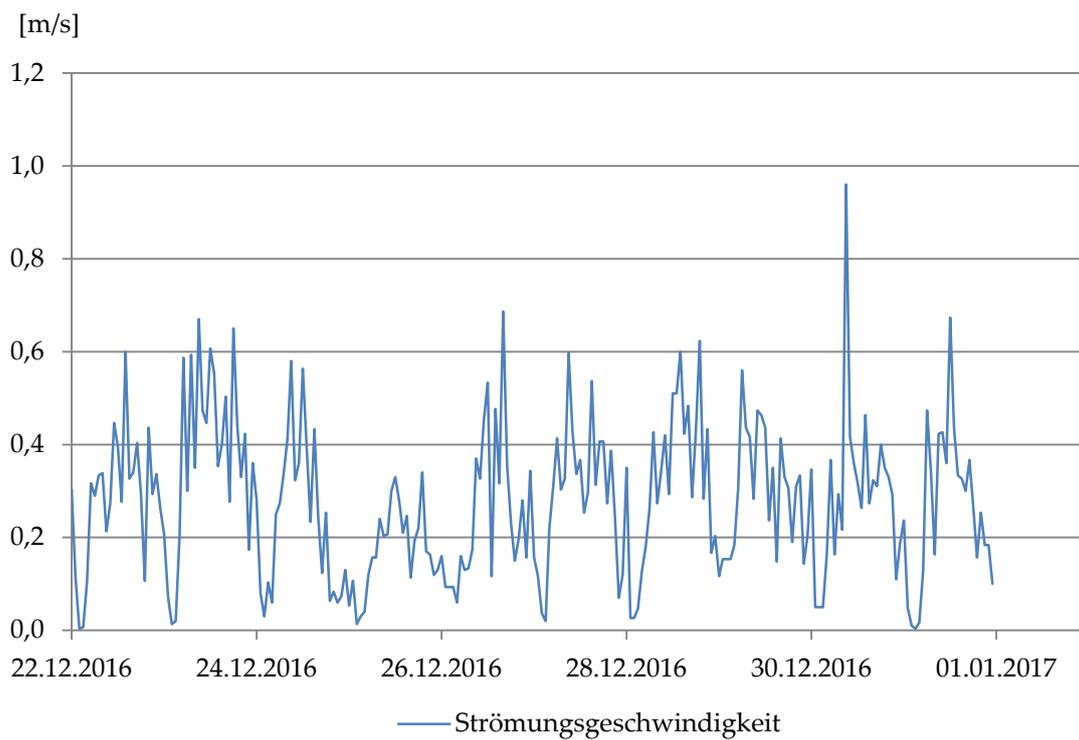


Abbildung C. 225: Tunnelluftströmung über Weihnachten

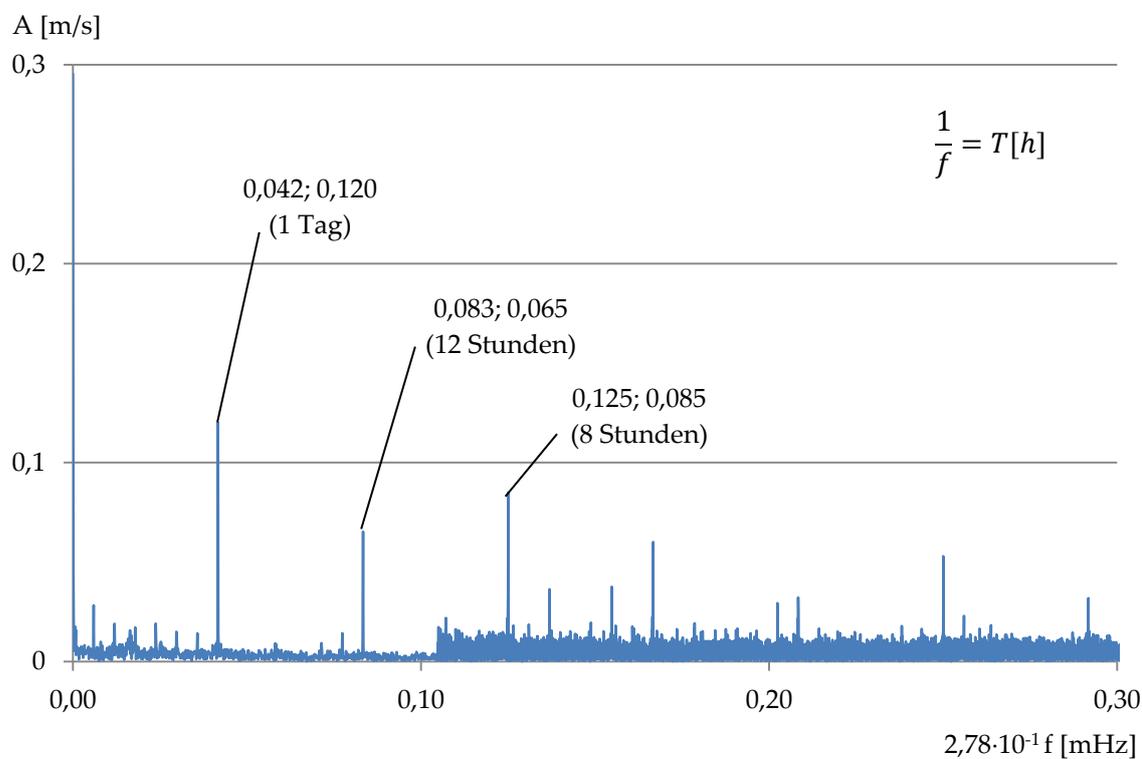


Abbildung C. 226: FFT - Tunnelluftströmung

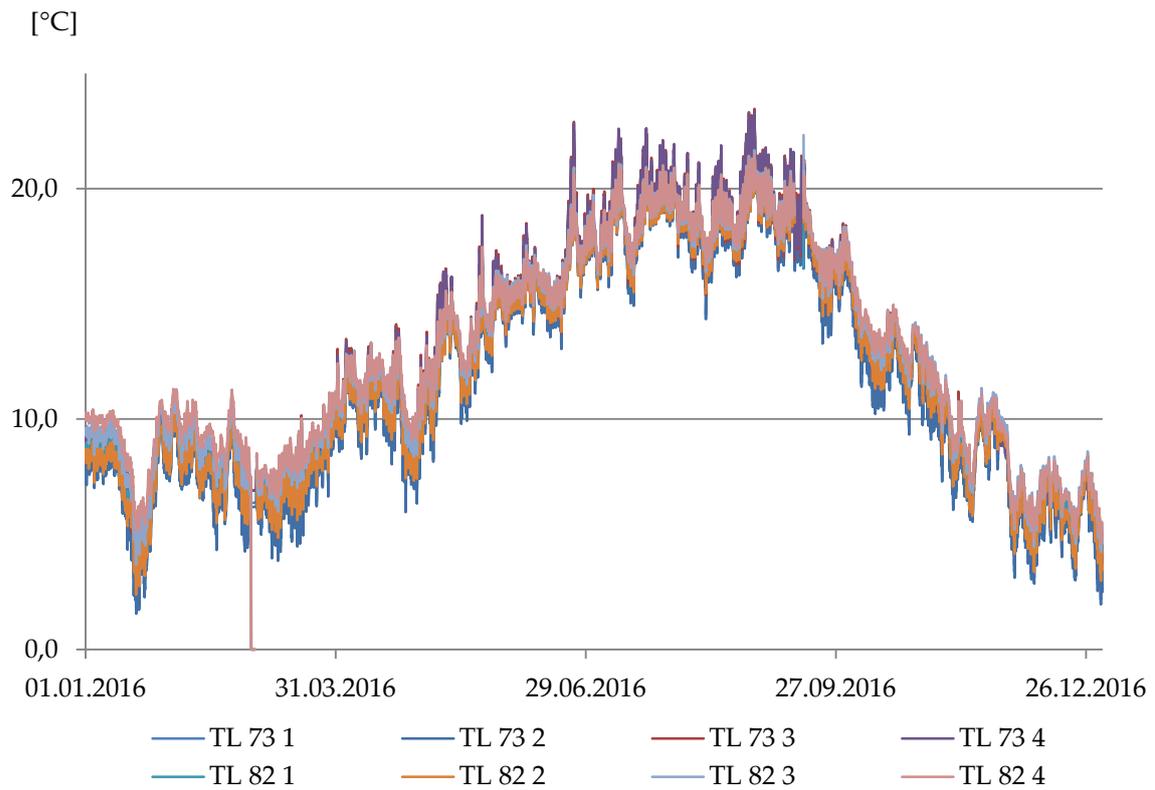


Abbildung C. 227: Tunnellufttemperatur im Jahresgang

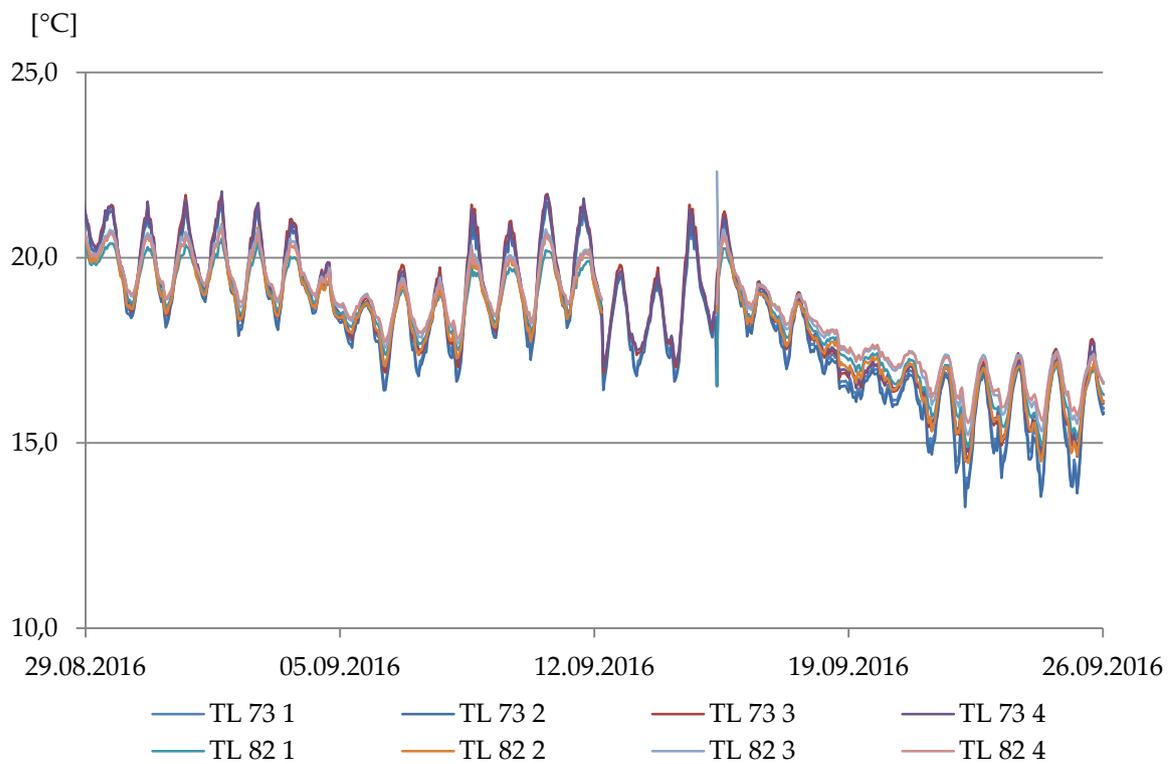


Abbildung C. 228: Tunnellufttemperatur im Wochengang

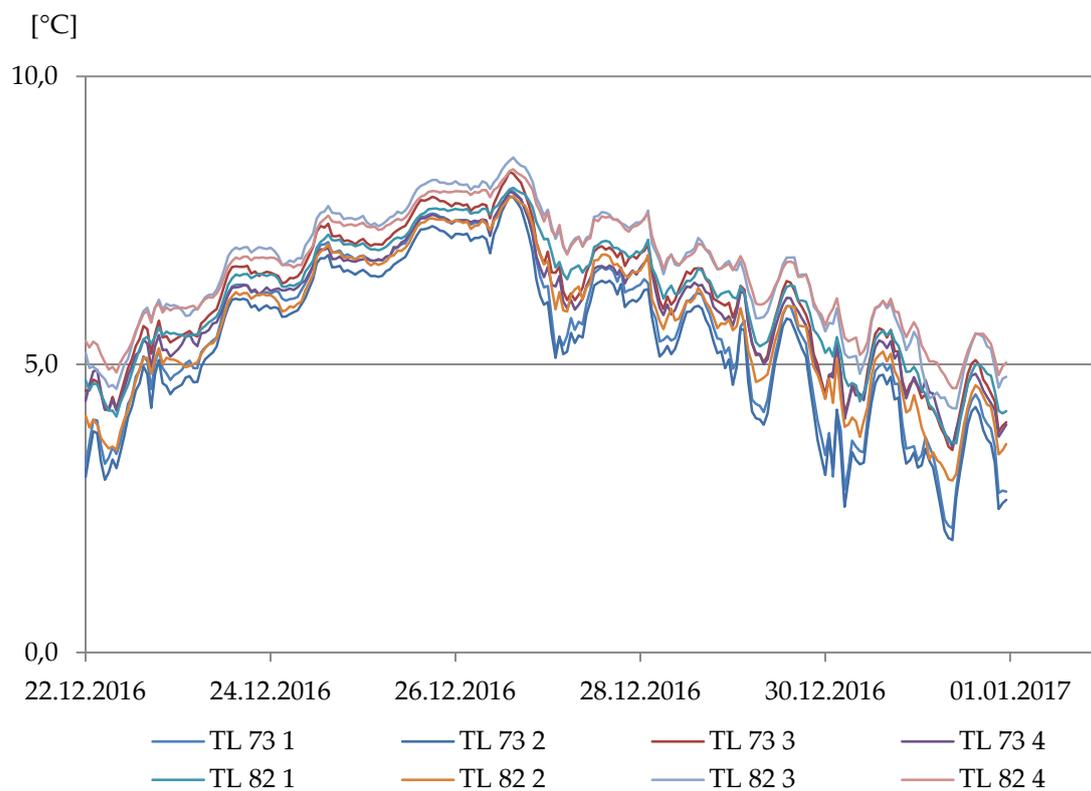


Abbildung C. 229: Tunnellufttemperatur über Weihnachten

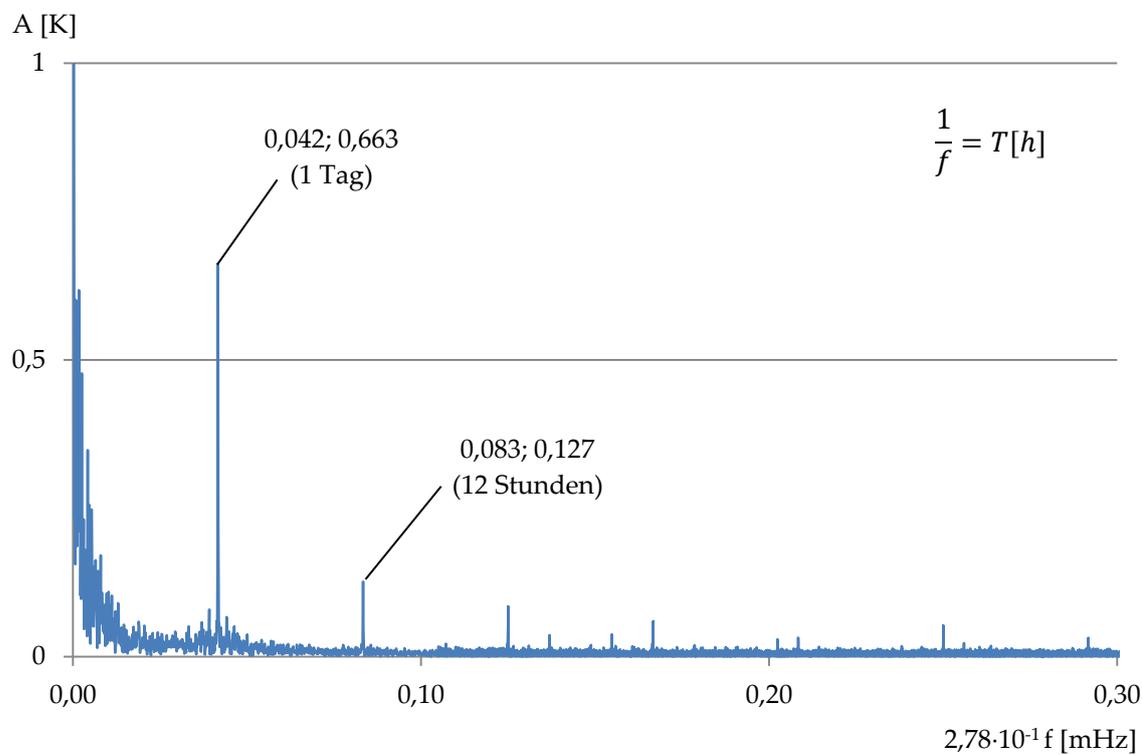


Abbildung C. 230: FFT - Tunnellufttemperatur

### Tunnel Jenbach



|                                       |           |                           |                   |
|---------------------------------------|-----------|---------------------------|-------------------|
| <u>Bundesland:</u>                    | Tirol     | <u>Anzahl der Röhren:</u> | 1                 |
| <u>Streckenbezeichnung:</u>           | 330 01    | <u>Länge i.M.:</u>        | 3470 m            |
| <u>Gradiente:</u>                     | ~1% Wanne | <u>Überdeckung:</u>       | 16 m              |
|                                       |           | <u>Luftquerschnitt</u>    | 77 m <sup>2</sup> |
| <u>Temperaturmessdaten vorhanden:</u> | ja        | 19.08.2011 - 26.03.2014   |                   |
| <u>Strömungsmessdaten vorhanden:</u>  | nein      | 0                         |                   |



# Anhang D

## Anhang zu Kapitel 4.6

### D.1 Statischer Gebäudeenergiebedarf

Die Generierung des statischen Gebäudeenergiebedarfs erfolgt auf der Basis der [123] sowie den Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes [38]. Dieser Arbeit liegt eine Vorlage zur Generierung des jahreszeitlichen Gebäudeenergiebedarfs im .xls-Format bei, deren Nutzung im Folgenden beschrieben wird.

Zunächst sind die Klimadaten der Testreferenzjahre über das online-Portal des Deutschen Wetterdienstes (Stichwort: 'Testreferenzjahre') zu beziehen. Nach dem Entpacken der Daten ist zu entscheiden, für welches Klimaszenario die Simulation der TGTA durchgeführt werden soll:

- Gegenwartsszenario
  - Mittlere Jahrestemperatur
  - Schwerpunkt Wintertemperatur
  - Schwerpunkt Sommertemperatur
- Zukunftsszenario
  - Mittlere Jahrestemperatur
  - Schwerpunkt Wintertemperatur
  - Schwerpunkt Sommertemperatur

Der entsprechende Datensatz ist in das Tabellenblatt 'Rohdaten' zu übernehmen, hierbei ist darauf zu achten, dass sich durch mögliche Anpassungen der Struktur der Klimadaten die Spaltenreihenfolge nicht geändert hat. Nach dem Einfügen des Testreferenzjahres werden die Typentage für den Gesamtzeitraum ermittelt (Tabellenblatt 'Typentagkategorie'). Im Tabellenblatt 'Tagesenergie' ist der Tagesenergiebedarf für die entsprechenden Typentagkategorien zusammengestellt. Für Voruntersuchungen können die Werte gemäß Tabelle D.1 übernommen werden.

Sollten genauere Werte bekannt sein, können diese hier direkt überschrieben werden. Die Überschrift der Diagrammzusammenstellung ist manuell entsprechend der verwendeten Klimazone anzupassen.

# TRY2015\_Klimazone 1\_Mittlere Jahrestemperatur\_Einfamilienhaus

Heizwärmebedarf  
Warmwasserbedarf



|     | <b>Strombedarf</b> | <b>Heizwärmebedarf</b> | <b>Warmwasserbedarf</b> |
|-----|--------------------|------------------------|-------------------------|
|     | [kWh/Tag]          | [kWh/Tag]              | [kWh/Tag]               |
| ÜWH | 14,79              | 55,68                  | 3,94                    |
| ÜWB | 15,79              | 55,97                  | 3,96                    |
| ÜSH | 16,68              | 48,74                  | 6,35                    |
| ÜSB | 17,73              | 56,71                  | 5,4                     |
| SWX | 12,54              | 0                      | 3,46                    |
| SSX | 13,19              | 0                      | 5,34                    |
| WWH | 15,62              | 104,18                 | 5,12                    |
| WWB | 17,03              | 93,99                  | 4,76                    |
| WSH | 17,35              | 108,74                 | 10,26                   |
| WSB | 19,96              | 91,87                  | 6,65                    |

Abbildung D.1: Vorgabewerte für den Strom, Heiz- und Warmwasserwärmebedarf für ein Einfamilienhaus nach [123]

Kurzbeschreibung der einzelnen Tabellenblätter:

- Anleitung - selbsterklärend
- Diagramme - selbsterklärend
- Tagesenergie - Auf diesem Tabellenblatt wird der Tagesenergiebedarf je Typentag vorgegeben.
- Rohdaten - In diesem Tabellenblatt werden die Daten des Testreferenzjahres entsprechend der gewünschten Klimazone übernommen.
- Typentagkategorie - Hier werden die Typentage des Jahresverlaufs automatisch ermittelt.
- Jahresgang - automatische Überlagerung von TRY und Typentagen
- ÜWH ... - Rohdaten der Typentage. In diesen Blättern wird auch der Energiebedarf auf Basis der Tagesenergie ermittelt. Es erfolgt eine Mittlung der Minutenwerte in Stundenwerte.

## D.2 Dynamische Kopplung an ein HLK-System

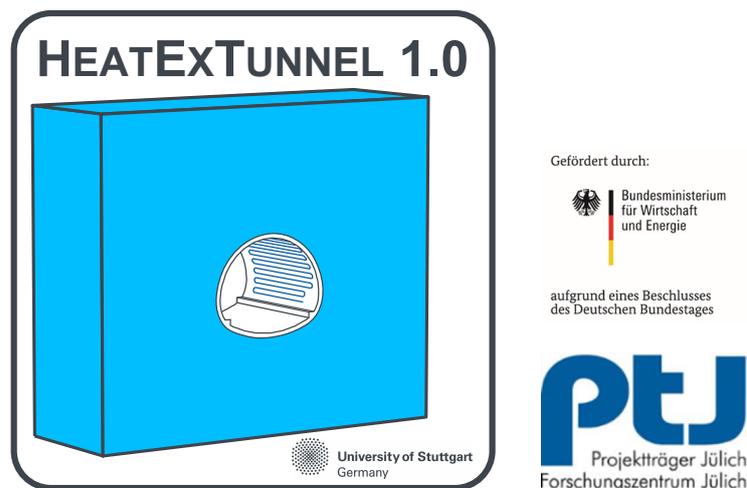
Die Kopplung der Software COMSOL mit der Gebäudesimulationsumgebung TRNSYS erfolgt über eine MATLAB-Schnittstelle. Die programmierten MATLAB-Codes sind wie folgt in die Programmumgebungen einzubinden:

- Die Datei 'TRNSYS.m' ist über den Typ 155 in TRNSYS einzubinden. Diese Datei enthält die wesentlichen Programmierungen zur Durchführung der Kopplung.
- Die Datei 'tVL-function.m' dient der Kommunikation von COMSOL mit MATLAB und ist in COMSOL über die MATLAB-Schnittstelle einzubinden.
- Die Datei 'vABS-function.m' dient ausschließlich dem Einlesen der Strömungsrandbedingung für die Absorberkreisläufe und ist in COMSOL über die MATLAB-Schnittstelle einzubinden.

Der programmierte Quellcode kann auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

# Anhang E

## Anhang zu Kapitel 5.3.5



Die Simulationsanwendung HeatExTunnel<sup>®</sup> in der Version 1.0 ist ein Ergebnis der Forschungsaktivitäten des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projektes „EnEff: Wärme – Geothermienutzung in Tunnelbauwerken in innerstädtischen Bereichen am Beispiel des Stadtbahntunnels Stuttgart-Fasanenhof (U6) - Folgeprojekt FKZ: 03ET1122A“. Ziel der Entwicklung dieser Simulationsumgebung ist die Überführung der Ergebnisse dieser Dissertation in eine benutzerfreundliche Anwendung, mit der eine schnelle und abgesicherte Prognose des geothermischen Potentials einer Tunnelgeothermie möglich ist. Nachfolgend wird ein Überblick über die erforderlichen Eingaben in die Simulationsanwendung gegeben, sowie die internen Berechnungsabläufe erläutert. Exemplarisch erfolgt dies auf der Grundkonfiguration der Simulationsanwendung für den zweidimensionalen Fall ohne Grundwasserströmung und unter Berücksichtigung der klimatischen Verhältnisse für einen Bahntunnel. Ergänzend werden im Anschluss die Grundlagen für die Abbildung einer dreidimensionalen Absorberrohrleitungsführung beschrieben.

Der Zugang zur Simulationsanwendung HeatExTunnel<sup>®</sup> ist web-basiert möglich. Der Nutzer erhält eine Zugangsberechtigung von der Institution, die diese Simulationsanwendung anbietet und steigt in die Programmeingabe über seinen lokalen web-browser ein. Nach erfolgter Eingabe und dem Start der Berechnung erfolgt die Simulation auf einem lokalen Server. Die Ausgabe der Berechnungsergebnisse erfolgt wiederum direkt durch den web-browser.

1

Universität Stuttgart

IGS

---

General Climate / Heat demand Mesh / Simulation Results

**3 Tunnel geometry**

Tunnel inner radius [m] 5

Tunnel cover [m] 16

Shell thickness [m] 0.5

Block depth [m] 10

Minimum soil depth under tunnel [m] 20

Number of tunnels [pcs] 1

Distance of tunnel [m] 0

**4 Absorber geometry**

c abs radial [m]: 0.2

alpha abs [°]: 180

rotation [°]: 0

**5 Internal calculation results**

Ambient temp: [°C] 11.157275099555791

Depth 55Z [m] -20

| Name   | ti [m] | lambda [W/(m*K)] | Cp [J/(kg*K)] | rho [kg/m^3] | porosity [-] | Permeability [m^2] |
|--------|--------|------------------|---------------|--------------|--------------|--------------------|
| Sand   | 3      | 2                | 1000          | 1000         | 0.3          | 0.005              |
| Clay   | 15     | 2                | 1000          | 1000         | 0.3          | 0.005              |
| Gravel | 30     | 2                | 1500          | 1500         | 0.3          | 0.0005             |

**6 Plot**

**2**

7

Abbildung E.1: Eingabe Geometrie und Materialeigenschaften

---

**1 - Speichern** In der aktuellen Version von HeatExTunnel® ist es möglich, eine begonnene oder abgeschlossene Simulation zu speichern bzw. unter einem neuen Namen zu speichern. Das Öffnen bereits ausgeführter Simulationen ist nicht vorgesehen.

**2 - Skizze zur Eingabe** Als Einstieg in die erforderlichen Eingaben in die Simulationsanwendung erhält der Nutzer einen Überblick über die zu berücksichtigenden Geometrien und Materialeigenschaften.

**3 - Geometrieingaben** Die Tunnelgeometrie basiert auf dem Innenradius des Tunnels, der Tunnelschalendicke sowie der Tunnelüberdeckung. Zur Abschätzung einer ausreichenden Tunnelunterdeckung im Berechnungsmodell erhält der Nutzer einen entsprechenden Hinweis, sobald er mit dem Mauszeiger über das Eingabefeld fährt. In der aktuellen Version ist es möglich, eine Reihe von gleichartigen Tunneln mit gleichem Abstand in horizontaler Richtung zu untersuchen.

**4 - Absorbergeometrie** Die Abbildung des tunnelgeothermischen Betriebs erfolgt für das zweidimensionale Berechnungsmodell über eine Temperaturrandbedingung. Diese wird über eine sich innerhalb des Tunnelquerschnitts befindliche gekrümmte Linie aufgeprägt. Die Anordnung dieser Linie ist durch den Nutzer über den Streichwinkel, die Rotation, sowie die radiale Lage frei wählbar.

**5 - Eingabe Bodenschichten** Die Bodenschichten sowie die thermischen Baugrundeigenschaften werden tabellarisch eingegeben. Hierzu sind für alle Parameter effektive Werte entsprechend der Mischung aus Porenraum und Feststoff einzutragen. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Modelltiefe, wird die letzte Bodenschicht soweit vergrößert, dass der vorgegebene Wert der Unterdeckung erreicht wird. Der Parameter Permeabilität wird in der aktuellen Version nicht verwendet. Die Materialeigenschaften der Tunnelschale können durch den Nutzer in der aktuellen Version nicht geändert werden (Vorgabewerte:  $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 1,8 \text{ W/mK}$ ,  $C_p = 880 \text{ J/kgK}$ ).

**6 - Generierung der Geometrie und Materialparametersätze** Durch einen Mausklick auf das Symbol „Plot“ werden zunächst sämtliche bestehende Geometrien im Modell gelöscht und entsprechend den Vorgaben aus 5 neu generiert. Für die eingetragenen Bodenschichten werden entsprechende Parametersätze angelegt und mit der zu lösenden Physik verknüpft. Darüber hinaus erfolgt die Aktualisierung von dynamischen Auswahlgeometrien, durch die eine Lokalisierung der Modelldomains und Modellränder möglich wird. Das fertig erstellte Modell wird am unteren Rand des Eingabedialogs dargestellt.

**7 - Vorschau Berechnungsmodell** Am unteren Rand der Modelleingabe zeigt ein Vorschaufenster die fertig erstellte Berechnungsdomain, bestehend aus den einzelnen Regionen zur Abbildung der Bodenschichten, der Tunnelschale sowie der Linie, die den Absorber repräsentiert.

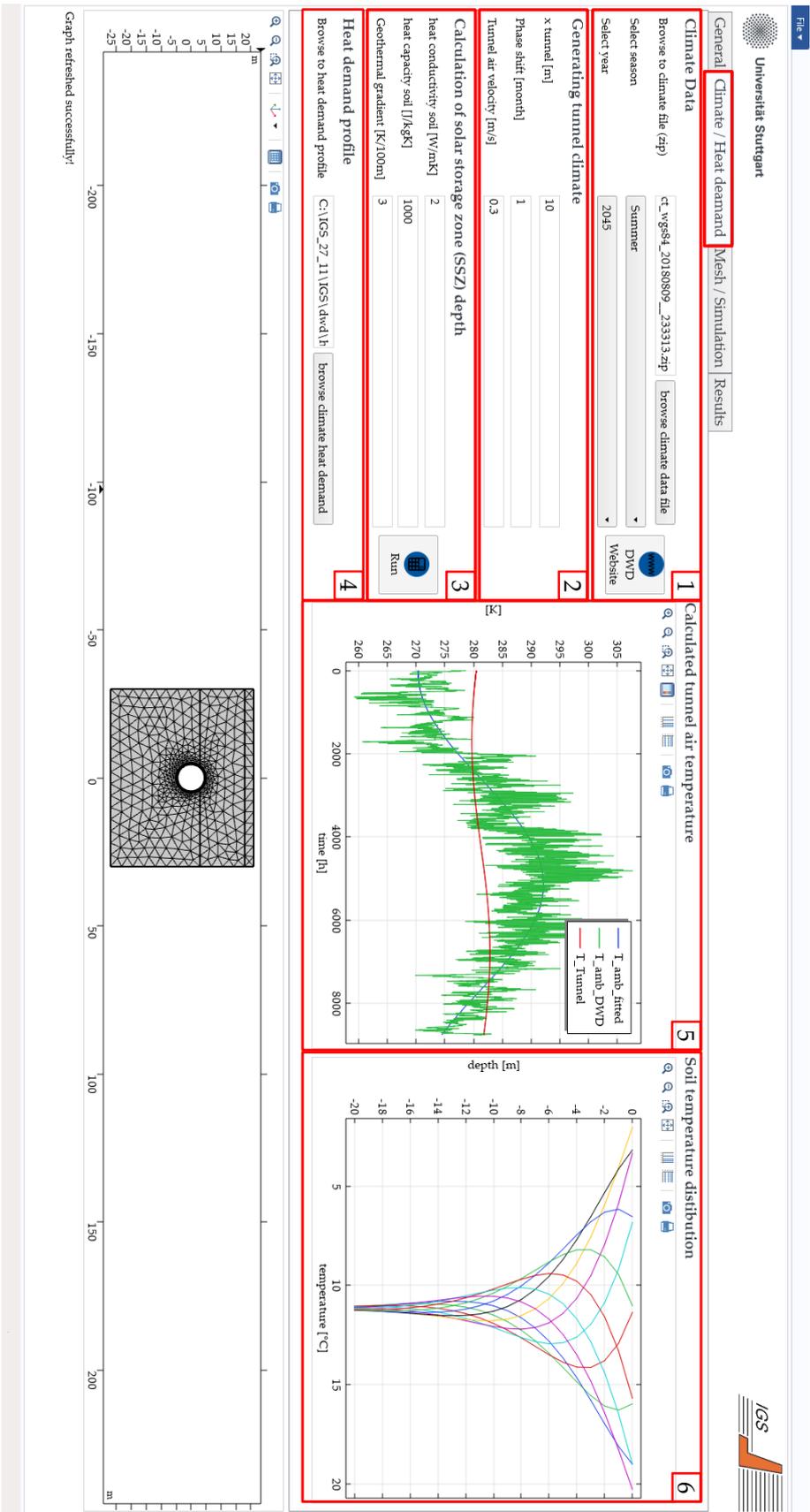


Abbildung E.2: Einstellung der klimatischen und betrieblichen Randbedingungen

---

**1 - Klimadaten** In der aktuellen Version von HeatExTunnel<sup>®</sup> ist ein direkter Zugriff auf die Klimadaten der Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienstes implementiert. Hierzu ruft der Nutzer zunächst den Internetauftritt des Deutschen Wetterdienstes auf, wozu eine kostenfreie Anmeldung des Nutzers bei Deutschen Wetterdienst erforderlich ist. Über eine grafische Oberfläche kann der Nutzer zu einem Ort innerhalb Deutschlands navigieren und für diesen die entsprechenden Klimadaten in Form einer .zip-Datei herunterladen. Eine Übersicht über die Inhalte sowie die Struktur dieser Datei liefert [38]. Der Nutzer hat im nächsten Schritt die entsprechende Datei zu laden und die Auswahlen hinsichtlich des zu verwendenden Datensatzes zu treffen. Programmintern werden die geladenen Rohdaten entpackt und aufbereitet, so dass diese als Eingangswerte für weitere interne Berechnungen bzw. direkt als Randbedingung für die Simulation verwendet werden können.

**2 - Tunnelklima** Die hier vorgestellte Simulationsanwendung gilt ausschließlich für Bahntunnel. Zur Beschreibung des Tunnelklimas werden die Ansätze entsprechend Kapitel 4.5.5 verwendet. Die Ausgangsbasis zur Berechnung der Tunnellufttemperatur bildet eine Sinusregression (blaue Kurve in 5) der Oberflächentemperatur des Klimadatensatzes (grüne Kurve in 5). Durch die Vorgabe des Abstandes des thermisch aktivierten Bereiches innerhalb des Tunnels vom Tunnelportal, den programmintern ermittelten Tunnelluftquerschnitt sowie eine vorgegebene Phasenverschiebung der Tunnellufttemperatur gegenüber der Außenlufttemperatur wird der Jahresgang der Tunnellufttemperatur (rote Kurve in 5) berechnet. Zur Beschreibung einer Wärmeübergangsrandbedingung an der Tunnelinnenseite ist vom Nutzer eine über den Jahresgang konstante Tunnelluftströmungsgeschwindigkeit vorzugeben. Für sämtliche Eingabewerte erhält der Nutzer Hinweise, sobald dieser mit dem Mauszeiger über die Eingabefelder fährt.

**3 - Berechnung der solaren Speicherzone** Die Sinusregression (blaue Kurve in 5) der Oberflächentemperatur des Klimadatensatzes (grüne Kurve in 5) bildet die Ausgangsbasis zur Ermittlung der jahreszeitlichen Temperaturverteilung im Untergrund. Unter der Nutzung einer mittleren effektiven Temperaturleitfähigkeit für die oberen Bodenschichten werden durch das Programm unter Nutzung der Gleichung 4.12 auf Seite 33 die Temperaturverläufe innerhalb des Boden berechnet (siehe 6). Im Anschluss wird die Tiefe gesucht, ab der über den Jahresgang der Einfluss der klimatischen Verhältnisse nicht mehr nachweisbar ist. Diese, als Ende der solaren Speicherzone beschriebene Tiefe, dient in weiterer Folge der Ermittlung einer ungestörten Bodentemperatur unter Berücksichtigung des geothermischen Gradienten als Randbedingung für den unteren Modellrand.

**4 - Energiebedarfsprofil** In der aktuellen Version von HeatExTunnel<sup>®</sup> ist durch den Nutzer ein Energiebedarfsprofil vorzugeben. Hierzu ist eine Text-Datei mit zwei Spalten zu erstellen, bei der in der ersten Spalte die fortlaufende Simulationszeit anzugeben ist. In der zweiten Spalte ist der Temperaturwert in °C vorzugeben, mit dem der Absorber betrieben werden soll. Für Zeiten in denen kein Absorberbetrieb erfolgt, ist der Temperaturwert auf den Wert 500 zu setzen. Die Temperaturrandbedingung im Bereich des Absorbers wird in diesem Zustand ignoriert.

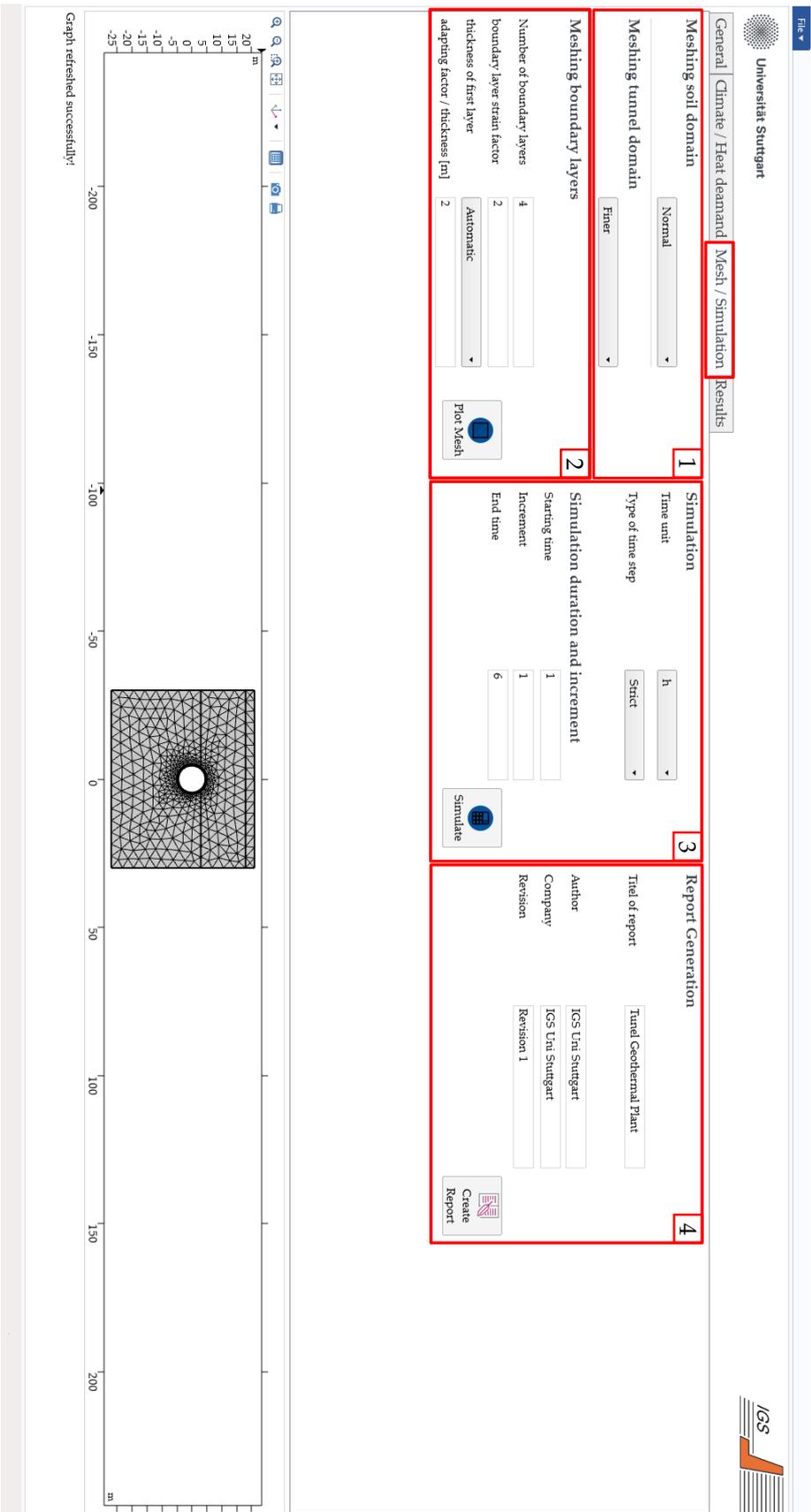


Abbildung E.3: Netzgenerierung, Simulationseinstellung, Report Erstellung

---

**1 - Berechnungsnetz Boden und Tunnel** Die Erstellung des numerischen Berechnungsnetzes erfolgt durch vorgegebene Diskretisierungsgrade getrennt für den Boden und den Bereich der Tunnelschale. Wird ein Vernetzungsgrad „extremely coarse“ gewählt, betragen die minimale Elementgröße 3 m sowie die maximale Elementgröße 19 m. Wird ein Vernetzungsgrad „extremely fine“ gewählt, betragen die minimale Elementgröße 0,0012 m sowie die maximale Elementgröße 0,6 m.

**2 - Berechnungsnetz am Übergang Boden und Tunnel** Zur korrekten Auflösung von großen Gradienten im Tunnelnahbereich sieht die Simulationsanwendung die Anordnung einer Übergangsvernetzung vor. Dies wird vor allem bei der Lösung einer thermisch-hydraulisch gekoppelten Problemstellung von Bedeutung. Der Nutzer wählt zunächst die Anzahl der anzuordnenden Randschichten sowie einen entsprechenden Dehnungsfaktor. Die Anordnung der Randschichten erfolgt, beginnend von der äußeren Tunnelschale, in Richtung des Bodens. In der aktuellen Version von HeatExTunnel<sup>®</sup> ist keine adaptive Netzverfeinerung vorgesehen, so dass durch die Nutzer eine Konvergenzuntersuchung durchzuführen ist. Durch einen Mausklick auf die Schaltfläche „Plot Mesh“ wird die aktuelle Geometrie vernetzt.

**3 - Simulationsrandbedingungen** Vor dem Start einer Simulation ist durch den Nutzer das Zeitinkrement für die Berechnung festzulegen. Grundsätzlich kann für überschlägige Berechnungen die Simulation auf Stundenwerten empfohlen werden. Die numerische Simulation nutzt einen impliziten Löser. Das bedeutet, dass wenn sich Randbedingungen wie z.B. das Klimageschehen an der Geländeoberkante oder das Nutzerprofil stündlich ändern, die Voreinstellung „strict“ zu wählen ist, da ansonsten die explizite Berücksichtigung dieser Randbedingungen nicht gegeben ist.

Der Nutzer hat die Möglichkeit, den Startpunkt der Simulation (üblicherweise sollte der Startzeitpunkt mit „0“ gewählt werden), das Inkrement sowie das Ende der Simulation (üblicherweise sollte mindestens ein gesamter Jahreszyklus simuliert werden, so dass das Ende der Simulation auf „8760“ gesetzt werden sollte) zu wählen. Durch einen Mausklick auf die Schaltfläche „Simulate“ wird die aktuelle Simulation gestartet. Ein Fortschrittsbalken am unteren Bildschirmrand zeigt den aktuellen Stand der Berechnung an.

**4 - Berichtserstellung** Nach der erfolgten Berechnung hat der Nutzer die Möglichkeit, einen vordefinierten Ergebnisbericht im .docx-Format zu erstellen. Hierzu können der Titel sowie Angaben zum Ersteller individuell angepasst werden.

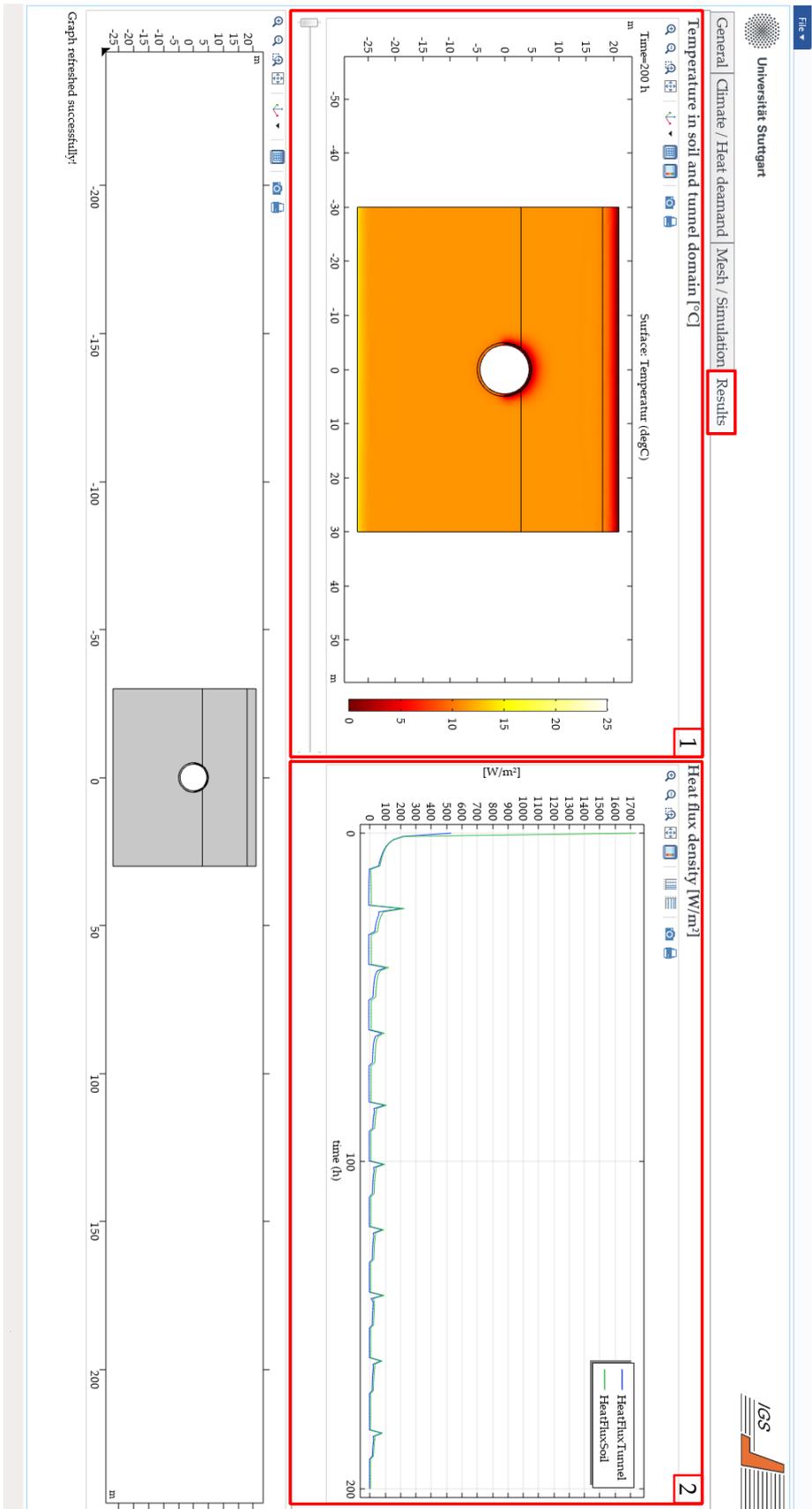


Abbildung E.4: Berechnungsergebnisse

---

**1 - Ausgabe Temperaturfeld** Am Ende des Eingabedialogs werden dem Nutzer zwei wesentliche Ergebnisse zur Beurteilung der Simulationsergebnisse aufbereitet zur Verfügung gestellt. Auf der linken Seite wird das Temperaturfeld innerhalb des Bodens sowie der Tunnelschale als gefüllte Oberfläche dargestellt. Durch einen Schieberegler unterhalb des Diagramms kann der Nutzer durch die simulierten Berechnungsschritte navigieren und hierdurch eine Prüfung der zulässigen Temperaturen vornehmen.

**2 - Ausgabe Wärmestromdichten** Eine wesentliche Aussage zur Bewertung des energetischen Potentials einer TGTA liefert das Diagramm der extrahierten Wärmestromdichten über den Simulationszeitraum. Zur Erstellung dieses Diagramms werden programmintern der bodenseitige sowie der tunnelseitige Wärmestrom auf die interne Temperaturrandbedingung des Absorbers ausgewertet und anschließend auf die Abwicklungslänge des Absorbers bezogen.



---

**Erweiterung der Simulationsanwendung in die dritte Raumdimension** Die Simulationsanwendung HeatExTunnel<sup>®</sup> in der Version 1.0 wurde neben der beschriebenen zweidimensionalen Anwendung auch in die dritte Raumdimension überführt. Durch die dreidimensionale Abbildung des Wärmeübertragers in der Tunnelschale erhält der Nutzer die Möglichkeit, eine Auslegung der TGTA im Sinne einer Ausführungsplanung vorzunehmen. In Längsrichtung des Tunnels erfolgt die Abbildung eines Tunnelblocks bzw. eines Tunneltübbringrings.

**1 - Grafik Eingabe** Im rechten Bereich der Eingabeoberfläche sind die zu berücksichtigenden Geometrien, Annahmen und Einschränkungen dargestellt.

**2 - Absorbergeometrie** In der aktuellen Simulationsanwendung erfolgt die Anordnung der Rohrleitungen parallel zur Tunnellängsachse. Die Verbindung der Längsschenkel der Rohrleitungen wird durch gerade Rohrabschnitte abgebildet, so dass es bei einem großen Rohrabstand und einer Lage des Absorbers nahe der Tunnelschaleninnenseite zu einem Austritt der Rohrleitungen aus dem Tunnelschalenbeton kommen kann. Dies ist durch den Nutzer visuell zu kontrollieren. Die automatische Generierung der dreidimensionalen Absorbergeometrie erfolgt in kartesischen Koordinaten unter Nutzung eines Divisionsalgorithmus. Unter der Vorgabe der des Schenkelabstandes  $e_{abs}$  sowie des vom Absorbers zu überstreichenden Bereiches, definiert durch Streichwinkel  $\alpha_{abs}$ , erfolgt eine automatische Aufteilung eines mäandrierenden Rohrleitungsverlaufes innerhalb der Tunnelschale. Die Generierung der Absorbergeometrie sowie ein Regenerierung der restlichen Boden- und Tunnelgeometrie erfolgt durch einen Mausklick auf das Symbol „Plot“ (5).

**3 - Energiebedarfsprofil** Durch den Nutzer ist ein Energiebedarfsprofil vorzugeben. Hierzu ist eine Text-Datei mit zwei Spalten zu erstellen, bei der in der ersten Spalte die fortlaufende Simulationszeit anzugeben ist. In der zweiten Spalte ist der Temperaturwert in  $^{\circ}C$  vorzugeben, mit dem der Absorber betrieben werden soll. Für Zeiten in denen kein Absorberbetrieb erfolgt, ist der Temperaturwert auf den Wert 500 zu setzen. Die Temperaturrandbedingung im Bereich des Absorbers wird in diesem Zustand ignoriert. Neben der Vorgabe der Eintrittstemperatur in den Absorberkreislauf ist in der aktuellen Version der Simulationsanwendung durch den Nutzer ein über die gesamte Simulationsdauer konstanter Volumenstrom vorzugeben.

**4 - Wahl Fließrichtung** Nach erfolgter Erstellung der Absorbergeometrie ist durch den Nutzer die Fließrichtung durch die Rohrleitungen festzulegen. Dies erfolgt grafisch durch das Anwählen der entsprechenden Endpunkte der im Vorschaufenster (6) gezeigten mäandrierenden Linie. Zunächst ist die Schaltfläche „Off“ im Bereich „Inlet section“ zu aktivieren. Anschließend sind die Endpunkte zu wählen, an denen das Absorberfluid in den Absorberabschnitt eintreten soll. Mit der Rohraustritt ist entsprechend zu verfahren.



# Lebenslauf

|                   |  |
|-------------------|--|
| 1978              | Geboren in Buchholz i.d.N.   |
| 1998              | Abitur, Gymnasium Tostedt  |
| 1998 - 2000       | Ausbildung zum Tischler, Gesellenprüfung   |
| 01/2001 - 04/2002 | Ersatzdienst, Entwicklungsdienst in Äthiopien  |
| 2002 - 2007       | HafenCity Universität Hamburg, Studium des Bauingenieurwesens, Abschluss Dipl.-Ing. (FH) |
| 02/2007 - 02/2009 | Züblin, Stuttgart, Technisches Büro Tiefbau, Projektingenieur                            |
| 03/2009 - 08/2012 | Strabag / Züblin, Wien, Technisches Büro Tiefbau, Projektleiter                          |
| 09/2012 - 05/2014 | Strabag / Züblin, Wien, Technisches Büro Tiefbau, Teamleiter                             |
| seit 06/2014      | Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik, Akademischer Mitarbeiter                 |



# Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart

Mitteilungen des Baugrundinstitutes Stuttgart  
(Institut für Grundbau und Bodenmechanik) der Universität Stuttgart  
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. U. Smolczyk

- |        |                                      |        |   |
|--------|--------------------------------------|--------|---|
| Nr. 01 | Thamm, B. R.                         | (1974) | Anfangssetzungen und Anfangsporenwasserüberdrücke eines normalverdichteten wassergesättigten Tones      |
| Nr. 02 | Gußmann, P.                          | (1975) | Einheitliche Berechnung von Grundbruch und Böschungsbruch   |
| Nr. 03 | Feeser, V.                           | (1975) | Die Bedeutung des Kalziumkarbonats für die bodenphysikalischen Eigenschaften vom Löß                    |
| Nr. 04 | Du Thin, K.                          | (1976) | Standsicherheit von Böschungen: Programm-Dokumentation  |
| Nr. 05 | Smolczyk, U./Pertschi, O./Hilmer, K. | (1976) | Messungen an Schleusen in der UDSSR. Schleusennorm der UDSSR (SN 30365)                                 |
| Nr. 06 | Hilmer, K.                           | (1976) | Erddruck auf Schleusenkammerwände   |
| Nr. 07 | Laumans, Q.                          | (1977) | Verhalten einer ebenen, in Sand eingespannten Wand bei nichtlinearen Stoffeigenschaften des Bodens      |
| Nr. 08 | Lächler, W.                          | (1977) | Beitrag zum Problem der Teilflächenpressung bei Beton am Beispiel der Pfahlkopfanschlüsse               |
| Nr. 09 | Spotka, H.                           | (1977) | Einfluß der Bodenverdichtung mittels Oberflächenrüttelgeräten auf den Erddruck einer Stützwand bei Sand |

- |        |                               |        |  |
|--------|-------------------------------|--------|--|
| Nr. 10 | Schad, H.                     | (1979) | Nichtlineare Stoffgleichungen für Böden und ihre Verwendung bei der numerischen Analyse von Grundbauaufgaben             |
| Nr. 11 | Ulrich, G. / Gußmann, P.      | (1980) | Verschiebungs- und kraftgesteuerte Plattendruckversuche auf konsolidierenden Böden<br>Zum Modellgesetz der Konsolidation |
| Nr. 12 | Salden, D.                    | (1980) | Der Einfluß der Sohlenform auf die Traglast von Fundamenten  |
| Nr. 13 | Seeger, H.                    | (1980) | Beitrag zur Ermittlung des horizontalen Bettungsmoduls von Böden durch Seitendruckversuche im Bohrloch                   |
| Nr. 14 | Schmidt, H.H.                 | (1981) | Beitrag zur Ermittlung des Erddrucks auf Stützwände bei nachgiebigem Baugrund  |
| Nr. 15 | Smolczyk, U. / Schweikert, O. | (1981) | Vorstudie über bauliche Alternativen für Durchgangsstraßen in Siedlungen   |
| Nr. 16 | Malcharek, K. / Smolczyk, U.  | (1981) | Vergleich nationaler Richtlinien für die Berechnung von Fundamenten  |
| Nr. 17 | Gruhle, H.D.                  | (1981) | Das Verhalten des Baugrundes unter Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als räumliches Problem des Erdwiderstandes |
| Nr. 18 | Kobler, W.                    | (1982) | Untersuchungen über Böschungs- und Grundbruch bei begrenzten Lastflächen   |
| Nr. 19 | Lutz, W.                      | (1983) | Tragfähigkeit des geschlitzten Baugrunds neben Linienlasten  |
| Nr. 20 | Smolczyk, U.                  | (1983) | Studienunterlagen "Bodenmechanik und Grundbau"; überarbeitete Ausgabe 1993   |
| Nr. 21 | Schweikert, O.                | (1984) | Der Einfluß des Böschungswinkels auf die Berechnung des aktiven Erddrucks  |

- 
- |        |  |        |  |
|--------|--|--------|--|
| Nr. 22 | Vogt, N.                                       | (1984) | Erdwiderstandsermittlung bei monotonen und wiederholten Wandbewegungen in Sand                         |
| Nr. 23 | Buchmaier, R.                                  | (1985) | Zur Berechnung von Konsolidationsproblemen bei nichtlinearem Stoffverhalten                            |
| Nr. 24 | Schad, H. Smoltczyk, U./ Schad, H./ Zoller, P. | (1985) | Möglichkeiten der Böschungssicherung bei kleinen Baugruben Sonderkonstruktionen der Böschungssicherung |
| Nr. 25 | Gußmann, P.                                    | (1986) | Die Methode der Kinematischen Elemente   |
| Nr. 26 | Steinmann, B.                                  | (1985) | Zum Verhalten bindiger Böden bei monotoner einaxialer Beanspruchung                                    |
| Nr. 27 | Lee, S.D.                                      | (1987) | Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlitzten im Sand neben Einzelfundamenten                      |

Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart  
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. U. Smoltczyk

- |        |   |        |   |
|--------|---|--------|---|
| Nr. 28 | Kolb, H.  | (1988) | Ermittlung der Sohlreibung von Gründungskörpern unter horizontalem kinematischen Zwang        |
| Nr. 29 | Ochmann, H.   | (1988) | Ebene Grenzzustände von Erdböschungen im stochastischen Sicherheitskonzept                    |
| Nr. 30 | Breinlinger, F.   | (1989) | Bodenmechanische Stoffgleichungen bei großen Deformationen sowie Be- und Entlastungsvorgängen |
| Nr. 31 | Smoltczyk, U./ Breinlinger, F./ Schad, H./ Wittlinger, M. | (1989) | Beitrag zur Bemessung von Tunneln in offener Bauweise   |
| Nr. 32 | Gußmann, P./ Schanz, T./ Smoltczyk, U./ Willand, E.       | (1990) | Beiträge zur Anwendung der KEM (Erd- druck, Grundbuch, Standsicherheit von Böschungen)        |

- Nr. 33 Gruhle, H.D. (1990) Der räumliche Erdwiderstand vor überwiegend horizontal belasteten Ankerplatten
- Nr. 34 Henne, J. (1995) Zur Bewehrung von verformten Bodenschichten durch Einsatz zugfester Geokunststoffe
- Nr. 35 Wittlinger, M. (1994) Ebene Verformungsuntersuchungen zur Weckung des Erdwiderstandes bindiger Böden
- Nr. 36 Schad, H. (1992) Zeit- und geschwindigkeitsabhängiges Materialverhalten in der Geotechnik – Experimentelle Erfassung und numerische Analyse
- Nr. 37 Belz, I. (1992) Zur Ermittlung dynamischer Bodenkennwerte in situ aus der Systemantwort des Erregers
- Nr. 38 Ma, J. (1994) Untersuchungen zur Standsicherheit der durch Stützscheiben stabilisierten Böschungen
- Nr. 39 Smolczyk, U. (1994) Sonderheft: 25 Jahre Lehre und Forschung in der Geotechnik
- Nr. 40 Rilling, B. (1994) Untersuchungen zur Grenztragfähigkeit bindiger Schüttstoffe am Beispiel von Lößlehm

Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart  
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. P.A. Vermeer

- Nr. 41 Vermeer, P.A. (1996) Deponiebau und Geotechnik
- Nr. 42 Vermeer, P.A. (1997) Baugruben in Locker- und Festgestein
- Nr. 43 Brinkmann, C. (1998) Untersuchungen zum Verhalten von Dichtungsübergängen im Staudammbau
- Nr. 44 Fiechter-Scharr, I. (1998) Beeinflussung von Erdbaustoffen durch Beimischen eines organophilen Bentonits

- 
- |        |                   |        |  |
|--------|-------------------|--------|--|
| Nr. 45 | Schanz, T.        | (1998) | Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien                                       |
| Nr. 46 | Akinrogunde, A.E. | (1999) | Propagation of Cement Grout in Rock Discontinuities Under Injection Conditions                             |
| Nr. 47 | Vogt-Breyer, C.   | (1999) | Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten und zur Bemessung horizontaler Schraubanker |
| Nr. 48 | Vermeer, P.A.     | (1999) | Neue Entwicklungen in der Geotechnik   |
| Nr. 49 | Marcher, T.       | (2002) | Resultate eines Versuchsprogramms an Beaucaire Mergel  |
| Nr. 50 | Marcher, T.       | (2003) | Nichtlokale Modellierung der Entfestigung dichter Sande und steifer Tone                                   |
| Nr. 51 | Ruse, N.M.        | (2004) | Räumliche Betrachtung der Standsicherheit der Ortsbrust beim Tunnelvortrieb                                |
| Nr. 52 | Beutinger, P.H.   | (2005) | Ein geotechnischer Beitrag zur Standsicherheit mobiler Baumaschinen  |
| Nr. 53 | Wehnert, M.       | (2006) | Ein Beitrag zur drainierten und undrainierten Analyse in der Geotechnik                                    |
| Nr. 54 | Möller, S. C.     | (2006) | Tunnel induced settlements and forces in linings   |
| Nr. 55 | Benz, T.          | (2007) | Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences   |
| Nr. 56 | Abed, A.          | (2008) | Numerical Modeling of Expansive Soil Behavior  |
| Nr. 57 | Hintner, J.       | (2008) | Analyse der Fundamentverschiebungen infolge vertikaler und geneigter Belastung                             |
| Nr. 58 | Russelli, C.      | (2008) | Probabilistic Methods applied to the Bearing Capacity Problem  |

- Nr. 59 Peña Olarte, A.A. (2008) Influence of Particle Shape on the Global Mechanical Response of Granular Packings: Micromechanical Investigation of the Critical State in Soil Mechanics
- Nr. 60 Neher, H.P. (2008) Zeitabhängiges Materialverhalten und Anisotropie von weichen Böden – Theorie und Anwendung
- Nr. 61 Vermeer, P.A. (2008) Von der Forschung zur Praxis: Symposium anlässlich des 80. Geburtstags von Prof. U. Smolczyk
- Nr. 62 Syawal, S. (2009) Numerical Analysis and Design Criteria of Embankments on Floating Piles
- Nr. 63 Lächler, A. (2009) Bedeutung herstellungsbedingter Einflüsse auf das Trag- und Verformungsverhalten von Schlitzwänden
- Nr. 64 Möllmann, A. (2009) Probabilistische Untersuchung von Hochwasserschutzdeichen mit analytischen Verfahren und der Finite-Elemente-Methode

Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart  
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. habil. Ch. Moormann

- Nr. 65 Moormann, Ch. (2011) 7. Stuttgarter Geotechnik-Symposium
- Nr. 66 Beuth, L. (2012) Formulation and Application of a Quasi-Static Material Point Method
- Nr. 67 Moormann, Ch., Huber, M., Proske, D. (2012) Proceedings of the 10th International Probabilistic Workshop
- Nr. 68 Schneider, M. (2013) Zur energetischen Nutzung von Tunnelbauwerken – Messungen und numerische Berechnungen am Beispiel Fasanenhofunnel
- Nr. 69 Huber, M. (2013) Soil variability and its consequences in geotechnical engineering

- 
- Nr. 70 Hamad, F. (2014) Formulation of a Dynamic Material Point Method and Applications to Soil-Water-Geotextile Systems
- Nr. 71 Klein, L. (2019) Untersuchungen zum räumlichen aktiven Erddruck bei Baugruben mit rechteckigem Grundriss
- Nr. 72 Aschrafi, J. (2019) Beitrag zur Seitendruckbeanspruchung von Pfählen in bindigen Böden
- Nr. 73 Buhmann, P. (2019) Energetisches Potential geschlossener Tunnelgeothermiesysteme