

Numerische Untersuchungen zur Tunnelgeothermienutzung für Gebäude

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-
Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Anders Jakob Berg

aus Uppsala, Schweden

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Tag der Einreichung:

14.02.2022

Tag der mündlichen Prüfung:

11.11.2022



Universität Stuttgart



Institut für Gebäudeenergetik,
Thermotechnik und Energiespeicherung

ISBN – 978 – 3 – 9823067 – 0 – 4

D93

Universität Stuttgart, **IGTE**
Institut für Gebäudeenergetik,
Thermotechnik und Energiespeicherung
Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 - 62085
Fax.: 0711 / 685 - 62096

Stuttgart, November 2022

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos für die Betreuung meiner Arbeit. Mit seiner freundlichen Unterstützung, seiner stetigen Bereitschaft zu fachlichen Diskussionen sowie hilfreichen Inputs und seiner wissenschaftlichen Neugier hat er maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt für seine Unterstützung bei dieser Arbeit sowie bei meiner ersten Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IGTE (damals IGE) bedanken. Mit seiner freundlichen und humorvollen Art hat er dazu beigetragen, dass ich mich von Anfang an sehr wohl am Institut gefühlt habe.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Tobias Henzler für seine konstruktive und fachliche Unterstützung sowie bei Frau Martina Ellinger für ihre Hilfe bei der Veröffentlichung dieser Arbeit bedanken.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei allen Kolleg*innen und Studierenden des IGTE sowie der HLK Stuttgart GmbH für die sehr schöne Zeit. Ich werde zukünftig mit Freude an meine Jahre am IGTE zurückdenken. Auch möchte ich mich bei meinen Kolleg*innen der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg für die Unterstützung in der Endphase der Promotion bedanken.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie und Freund*innen in Deutschland und in Schweden für die herzliche Unterstützung bedanken. Ihr habt mir Kraft für die Arbeit gegeben. Mein ganz besonderer Dank gilt Judith für ihre liebevolle und unterstützende Art sowie Ylva und Tove für die wohltuende Ablenkung von der Arbeit.

Stort tack till min familj och mina vänner i Tyskland och i Sverige för ert enorma stöd. Ni har gett mig kraft att genomföra detta arbete. Mitt största tack går till dig Judith för ditt kärleksfulla och stödjande sätt samt till Ylva och Tove för all välgörande avlämning från jobbet. Utan er hade jag inte klarat denna stora utmaning.

Karlsruhe, im November 2022

Anders Berg

Kurzfassung

Es ist nur ein geringer technischer Aufwand nötig, um Tunnelbauwerke als geothermische Quelle oder Senke für Heiz- und Kühlzwecke zu nutzen. In dieser Arbeit wird die Bedarfsentwicklung vom Endverbraucher bis zum thermisch aktivierten Tunnelbereich numerisch modelliert, um das energetische und wirtschaftliche Potenzial der Tunnelgeothermie für das Beheizen und Kühlen von Gebäuden zu bewerten. Dafür wird ein Teilmodell für einen Tunnelabsorber aufgebaut, validiert und in die Simulationsumgebung TRNSYS eingebunden. Darüber hinaus wird ein Teilmodell für eine umschaltbare Sole-/Wasser-Wärmepumpe mit Modulation entwickelt. Das Wärmepumpenmodell sowie das Tunnelabsorbermodell werden in TRNSYS in einem mehrzonigen Gebäudemodell sowie mit weiteren Komponenten der Wärme- und Kälteerzeugung und der Wärme- und Kälteverteilung gekoppelt, um das Gesamtenergiesystem thermisch abzubilden.

Das Simulationsmodell zeigt, dass sowohl die Tunnelluft als auch das Erdreich wichtige Wärmequellen im Heizbetrieb bzw. Wärmesenken im Kühlbetrieb für den Tunnelabsorber sind. Bei der simulierten Grundvariante stammt die Hälfte der zugeführten Wärme im Heizbetrieb und der abgeführten Wärme im Kühlbetrieb jeweils aus der Tunnelluft und dem Erdreich. Dabei variiert das Verhältnis der beiden Wärmequellen/-senken sowohl über das Jahr als auch mit der Tunnelaktivierungsfläche, dem Temperaturniveau der Tunnelluft und des Tunnelabsorbers sowie dem Heiz- und Kühlbedarf im Gebäude.

Der jährliche Verlauf der Tunnellufttemperatur führt im Winter zu einer Abkühlung und im Sommer zu einer Erwärmung des umgebenden Erdreichs. Gleichzeitig gelten für den Betrieb tunnelgeothermischer Anlagen Vorschriften bezüglich der zulässigen Temperaturveränderung im Erdreich. Dadurch soll verhindert werden, dass eine weitere Abkühlung (Heizbetrieb) bzw. Erwärmung (Kühlbetrieb) stattfindet. Folglich ist es wichtig, dass die Leistung der Wärmepumpe begrenzt werden kann. Somit ist eine Wärmepumpe mit Modulation für einen ganzjährigen Betrieb erforderlich. Mit der entwickelten Wärmepumpenregelung in dieser Arbeit wird bei sämtlichen Simulationen die zugelassene Temperaturveränderung im Erdreich über das Jahr eingehalten. Der Betrieb des Tunnelabsorbers kann darüber hinaus zu einer Taupunktunterschreitung für die Tunnelluft an der Tunnelinnenwandfläche des thermisch aktivierten Bereichs führen. Bei der simulierten Grundvariante geschieht dies für 3% der Gesamtstunden des Heizbetriebs.

Neben der energetischen Betrachtung werden Wärme- und Kältegestehungskosten für die tunnelgeothermische Anlage anhand der Annuitätsmethode untersucht. Dabei sind niedrigere Wärme- und Kältegestehungskosten im Vergleich zu Erdwärmesonden erreichbar, was auf die niedrigeren kapitalgebundenen Kosten zurückzuführen ist. Wichtig dabei ist es, dass die Distanz zwischen dem Gebäude und dem Tunnelabsorber gering und die Temperatur der Tunnelluft über das Jahr stabil ist.

Abstract

Only a small technical effort is required to use tunnels as geothermal sources or sinks for heating and cooling purposes. In this work, a complete energy system – stretching from an end user to a thermally activated tunnel – is numerically modeled in order to evaluate the energetic and economic potential of tunnel geothermal energy for the heating and cooling buildings. For this purpose, a submodel for a tunnel absorber is developed and validated which can be incorporated into the TRNSYS simulation environment. In addition, a submodel for a reversible brine/water heat pump with modulation is developed. The heat pump and the tunnel absorber model are coupled in TRNSYS with a multi-zone building model and other heating and cooling components in order to capture the complete energy system.

The results show that both the tunnel air and the ground play an important role as geothermal sources (heating operation) or sinks (cooling operation) for the tunnel absorber. For the simulated reference case, half of the heat supplied during heating operation and the heat extracted during cooling operation comes from the tunnel air (and the other half from the ground). The ratio of the supplied or extracted heat from the tunnel air and ground varies both over the year and with the amount of activated tunnel area, the temperature level of the tunnel air and absorber and the heating and cooling demand of the building.

The annual temperature variation of the tunnel air leads to that the ground surrounding the tunnel absorber cools down during winter and heats up during summer. At the same time, regulations regarding the maximum allowed temperature change in the ground exist to prevent further temperature changes during heating and cooling operation. It is therefore important that the power of the heat pump can be limited which requires a heat pump with modulation. With the developed control strategy for the heat pump in this work, the requirements for the temperature change in the ground are completely fulfilled for all simulations.

The operation of the tunnel absorber can further lead to that the dew point of the tunnel air is reached at the inner tunnel wall surface of the thermally activated area. For the simulated reference case, this occurs during 3% of the hours in heating operation.

In addition to the energetic investigations, the heating and cooling costs for the tunnel geothermal system are examined using the annuity method. The heating and cooling costs of a tunnel geothermal system can potentially be lower than for a system with borehole heat exchangers, due to their lower investment costs. It is however important that the distance between the building and the tunnel absorber is small and that the temperature of the tunnel air is stable over the year.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VIII
Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Tunnelgeothermie.....	3
2.1.1 Offene und geschlossene Systeme.....	3
2.1.2 Offene und geschlossene Bauweise.....	3
2.1.3 Integration der Tunnelabsorber bei geschlossener Bauweise.....	4
2.1.4 Tunnelgeothermie im Fasanenhoftunnel, Stuttgart.....	4
2.1.5 Betrieb tunnelgeothermischer Anlagen.....	6
2.1.6 Übersicht thermisch aktivierter Tunnel in geschlossener Bauweise.....	7
2.2 Thermische Modellierung von Tunnelabsorbern.....	9
2.2.1 Finite-Differenzen-Methode.....	9
2.2.2 Finite-Elemente-Methode (FEM).....	9
2.2.3 Strömungssimulationen.....	9
2.2.4 Numerische Modelle.....	10
2.2.5 Zusammenfassung.....	10
3 Grundlagen	11
3.1 Wärmetransport.....	11
3.1.1 Wärmeübertragung.....	11
3.1.2 Gesamtwärmeübergangskoeffizient.....	14
3.1.3 Wärmedurchgangskoeffizient.....	15
3.1.4 Numerische Formulierungen des instationären Wärmetransports.....	15
3.2 Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen.....	17
3.3 Druckabfall in durchströmten Rohren.....	20
3.4 Bedarfsentwicklung.....	21
3.4.1 Bedarf.....	21
3.4.2 Raumtemperatur.....	21
3.4.3 Empfundene Luftqualität.....	22
3.4.4 Bedarfsermittlung.....	22
3.4.5 Energetischer Aufwand.....	23
3.5 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.....	23
4 Numerisches Modell für Tunnelabsorber	25
4.1 Einleitung.....	25
4.2 Wärmetransportvorgänge.....	25
4.2.1 Modellannahmen und Koordinatensystem.....	26

4.3	Tunnelwand	26
4.3.1	Wärmeströme im nicht-aktivierten Bereich	28
4.3.2	Wärmeströme im aktivierten Bereich	31
4.4	Erdreich	34
4.4.1	Wärmeströme in den Kreissegmenten im Erdreich	35
4.4.2	Räumliche Diskretisierung	37
4.5	Zwischenfazit	38
4.6	Tunnelluft	38
4.6.1	Ermittlung der Tunnellufttemperatur aus Messdaten im Fasanenhoftunnel	38
4.6.2	Numerische Ermittlung der Tunnellufttemperatur	40
4.6.3	Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten	42
4.7	Ermittlung der erforderlichen Umwälzpumpenleistung	43
4.8	Validierung	44
4.8.1	Randbedingungen	44
4.8.2	Materialeigenschaften für das Erdreich und die Tunnelwand	45
4.8.3	Versuchsaufbau zur Validierung	45
4.8.4	Auswahl der Zeitschrittweite	47
4.8.5	Ergebnisse der Validierung	48
5	Gesamtmodelllaufbau	53
5.1	Bedarf für das Heizen und Kühlen	53
5.1.1	Gebäudedaten	53
5.1.2	Randbedingungen	54
5.1.3	Nutzen und Anforderungen	54
5.1.4	Referenz-Energiebedarf für Heizen und Kühlen	57
5.2	Nutzenübergabe	57
5.2.1	Raumluftechnik	57
5.2.2	Nutzenübergabe für Heizen und Kühlen	58
5.2.3	Energieaufwand	58
5.3	Verteilung	59
5.4	Erzeugung	59
5.4.1	Hydraulische Schaltung und Regelung	59
5.4.2	Nahwärmerohr	62
5.4.3	Wärmeübertrager	62
5.4.4	Umschaltbare Wärmepumpe mit Modulation	62
5.4.5	Durchlauferhitzer und Pufferspeicher	66
6	Simulationsvarianten und Auswertungsmethodik	68
6.1	Simulationsvarianten	68

6.1.1	Grundvariante und Variationen	68
6.1.2	Tunnelaktivierungsfläche	68
6.1.3	Tunnellufttemperatur	68
6.1.4	Wärmequellen im Gebäude	70
6.1.5	Absorbervorlauftemperatur	70
6.1.6	Nahwärmerohrlänge	70
6.1.7	Vergleichsvariante – Erdwärmesonden	71
6.2	Auswertungsmethodik	71
6.2.1	Energetisches Potenzial von Tunnelabsorbern	71
6.2.2	Einfluss des Betriebs des Tunnelabsorbers auf die Temperatur im Erdreich	71
6.2.3	Einfluss der Tunnelluft und des Erdreichs auf den Betrieb des Tunnelabsorbers	72
6.2.4	Einfluss des Tunnelabsorbers auf die Kondensatbildung an der Tunnelinnenwand	72
6.2.5	Wirtschaftliche Bewertung der Tunnelgeothermie	74
7	Ergebnisse	79
7.1	Energetisches Potenzial von Tunnelabsorbern	79
7.1.1	Grundvariante	79
7.1.2	Einfluss der Tunnelaktivierungsfläche	80
7.1.3	Einfluss der Tunnellufttemperatur	82
7.1.4	Einfluss der Wärmequellen im Gebäude	84
7.1.5	Einfluss der Absorbervorlauftemperatur	86
7.1.6	Vergleichsvariante – Erdwärmesonden	87
7.2	Einfluss des Betriebs des Tunnelabsorbers auf die Temperatur im Erdreich	88
7.2.1	Grundvariante	88
7.2.2	Einfluss der Tunnelaktivierungsfläche	91
7.2.3	Einfluss der Wärmequellen im Gebäude	91
7.2.4	Einfluss der Absorbervorlauftemperatur	91
7.3	Einfluss der Tunnelluft und des Erdreichs auf den Betrieb des Tunnelabsorbers	92
7.3.1	Grundvariante	92
7.3.2	Einfluss der Tunnelaktivierungsfläche	94
7.3.3	Einfluss der Tunnellufttemperatur	96
7.3.4	Einfluss der Wärmequellen im Gebäude	97
7.3.5	Einfluss der Absorbervorlauftemperatur	99
7.4	Einfluss des Tunnelabsorbers auf die Kondensatbildung an der Tunnelinnenwand	100
7.4.1	Grundvariante	100
7.4.2	Einfluss der Tunnelaktivierungsfläche	101
7.4.3	Einfluss der Tunnellufttemperatur	102
7.4.4	Einfluss der Wärmequellen im Gebäude	103
7.4.5	Einfluss der Absorbervorlauftemperatur	104

7.5	Wirtschaftliche Bewertung der Tunnelgeothermie	104
7.5.1	Grundvariante	105
7.5.2	Einfluss der Tunnelaktivierungsfläche	106
7.5.3	Einfluss der Tunnellufttemperatur	107
7.5.4	Einfluss der Wärmequellen im Gebäude	108
7.5.5	Einfluss der Absorbervorlauftemperatur	109
7.5.6	Nahwärmerohrlänge	109
7.5.7	Vergleichsvariante – Erdwärmesonden	110
8	Zusammenfassung und Ausblick	112
9	Literaturverzeichnis	118
10	Anhang	126
10.1	Wärmeübergangskoeffizienten	126
10.2	Modellüberprüfung – Erforderliche Zeitschrittweite für Simulationen	127
10.2.1	Analytische Untersuchung	127
10.2.2	Untersuchung in TRNSYS	128
10.3	Modellvalidierung – Tunnelabsorber: Temperatur im Erdreich	129
10.3.1	Kühlbetrieb mit konstanter Vorlauftemperatur	129
10.3.2	Heizbetrieb mit konstanter Vorlauftemperatur	131
10.3.3	Kühlbetrieb mit konstanter Wärmestromdichte	133
10.4	Kennwerte der Bauteile des Bürogebäudes	135
10.5	Größe der außenliegenden Umschließungsflächen	137
10.6	Wärme- und Feuchteeintrag in den Räumen	138
10.7	Simulationsmodelle	140
10.7.1	Type 891: Tunnelabsorber	140
10.7.2	Type 850: Umschaltbare Wärmepumpe	144
10.8	Regelung der Wärme- und Kälteerzeugung	146
10.9	Vergleichsvariante – Erdwärmesonden	147
10.10	Ergebnisse – Energetische Auswertung	149
10.10.1	Grundvariante	149
10.10.2	Einfluss der Tunnelaktivierungsfläche	149
10.10.3	Einfluss der Tunnellufttemperatur	150
10.10.4	Einfluss der Wärmequellen im Gebäude	150
10.10.5	Einfluss der Absorbervorlauftemperatur	151
10.10.6	Vergleichsvariante – Erdwärmesonden	152
10.11	Ergebnisse – Temperaturveränderung im Erdreich	153
10.12	Kosten und Parameter für wirtschaftliche Betrachtungen	156