

Untersuchung der energetisch und ökologisch verwertbaren Nutzbarkeit der solaren Einstrahlung auf urbane Plätze und Wege

InnoGOK

D. Trauninger, M. Winkler,
K. Winiwarter, R. Passawa,
G. Radinger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

9/2019

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Untersuchung der energetisch und ökologisch verwertbaren Nutzbarkeit der solaren Einstrahlung auf urbane Plätze und Wege

InnoGOK

Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Trauninger, Dipl.-Ing. Markus Winkler,
Ing. Klaus Winiwarter, Dipl.-Ing. Rudolf Passawa, MAS,
Arch. Dipl.-Ing. Gregor Radinger, MSc
Donau-Universität Krems / Department für Bauen und Umwelt /
Zentrum für Bauklimatik und Gebäudetechnik

Krems, Juli 2017

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMVIT publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	10
1 Einleitung.....	14
1.1 Aufgabenstellung.....	14
1.1.1 Hintergrund und Problemstellung	14
1.1.2 Forschungsfrage	15
1.1.3 Forschungsansatz und Ziele des Projektes	15
1.2 Stand der Technik.....	16
1.2.1 Ausgangslage und State of the Art	16
1.2.2 Darstellung des Vorprojektes – Ist-Zustand	18
1.3 Verwendete Methoden.....	22
1.3.1 Allgemeines.....	22
1.3.2 Auswertung der Messergebnisse aus dem Vorprojekt.....	22
1.3.3 Messtechnische Untersuchungen an der Versuchsanlage	23
1.3.4 Erstellen eines vereinfachten Rechenmodells	23
1.3.5 Literaturrecherche zum Stand der Technik der Energiespeicherung.....	23
1.3.6 Aufzeigen von Anwendungspotentialen.....	24
2 Ergebnisse	25
2.1 Auswertung der Messergebnisse aus dem Vorprojekt	25
2.1.1 Vorhandene Ergebnisse aus dem Vorprojekt	25
2.1.2 Messdatenauswertungen aus dem Vorprojekt.....	25
2.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse	29
2.1.4 Offene Fragestellungen aus dem Vorprojekt	29
2.1.5 Lastenheft der zukünftigen Mess- und Betriebsszenarien.....	30
2.2 Festlegung des Messaufbaus	31
2.2.1 Notwendige Adaptierungen der Anlage	31
2.2.2 Darstellung der adaptierten Versuchsanlage	31
2.2.3 Definition der Mess-Sensorik.....	36
2.2.4 Definition der Beschattungsvorrichtung	39
2.3 Messergebnisse - Temperaturabsenkung	42
2.3.1 Temperaturabsenkung in Abhängigkeit des Oberflächenmaterials	42
2.3.2 Temperaturabsenkung durch ein Beschattungselement.....	53
2.3.3 Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse	54

2.4	Messergebnisse - Energiegewinnung	55
2.4.1	Wärmeentzug in Abhängigkeit des Oberflächenmaterials und der Vorlauftemperatur.....	55
2.4.2	Abnahme der Entzugsleistung durch Verschattungsmaßnahmen.....	61
2.4.3	Ermittlung einer Kollektorgleichung auf Basis der Messergebnisse	62
2.5	Erstellen eines vereinfachten Rechenmodells.....	65
2.5.1	Allgemeines.....	65
2.5.2	Rechenansatz zur Beschreibung des Modells	66
2.5.3	Verwendete Parameter.....	67
2.5.4	Validierung des Rechenmodells	68
2.6	Parameterstudie auf Basis des Rechenmodells.....	72
2.6.1	Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen	72
2.6.2	Auswirkungen unterschiedlicher Klimarandbedingungen.....	73
2.7	Potential der Energiespeicherung	76
2.7.1	Eisspeicher.....	76
2.7.2	Erdspeicher	85
2.7.3	Vergleich Eis- und Erdspeicher	101
2.8	Möglichkeiten der Anwendung	103
2.8.1	Möglichkeiten der direkten Nutzung.....	103
2.8.2	Möglichkeiten der phasenverschobenen Nutzung	111
3	Schlussfolgerungen	121
4	Ausblick und Empfehlungen	123
5	Verzeichnisse	125
5.1	Abbildungsverzeichnis	125
5.2	Tabellenverzeichnis	128
5.3	Literaturverzeichnis.....	129
5.4	Formelzeichen und Abkürzungen	132
6	Anhang.....	133
6.1	Anhang A - Entzugsleistungen.....	133

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Vor dem Hintergrund der Folgen des Klimawandels stellt sich, unter der Annahme zunehmender Erwärmung städtischer Quartiere, die Frage nach Möglichkeiten zur Bereitstellung geeigneter regenerativer Energieversorgungen im öffentlichen Raum bei gleichzeitiger Erhaltung eines behaglichen urbanen Mikroklimas. Dies ist insbesondere wichtig, da das Wohlbefinden der Nutzer sowohl in Gebäuden als auch in städtischen Außenbereichen entscheidend von den mikroklimatischen Verhältnissen abhängig ist. Die operative Temperatur in Städten ist mittelfristig zu senken (Reduktion von Hitzeinseln), um die Behaglichkeit und Leistungsfähigkeit der Personen, die in ihnen leben, zu erhalten. Andererseits müssen umweltschonende Maßnahmen gefunden werden, um diese umfassenden Behaglichkeitskriterien mit geringstmöglichem Energieaufwand zu erfüllen.

Inhalte und Zielsetzungen

Im Forschungsvorhaben wurde herausgearbeitet, inwieweit bei ganzheitlicher Planung von städtischen Außenbereichen die großzügig vorhandenen, horizontalen Flächen (Verkehrsflächen, Parks, Plätze und Wege) zur Energiegewinnung verwertet werden können. Gleichzeitig wurde das Potential zur Reduktion städtischer Hitzeinseln aufgezeigt.

Ziel war die Sondierung der möglichen Verwertbarkeit der lukrierbaren Energiemengen im direkten Umfeld (z.B. Brauchwassererwärmung, Eisfreihaltung von Verkehrsflächen) und der dafür notwendigen Energiespeicherung für eine phasenverschobene Nutzung der Energie bei gleichzeitiger Reduktion der Oberflächentemperatur durch den Wärmeentzug.

Methodische Vorgehensweise

Die Versuchsanlage der HTL Krems ist mit geeigneten Testflächen und Speichermedien (Eisspeicher und Erdkollektor) ausgestattet, die im Rahmen der Studie technisch adaptiert und mit Messeinrichtungen ergänzt wurden. Mit neu definierten Betriebsszenarien erfolgte eine ausführliche Messkampagne, die daraus resultierenden Messergebnisse wurden einer detaillierten Auswertung und Interpretation unterzogen. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden Zusammenhänge mathematisch dargestellt und für weitere Berechnungen und Parameterstudien verwendet.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das Wärmeentzugspotential v.a. bei der vorhandenen Asphaltfläche groß ist. An sehr sonnigen Tagen sind unter den gegebenen Randbedingungen Entzugsleistungen von bis zu 300 W/m^2 Absorberfläche möglich, während bei der Betontestfläche bis zu 200 W/m^2 erreicht wurden. Gleichzeitig konnte aufgezeigt werden, dass sich die Oberflächentemperaturen durch den Wärmeentzug bei der Asphaltfläche um bis zu 10 K (Asphalt) bzw. 5 K (Beton) reduzieren lassen und damit das Potential zur Entschärfung der Hitzeinselproblematik gegeben ist.

Das Wärmetauscherelement Asphalt/Beton ist auch als free cooling Komponente einsetzbar, wenn die Reduktion urbaner Hitzeinseln nicht im Fokus steht.

Die im Sommer abgeführten Wärmemengen von bis zu 4 kWh/m²d bzw. 250 kWh/m² sind prinzipiell in einem entsprechend großen Erdspeicher (Erdbeckenspeicher oder Tiefensondenfeld) saisonal speicherbar. Dabei sind große Kubaturen ab ca. 1.000 m³ erforderlich, um einerseits die Wärmeverluste gegenüber der Speicherkapazität aufgrund eines besseren A/V-Verhältnisses auf ein vernünftiges Maß zu senken bzw. andererseits wirtschaftlich zu bleiben. Durch die phasenverschobene Nutzung ist ein breites Anwendungsfeld gegeben.

Ausblick

Im vorliegenden Sondierungsprojekt konnten wesentliche Potentiale zur Reduktion städtischer Hitzeinseln durch Wärmeentzug aus horizontal versiegelten Flächen aufgezeigt werden. Die zahlreich möglichen Anwendungsfälle sind aus technischer Sicht gegeben, müssen jedoch in einem nächsten Schritt v.a. im Hinblick auf deren ökonomische und ökologische Sinnhaftigkeit untersucht werden.

Da die Nutzungskonzepte den Schwankungen des Mikroklimas unterliegen und die Absorberflächen in thermischer Verbindung mit dem Erdreich stehen, müssen diese jedenfalls instationär betrachtet bzw. simuliert werden, um nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Aussagen für die konkrete Umsetzbarkeit in einem realen Umfeld tätigen zu können. Außer Acht gelassen dürfen dabei weder praktische Rahmenbedingungen wie größtmögliche Flexibilität gegenüber nachträglichen Einbauten bzw. Sanierungen sowie Bandbreiten bei den Simulationsparametern.

Abstract

Starting point/Motivation

Concerning the consequences of global climate change and consequently increasing urban heat islands, the question arises how to provide suitable renewable energy out of public spaces, while maintaining a comfortable urban microclimate. This is particularly important, because health and general well-being of inhabitants, working and living in buildings as well as in urban outdoor areas, depend decisively from urban microclimate conditions.

The operative temperature of cities has to be lowered sufficiently by reducing urban heat island effects to retain comfort and physical fitness criteria of city inhabitants.

On the other hand, environmentally-friendly measures have to be found to fulfil those comfort criteria in combination with lowest possible energy demand.

Contents and Objectives

The aim of this research project is to work out the feasibility of the use of solar energy, collected on the huge amount of existing horizontal ground surfaces in cities (highways, squares, parks, sports grounds). This option is seen as an alternative for conventional thermal solar energy systems. At the same time the potential for reducing urban heat islands was shown. The energy gained from urban surfaces is thought to be used in the close surroundings (e.g. for heating water, or keeping traffic routes clear of ice), in combination with intelligent energy storage methods for time-delayed use of the gained energy while at the same time, this discharge leads to a reduction of surface temperatures.

Methods

The HTL (higher technical college) in Krems is equipped with outdoor test surfaces and energy storage devices (ice storage unit, ground heat exchanger). These testing facilities have been modified and adapted with measuring devices for a comprehensive monitoring. Based on the evaluated results, mathematical connections have been worked out for further calculations and parameter studies.

Results

The results suggest a high potential for heat exchange functionalities especially for the existing asphalt surface. Heat outputs up to 300 W/m^2 are possible on very sunny days whereas the existing concrete test surface is able to provide up to 200 W/m^2 . At the same time it is possible to reduce the surface temperatures up to 10 K (asphalt) resp. 5 K (concrete) as a result of the heat discharge which indicates the potential for reducing urban heat islands.

The asphalt/concrete heat exchanger element can also be used as a free cooling component if the reduction of urban heat islands is not the main focus.

In summer the amount of discharged heat up to 4 kWh/m²d or 250 kWh/m² is technically possible to store the heat seasonally in large earth storage or borehole tanks. In this case a correspondingly large amount of cubic meters of earth from about 1.000 m³ is required in order to reduce the heat losses against the storage capacity. The phase-shifting use provides a broad field of application.

Prospects / Suggestions for future

In this project, significant potentials for the reduction of urban heat islands by heat discharge from horizontally sealed areas were figured out. The numerous possible applications are given from a technical point of view. In a next step the system has to be investigated in an economically and ecologically point of view.

Transient simulations have to be carried out in regard to the wide fluctuations of the microclimate as well as the thermal connection of the absorber to the soil. This enables quantitative statements for the feasibility in a real environment. Particular attention must be paid to a high flexibility in respect to subsequent installations or restorations. Bandwidths for the simulation parameters have to be considered as well.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

1.1.1 Hintergrund und Problemstellung

Unsere Generation steht vor der großen Herausforderung des weltweiten Klimawandels. In Anbetracht der Tatsache, dass in Österreich die Temperatur seit 1880 im Vergleich mit der globalen Erwärmung mehr als doppelt so hoch gestiegen ist¹, nimmt diese Herausforderung in Österreich einen besonderen Stellenwert ein.

Für die Entwicklung einer zukunftsfähigen Architektur bedeutet dies, dass entsprechende Planungsstrategien zur Minimierung bzw. Vermeidung des Kühlenergiebedarfs von Gebäuden gefunden werden müssen.

Vor allem in Städten wird u.a. durch die dichte Bebauungsweise ein Mikroklima mit Problemen der sommerlichen Überhitzung geschaffen.

Dies ist neben der zunehmenden Verstädterung zu einem signifikanten Teil auch auf die, in urbanen Bereichen vermehrt vorhandenen, versiegelten Flächen zurückzuführen. Durch die Zunahme an versiegelten Bodenflächen wird die Problematik der sommerlichen Überhitzung weiter verschärft, da sich diese Flächen im Sommer stark aufheizen und zu einem signifikanten Temperaturanstieg im mikroklimatischem Kontext führen können. Dadurch entstehen regelrechte Hitzeinseln, sogenannte Urban Heat Islands (UHI), die einen zunehmenden Komfortverlust für Stadtbewohner durch erhöhte Hitzebelastung in Gebäuden und urbanen Freiräumen bewirken.

Ein Rückbau und Wegfall solcher Flächen ist in naher Zukunft nicht realistisch und nicht angestrebt, denn die Nutzung dieser versiegelten Flächen ist äußerst vielseitig. Zum einen werden nicht nur Straßen und Parkplätze, sondern auch Rad- und Fußwege gebraucht, zum anderen dienen Parks, Spiel- und Sportplätze für die nötigen Ruhe- und Freizeitzone in städtischen Gebieten.

Eine Minimierung dieser versiegelten Flächen (z.B. durch Reduzierung der für Autos benutzten Bereiche) ist somit nur bis zu einem gewissen Grad möglich, denn auch Fuß- und Radwege müssen aus vielseitigen Gründen (z.B. Sicherheit, Komfort, Nutzbarkeit, Reinigbarkeit, etc.) befestigt ausgeführt werden.

Es wäre damit äußerst sinnvoll diese städtischen „Hitze Kollektoren“ als Energiegewinnflächen heranzuziehen. Damit kann einerseits frei verfügbare erneuerbare Energie gewonnen werden und andererseits durch Wärmeabfuhr aus diesen Flächen eine Entschärfung der städtischen Hitzeinseln geschaffen werden.

¹ 2°C verglichen mit einem globalen Mittel seit 1880 um fast 1°C (vgl. Kromp-Kolb, Nakicenovic, Steininger (2014), S.28)

1.1.2 Forschungsfrage

Es stellt sich die Frage, inwieweit sich befestigte und unbefestigte horizontale Flächen im städtischen Raum (öffentliche Verkehrsflächen, Plätze, Wege, Parks, Sportanlagen u.dgl.) zur Wärmenutzung, insbesondere infolge solarer Einstrahlung, eignen. Falls diese regenerative Energiebereitstellung wirtschaftlich genutzt werden kann, werden damit wesentliche Möglichkeiten zur Ressourcenschonung und Energieeffizienz im städtischen Kontext eröffnet.

Neben der Nutzung natürlich vorhandener Sonnenenergie, anstelle von in Kraftwerken erzeugten und daher mit zum Teil erheblichem Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen behafteten Energieformen, stellt sich die Frage, inwieweit die großflächige Nutzung der Abwärme von solar erwärmten horizontalen Flächen der Entstehung urbaner Hitzeinseln entgegenwirken kann. Durch die Abfuhr von Wärme und somit Reduktion der Oberflächentemperatur ist eine Absenkung der Umgebungstemperatur zu erwarten, die eine enorm positive Auswirkungen auf die sommerliche regionale, lokale und gebäudebezogene Energiebilanz hätte. In weiterer Folge würde dies der Komfortsteigerung für die Menschen, sowohl im städtischen Freiraum als auch in Gebäuden, dienen.

Zudem soll untersucht werden, inwieweit die Abwärmenutzung phasenverschoben genutzt werden kann, um damit die im Sommer entzogene Wärme auch für den Winter nutzbar zu machen. Es stellt sich die Frage, inwieweit die phasenverschobene Wärmenutzung entweder anderen Zwecken zur Verfügung steht (z.B. Heizung, Warmwasser, ...) oder der Straße selbst zur Eisfreiheit dienen kann, um damit auch sekundäre umweltschädigende Einflüsse der Salzstreuung reduzieren zu können.

1.1.3 Forschungsansatz und Ziele des Projektes

Ob und in welchem Umfang eine derartige Wärmeentnahme, Speicherung und Nutzung technisch überhaupt durchführbar und sinnvoll ist und ob diese Maßnahmen zu einer Reduktion der Umgebungstemperatur führen, soll dieses Forschungsprojekt aufzeigen.

Das Forschungsprojekt baut auf einen bereits bestehenden Versuchsaufbau der höheren technischen Bundeslehranstalt Krems auf. Die Auswertung der Messungen der vorhandenen Versuchsanlage, die Erarbeitung aktualisierter Betriebsszenarien der Versuchsanlage mit erweitertem Messumfang, in weiterer Folge die Transformation der gewonnenen Ergebnisse auf städtische Größenordnungen, und schließlich die Verknüpfung mit dem Potential von Speichermedien (z.B. Erd- oder Eisspeicher) soll aufzeigen, in welchem Maßstab urbane Flächen zur Energienutzung herangezogen werden können.

Mit der Einbeziehung der HTL Krems wird mittelbar ein Beitrag zu Aufbau und Sicherung der Technologieführerschaft heimischer Ausbildungsstätten geleistet. Das diesem Forschungsvorhaben innewohnende Innovationspotential soll damit auch die Fachkompetenz heimischer Lehr- und Forschungseinrichtungen stärken.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Ausgangslage und State of the Art

Unter Anbetracht des steigenden Energieverbrauchs muss die Unabhängigkeit von nicht-erneuerbaren Energiequellen vor allem im öffentlichen Raum eine zentralere Rolle einnehmen. Obzwar die thermische Qualität der Gebäude immer energieeffizienter ausgeführt wird, steigt der Primärenergiebedarf im Gebäudesektor stetig (u.a. durch Rebound Effekte, Zunahme der Nutzflächen, etc.).

In diesem Zusammenhang nimmt vor allem der außeninduzierte Kühlenergiebedarf angesichts der stetig steigenden Außenraumtemperaturen² einen immer höheren Stellenwert ein. Vor allem im städtischen Bereich nimmt der Kühlenergiebedarf durch den sogenannten urbanen Hitzeinseleffekt aufgrund der Zunahme versiegelter Flächen und dichter Bebauungsstrukturen einen immer höheren Stellenwert ein.

Es gibt zwar bereits vielerlei Ansätze zur Reduktion städtischer Hitzeinseln. Beispielsweise kann durch Maßnahmen wie offenere Bebauungsstrukturen, der energetischen Optimierung des Gebäudes statt dem Einbau komplexer Haustechniksysteme, der Nutzbarkeit von erneuerbaren Energietechnologien, der integralen Planung zur Nutzung der architektonischen Möglichkeiten, der Schaffung von Grünräumen u.v.m. der Kühlenergiebedarf in Städten signifikant gesenkt werden. Dennoch ist mit einer weiteren Zunahme der versiegelten Flächen aufgrund der vorhandenen Urbanisierung zu rechnen, weshalb auch hier Lösungen gefunden werden müssen, um das Aufheizen dieser Flächen einerseits zu minimieren und andererseits diese Flächen sinnvoll in das Energiekonzept der Stadt zu integrieren.

Die konkrete Nutzung von versiegelten horizontalen Flächen als Energiegewinnfläche im Zusammenhang mit einer sinnvollen Zwischenspeicherung wurde bereits weltweit untersucht und erprobt. Vorrangig stand und steht dabei allerdings immer die Eisfreihaltung dieser Flächen im Winter im Vordergrund.

In Klamath Falls, Oregon, werden beispielsweise öffentliche Räume wie Gehwege, Haltestellen und Fußgängerübergänge durch mit Thermalwasser beheizten Betonschichten eisfrei gehalten.³ In Ninohe, Japan, wird ein abschüssiges, kurvenreiches Straßenstück mit geothermischer Energie und der im Sommer gespeicherten Solarenergie im Winter eisfrei gehalten.⁴ Des Weiteren werden in Japan z.B. in Aomori City auch Bürgersteige gekühlt und beheizt. Die im Sommer entzogene Wärme wird auch hier saisonal gespeichert und im Winter zur Eisfreihaltung genutzt.⁵ In Haringvliet, Niederlande, wurde versuchsweise eine vierspurige

² An dieser Stelle sei angemerkt, dass nicht nur die Außentemperaturen, sondern auch andere Faktoren wie z.B. architektonische Planungsstrategien, fehlende interdisziplinäre Ansätze sowie erhöhte Behaglichkeitsanforderungen zu einem signifikanten Anstieg des Kühlenergiebedarfs führen! (vgl. dazu bspw. smartKB* - Forschungsprojekt im Rahmen Haus der Zukunft (2014) - Reduktion des Kühlenergiebedarfs durch optimierte Bebauungsstrukturen und Prozess- und Entwurfsoptimierung in der Gebäudeplanung)

³ Würtele et.al (2005)

⁴ Morita (2000)

⁵ Morita (2005)

Straße im Sommer gekühlt und im Winter eisfrei gehalten und die gewonnene Energie in einem Aquiferspeicher zwischengespeichert. Das im Sommer auf 20° erwärmte Grundwasser konnte bis zum Winter auf 14° gehalten werden. Durch die Eisfreihaltung wurde es im Laufe des Winters auf 6° abgekühlt.

In einem in den Niederlanden im Jahr 2000 initiierten Projekt mit dem Titel „Pilot Energiek Wegdek“ wird das Potential der Energiegewinnung mit 223 kWh/m²a Asphaltfläche prognostiziert.⁶ Ebenfalls in den Niederlanden entwickelt wurde das Road Energy System©. Das Herzstück des Systems bildet dabei ein im Asphalt integriertes Rohrnetz, welches im Sommer zur Kühlung und im Winter zur Beheizung der Straßen dient und einen Jahresertrag von 250 kWh/m²a erzielt.⁷

In der Schweiz wurde im Zuge des Projektes SERSO und SERSO PLUS eine Brücke (SERSO) bzw. ein Straßenzug (SERSO PLUS) mit Rohrregistern ausgelegt.³ Über den Brückenbelag können im Sommer knapp 100 kWh/m² an Wärme entzogen und in einen daneben liegenden Felspeicher eingespeichert werden. Bis in die Wintermonate können 2/3 dieser eingespeicherten Energie erhalten werden, wo ca. die Hälfte der im Sommer entzogenen Energie für die Eisfreihaltung gebraucht wird. Im Projekt SERSO konnte deutlich aufgezeigt werden, dass im Sommer inkl. der saisonalen Verluste wesentlich mehr Energie eingespeichert werden kann als im Winter zur Eisfreihaltung benötigt wird.⁸

Ebenfalls zur Eisfreihaltung dient das in Deutschland entwickelte Winterdienstsystem QuaWIDIS®, welches vorrangig für Bahnsteige und vorhandene Freiflächen sowie Zugangswege rund um den Bahnsteig entwickelt wurde. Auch in diesem Projekt wurde die im Sommer entzogene Energie im Baugrund zwischengespeichert, wobei an heißen Tagen maximale Kühlleistungen von bis zu 450 W/m² gemessen wurden.

Durch die bereits vorhandenen Projekte kann jedenfalls aufgezeigt werden, dass das Potential zur Eisfreihaltung in Kombination mit einer Energiegewinnung und Zwischenspeicherung durchaus gegeben ist.

Wobei allgemein festzustellen ist, dass detaillierte Werte zu den Randbedingungen wie Vorlauftemperaturen, Durchflussraten etc. v.a. in hoher zeitlicher Auflösung (z.B. h-Werte) in den Literaturangaben nicht zu finden sind.

Zudem fehlen Einschätzungen zur Auswirkung auf urbane sommerliche Hitzeinseln durch den Abzug von Wärmeenergie.

⁶ Wijers et.al. (2000) aus Würtele et.al. (2005)

⁷ Sullivan et.al.

⁸ Meschter (1999)

Das vorliegende Sondierungsprojekt widmet sich deshalb neben dem Energiegewinnungspotential in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen vorrangig der Sinnhaftigkeit und technischen sowie praktischen Umsetzbarkeit solcher Systeme im städtischen Kontext, um damit das Potential zur Minimierung der Außentemperaturen durch einen oberflächennahen Wärmeentzug aufzuzeigen.

Als Endergebnis wird ein Konzept zur Umsetzung an einem städtischen Quartier erstellt. Mit der Realisierung dieser Folgestudie soll schlussendlich ein Beitrag zur Vision von energieneutralen, resilienten und vor allem zukunftsfähigen Städten geschaffen werden.

1.2.2 Darstellung des Vorprojektes – Ist-Zustand

1.2.2.1 Allgemeines

Als Vorprojekt und somit Ausgangslage dieses Forschungsprojektes dient eine bereits errichtete Versuchsanlage der HTL Krems, welche im Jahr 2010-2013 mittels Bauteilaktivierung und Speicherung von Wärme aus verschiedenen horizontalen und vertikalen Bauelementen errichtet wurde. Es wurden bereits erste Erkenntnisse gewonnen, ob und welche außen liegenden Bauelemente (Asphalt, Beton, Kunstrasen, Fassadenflächen) zur Energiegewinnung genutzt werden können.⁹

Im Zuge des Projektes wurde eine Kooperation mit österreichischen und internationalen Unternehmen und Forschungspartnern¹⁰ sowie verschiedenen Ausbildungszweigen in höheren technischen Lehranstalten geschlossen. Die Hauptidee dieses Projektes bestand vor allem darin, eine interdisziplinäre, praxisrelevante Zusammenarbeit zwischen Schülern verschiedener höherer Ausbildungseinrichtungen zu schaffen. Die praktische Umsetzbarkeit sollte dabei vorwiegend durch die Schüler der HTL Krems (Ausbildungszweig Hochbau) und die wirtschaftliche Umsetzbarkeit durch die Schüler der New Design University St. Pölten erfolgen, während die Schüler der IT-Abteilung der HTL Krems die Messergebnisse aufzeichnen und auswerten sollten.

Ziel und Fragestellung dieses Projektes war es, inwieweit eine, in unmittelbarer Nähe gewonnene und gespeicherte, Energie für den Verbraucher, v.a. zum Bedarfszeitpunkt, effizient nutzbar gemacht werden kann. Dabei sollten sowohl praxisrelevante als auch wirtschaftliche Aspekte mitberücksichtigt werden. Konkret wurde die gespeicherte Energie einem in der Nachbarschaft befindlichen Dienstleistungsbetrieb (Firma ARBÖ Krems) bereitgestellt. Aufgrund personeller Engpässe konnten die Forschungsfragen nur bedingt beantwortet werden, jedoch wurde ein Monitoringsystem installiert (Wetterdaten, abgeführte Wärmemengen, ...) welche als Grundlage für das vorliegende Projekt herangezogen werden.

⁹ Vgl. Schäfer (2015)

¹⁰ Forschungspartner: BIG Bundes Immobilien Gesellschaft, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Energiesonderbeauftragte des Bundes, Siemens AG Österreich, ees energy environmental solutions

1.2.2.2 Beschreibung des bestehenden Versuchsaufbaus:

Die Versuchsanlage befindet sich in 3500 Krems, Gewerbeparkstraße 28 und besteht aus folgenden Hauptkomponenten:¹¹

1. Horizontale, mit hydraulischen Kreisen aktivierte, Versuchsflächen (Asphalt, Beton, Kunstrasen) zur Gewinnung von Energie aus solarer Einstrahlung. Jeder Bauteil beinhaltet zumindest eine Hydraulikgruppe mit Mischventil, Umwälzpumpe und Komponenten zur Erfassung der Wärmemengen (Durchflussmengen, Erfassung der Vor- und Rücklauftemperatur).
2. Eisspeicher zur Zwischenspeicherung der gewonnenen Energie, ebenfalls ausgestattet mit Komponenten zur Erfassung der Wärmemengen zur Ermittlung der in den Eisspeicher gelieferten und entnommenen Energie.
3. Erdkollektor zur Zwischenspeicherung der gewonnenen Energie, ebenfalls ausgestattet mit Komponenten zur Erfassung der Wärmemengen zur Ermittlung der in das Erdreich gelieferten und entnommenen Energie.
4. 3 Pufferspeicher mit je ca. 200 l Volumen mit unterschiedlichen Ziel-Temperaturniveaus zur Mischung der gewünschten Vorlauftemperatur
5. Wärmepumpe mit aktiver Kühlfunktion zur Konditionierung der Pufferspeicher
6. Abwärmegerät zur Entsorgung überschüssiger Wärme (wurde im Zuge des vorliegenden Projektes aufgrund der Ineffizienz seitens der HTL Krems abgebaut)
7. Wetterstation zur Messung der am Ort vorhandenen Klimaparameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Regenmenge, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Luftdruck (online verfügbar unter: <http://www.htlkrems.ac.at/hp/service/links-partner/>)

Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen die bestehende Versuchsanlage in Ihrem ursprünglichen Zustand (vor dem Umbau für das bestehende Projekt):

¹¹ Es befinden sich noch weitere, derzeit für dieses Projekt irrelevante, Komponenten wie z.B. ein vertikaler Betonkubus, verschiedene Fenster- und Fassadenelemente sowie eine derzeit in Bau befindliche thermische Solaranlage am Gelände welche teils stillstehen und teils für andere Untersuchungen genutzt werden. Nachfolgend werden jedenfalls nur die, für dieses Projekt relevanten Komponenten aufgelistet.



Abbildung 1: Versuchsgelände HTL Krenns (links: ARBÖ, Bildmitte: Versuchsflächen, vorne Beton hinten Asphalt)



Abbildung 2: Versuchsgelände HTL Krenns (vorne: Kunstrasenfläche, hinten: Versuchskubus mit Pufferspeicher, Wärmepumpe, E-Verteilung und EDV-Ausstattung)

1.2.2.3 Relevante Projektergebnisse

Das Projekt diente einerseits der praktischen Wissensvermittlung vorhandener Technologien an Schüler der HTL Krems. Im Zuge dessen konnte exemplarisch zu Unterrichtszwecken aufgezeigt werden, dass durch den Eisspeicher ein beträchtliches Potential der Energiespeicherung, im Zuge des Aggregatwechsels von fest auf flüssig als auch von flüssig auf fest, zur Verfügung steht.

Andererseits sollte das Projekt auch für Forschungszwecke genutzt werden. Im Zuge dessen zeigte sich, dass sich v.a. dunkle Asphaltflächen zur Energiegewinnung eignen, während durch die Aktivierung von Beton- und v.a. Grünflächen wesentlich geringere spezifische Energieerträge lukriert werden können. Die Messergebnisse sowie Datenauswertungen dazu werden in Kap. 2.1 detailliert dargestellt.

Im Zuge des Forschungsprojektes wurde das Nachbargebäude zudem teilweise mit Heiz- und Kühlenergie aus den Versuchsflächen sowie dem Eisspeicher versorgt. Nähere Aufzeichnungen zu diesen Verbräuchen sind leider nicht vorhanden.

1.2.2.4 Offene Fragestellungen

Obzwar durch die Ergebnisse der Versuchsanlage erste Tendenzen und Perspektiven der Energiegewinnung aufgezeigt werden konnten, sind eine detaillierte Auswertung und Interpretation der Messergebnisse sowie Untersuchungen zur praxisrelevanten Durchführbarkeit ausständig.

Des Weiteren fehlen Aussagen darüber, inwieweit der sommerliche Wärmeentzug zu einer Reduzierung der Oberflächen- und damit Umgebungstemperatur in der Praxis führen kann.

Ebenso sind Betrachtungen im Zusammenhang mit der Intensität der solaren Einstrahlung sowie Auswirkungen der Verschattung ausständig.

Durch die umfangreichen Messergebnisse der letzten 2 Jahre und dem vorhandenen Versuchsaufbau steht jedenfalls eine gute Basis zur Verfügung, welche zu einem signifikanten Teil für eine Vorstudie zur Untersuchung der praxisrelevanten Umsetzbarkeit aktivierter versiegelter Stadtflächen in urbanen Bereichen genutzt werden kann.

Zusammenfassend soll das vorliegende Sondierungsprojekt folgende offene Fragestellungen beantworten:

- Wie hoch ist das Potential zur Reduktion von Hitzeinseln durch einen Wärmeentzug?
- Wie hoch ist das Potential der Energiegewinnung durch einen Wärmeentzug?
- Welche Möglichkeiten gibt es zur direkten und phasenverschobenen Nutzung der entzogenen Wärmemengen?

1.3 Verwendete Methoden

1.3.1 Allgemeines

Zur Beantwortung der Forschungsfragestellung lt. Kap. 1.1.2 kommen folgende Methoden in Ihrer Reihenfolge zur Anwendung:

- Auswertung der Messergebnisse aus dem Vorprojekt sowie darauf aufbauend Umbau der bestehenden Versuchsanlage
- Messtechnische Untersuchung an der Versuchsanlage und Auswertung der Ergebnisse
- Erstellung eines vereinfachten Rechenmodells zur Abschätzung des Potentials der Energiegewinnung sowie der Reduktion von Hitzeinseln bei unterschiedlichen Randbedingungen
- Literaturrecherche zum Stand der Technik der Energiespeicherung mittels Eis- und Erdspeicher zur Abschätzung des Potentials der phasenverschobenen Nutzung
- Aufzeigen von Anwendungspotentialen sowie Konzepterstellung für ein Demonstrationsvorhaben

1.3.2 Auswertung der Messergebnisse aus dem Vorprojekt

Die aus dem Vorprojekt vorhandenen Messergebnisse wurden in einem ersten Schritt analysiert. Es konnte auf eine bereits umfangreiche Datensammlung zurückgegriffen werden. Folgende Datenaufzeichnungen sind vorhanden:

- Wetterdaten (Tagesmittelwerte ab dem 25.05.2011):
 - Windgeschwindigkeiten
 - Temperaturen (Minimal- und Maximaltemperaturen, Durchschnittstemperaturen)
- Bauteil-Kerntemperaturen in °C (gemessen)
- Vor- und Rücklauftemperaturen in °C (gemessen)
- Durchflussmengen bzw. Volumenstrom in l/h (gemessen)
- Gesamtenergie in kWh (berechnet)

Die Auswertungen der Messergebnisse erfolgten mittels des Softwarepakets Microsoft Excel. Damit konnten bereits erste Aussagen zu oben genannten Fragestellungen getroffen werden. Darauf aufbauend wurden in einem nächsten Schritt Maßnahmen für eine Adaptierung der Messanlage definiert sowie als Zielsetzung eines Lastenhefts (vgl. 2.1.5) für neue Mess- und Betriebsszenarien zur Beantwortung der in diesem Forschungsprojekt relevanten Fragestellungen erstellt.

Die technischen Adaptierungen wurden maßgeblich durch die Schüler der bautechnischen Abteilung der HTL Krems durchgeführt. Die Modifikation der Mess- und Betriebsszenarien erfolgte durch die Firma ees (energy environment solutions GmbH), welche mit der Regelungstechnik der Anlage betraut ist.

1.3.3 Messtechnische Untersuchungen an der Versuchsanlage

Nach dem entsprechenden Umbau der Versuchsanlage wurden die Messungen entsprechend dem Lastenheft (vgl. 2.1.5) durchgeführt sowie anschließend analysiert und bewertet. Die Messungen erfolgten im Zeitraum von Juni bis September 2016 und umfassen folgende Aufzeichnungen:

- Messung der Oberflächentemperatur der Versuchsflächen
- Messung der Außenluft- und operativen Temperatur über den Versuchsflächen
- Messung der Kerntemperaturen der Versuchsflächen
- Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen
- Messung der Durchflussraten
- Messung der Klimarandbedingungen während der Messungen (Temperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit)

Die Messdaten wurden aus dem Regelungs- und Messprogramm ausgelesen und als Excel-Datei exportiert. Die auf Basis dieser Datei ausgewerteten Ergebnisse wurden in Form von Diagrammen bei unterschiedlichen Betriebsszenarien in den entsprechenden Kapiteln dargestellt.

Schlussendlich konnte auf Basis der Messergebnisse eine Kollektorgleichung erstellt werden, welche als Grundlage für die nachfolgenden Berechnungen und Parameterstudien herangezogen wurde.

1.3.4 Erstellen eines vereinfachten Rechenmodells

Auf Basis einer Energiebilanzgleichung wurde ein vereinfachtes, statisches Rechenmodell erstellt. Mit Hilfe der Messergebnisse wurde das Rechenmodell derart aufgebaut, dass schlussendlich eine validierte Parameterstudie bei unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt werden konnte.

Die Ergebnisse dieser Parameterstudie zeigen eine klar definierte Gegenüberstellung der Asphalt- und Betonfläche im Hinblick auf deren möglichen Energiegewinnung in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung, Verschattung, Temperatur, etc. sowie das mögliche Potential zur Oberflächentemperaturabsenkung.

1.3.5 Literaturrecherche zum Stand der Technik der Energiespeicherung

Der „Erdspeicher“ der Versuchsanlage befindet sich unmittelbar unter dem Messcontainer der Versuchsanlage und ist daher praktisch nicht mehr ohne aufwändige Maßnahmen zugänglich. Aufgrund der geringen Fläche und horizontalen Verlegung der Rohre ist dieser Teil der Anlage vom Prinzip her ein Flachkollektor, der jedoch nur über Randeinflüsse mittelbar mit Solarenergie regeneriert werden kann. Im Zuge des Projekts wurden alle an der Errichtung dieses Anlagenteiles beteiligten Personen bzw. Unternehmen kontaktiert, um genaue Aufzeichnungen über die Lage und Dimensionen der Rohrregister sowie des Materials zur Wiederverfüllung in Erfahrung zu bringen.

Da im Zuge des Vorprojektes keine detaillierten Aufzeichnungen vorhanden waren und die Kontaktaufnahmen keine weiteren Unterlagen zur Erfassung dieses „Erdspeichers“ ergaben, sind die vorliegenden Messergebnisse keinesfalls wissenschaftlich zu verwerten. Die Funktion dieses Flachkollektors entspricht aufgrund der vermuteten Dimension der eines Wärmetauschers zur Abfuhr von Wärmelasten, wie sie bei den versiegelten Versuchsflächen auftraten. Die Speicherfunktion ist hingegen aus dem derzeitigen Kenntnisstand wahrscheinlich nicht gegeben. Auf Basis der geringen Kenntnisse über die beiden in der Versuchsanlage vorhandenen Speichertechniken (Eis- und Erdspeicher), die zudem von der Größe her sehr klein in Relation zu anderen gebauten Beispielen sind, erfolgte eine ausgedehnte Literaturrecherche zu diesen Themengebieten. Dabei zeigten sich Größenordnungen, die einerseits vielfältige Anwendungsmöglichkeiten und andererseits enorme Speicherkapazitäten demonstrieren. Das Baujahr der vorhandenen Speicher liegt teilweise Jahrzehnte zurück, jüngere Beispiele weisen dagegen besser dokumentierte Messwerte und Versuchsaufbauten auf.

Allenfalls zeigt die gebaute Praxis auch im Eins-zu-eins-Maßstab die Funktionstauglichkeit solcher Speichersysteme von wenigen bis hin zu mehreren Tausend m³ großen Wärmespeichern.

1.3.6 Aufzeigen von Anwendungspotentialen

Einen wichtigen Teil dieser Sondierung stellt die Zusammenführung aller gewonnenen Erkenntnisse dar, womit das Potential zur tatsächlichen Nutzung und technischen Durchführbarkeit überprüft wird.

Durch eine Verknüpfung der erarbeiteten Ergebnisse aus den Mess- und Rechenergebnissen zur Abschätzung des Potentials der Energiegewinnung mit den Ergebnissen der Literaturrecherche zur Abschätzung des Potentials der Energiespeicherung werden schlussendlich die Möglichkeiten der Anwendung aufgezeigt.

Es wurden Voraussetzungen und Bedingungen für die direkte und phasenverschobene Nutzung definiert werden, um konkrete Maßnahmenpakete für Stadtquartiere anwendbar zu machen (z.B. Wärmeentzug von Straßen und Plätzen, Zwischenspeicherung, Nutzung zur Eisfreihaltung etc.).

Schlussendlich wurde ein Konzept für ein etwaiges Folgeprojekt erstellt, welches neben den Parametern für eine detaillierte thermodynamische Simulation auch die Umsetzungsschritte in einem realen Stadtumfeld beschreibt.

2 Ergebnisse

2.1 Auswertung der Messergebnisse aus dem Vorprojekt

2.1.1 Vorhandene Ergebnisse aus dem Vorprojekt

Das Vorprojekt der HTL Krems untersuchte die Fragestellung, inwieweit horizontale, außenliegende Bauelemente (Asphaltbelag, Betonbelag, Rasenfläche) zur Energiegewinnung genutzt werden können. Im Rahmen dieses Vorprojektes wurde untersucht, in welchem Ausmaß die Abwärme für den Kunden (Firma ARBÖ Krems) am Nachbargrundstück zum Bedarfszeitpunkt nutzbar gemacht werden kann. Zur Lastverschiebung wurde dabei ein Eisspeicher der Firma Isocal für die Energiespeicherung genutzt, um damit über eine Wärmepumpe im Winter heizen und im Sommer kühlen zu können.

Zusammenfassend wurden folgende Aussagen aus den Auswertungen der bestehenden Ergebnisse getroffen:¹²

- Der Hauptenergieeintrag zur Regeneration des Eisspeichers kommt in der Regel von der Asphaltfläche. In Verbindung mit einer Wärmepumpe ist Asphalt für die Energiegewinnung (Beheizung und Kühlung ARBÖ) geeignet.
- Bei entsprechender Sonneneinstrahlung kann die Kerntemperatur des Asphalts über 45°C erreichen, Beton erreicht ca. 35°C und Kunstrasen erreicht ca. 25°C.
- Der Eisspeicher kann bei annähernd gleichbleibender Kälteleistung in ca. 24 h von +10°C (flüssig) auf nahezu 0°C (flüssig) abgekühlt werden. Für den Phasenwechsel von flüssig auf fest (von ca. 0,1°C (flüssig) bis -0,2°C (fest)) wird die 10-fache Zeit benötigt (240 h). Selbiges gilt auch für das Regenerieren des Eisspeichers beim Phasenwechsel.

2.1.2 Messdatenauswertungen aus dem Vorprojekt

Unabhängig von den bereits getätigten Aussagen werden die vorhandenen Messergebnisse aus dem Vorprojekt für die in diesem Projekt relevanten Fragestellungen ausgewertet.

Es liegen Daten zur Energiegewinnung aus der Asphalt, Beton- und Kunstrasenfläche vor. Ebenso gemessen wurde die Kerntemperatur der Flächen.

Kontinuierliche Messungen wurden im Sommer 2014 im Zeitraum vom 09.08.2014 bis 20.08.2014 durchgeführt, wobei folgende Randbedingungen über den Messzeitraum konstant gehalten wurden:

- Durchflussrate pro m² Versuchsfläche: 10-12 l/h
- Vorlauftemperatur = Lufttemperatur (ohne solare Wirkung).

¹² Vgl. Schäfer (2015)

Beabsichtigt bei der Wahl dieser Vorlauftemperatur war, die um den solaren Eintrag erhöhte Rücklauftemperatur und damit gewonnene Wärmemengen mittels Wärmemengenmessung zu erfassen und auszuwerten.

In einem ersten Schritt wird die Entzugsleistung zur Abschätzung der Entzugsleistung der einzelnen Flächen grafisch über den Zeitraum der Messung dargestellt:

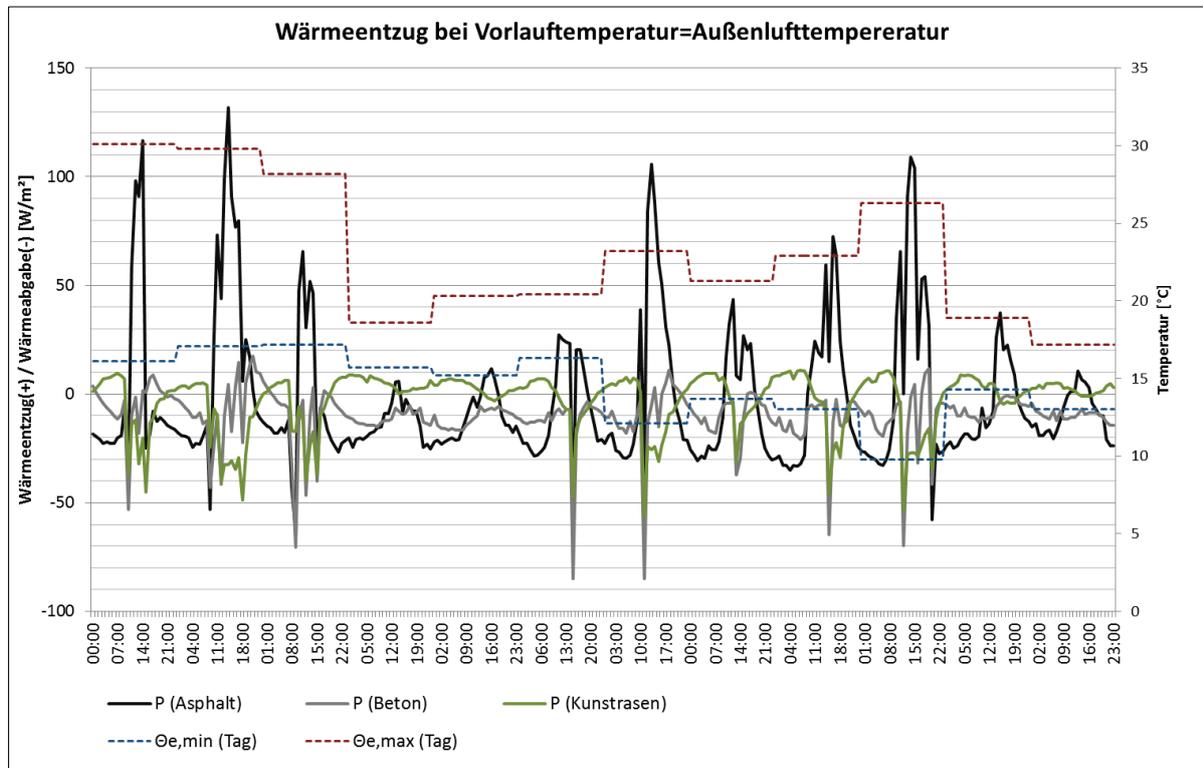


Abbildung 3: Wärmeleistung unterschiedlicher Oberflächen (Beton, Asphalt und Kunstrasen) aus den Ergebnissen des Vorprojektes

Wie aus obiger Abbildung 3 ersichtlich wird, kann unter den oben genannten Randbedingungen an warmen Tagen nur bei der Asphaltfläche nutzbare Energie entzogen werden. Im Fall des Asphalts werden Maximalwerte der Entzugsleistung über einen sehr kurzen Zeitraum von ca. 100 W/m² erreicht während der Beton maximale Entzugsleistungen von 20 W/m² aufweist, wobei angemerkt werden muss, dass der Rohrabstand der Betonfläche beinahe doppelt so groß ist wie der Rohrabstand der Asphaltfläche und zudem die Betonfläche wesentlich dicker ausgeführt wurde als die Asphaltfläche (vgl. Kap. 2.2.2). Ein direkter Rückschluss darauf, ob Asphalt als Energieentzugsmedium besser geeignet ist als Beton, kann alleinig damit nicht getroffen werden. Über die Kunstrasenfläche können keine nennenswerten Entzugsleistungen erzielt werden.

Die niedrigere Entzugsleistung des Betons und der Kunstrasenfläche kann auch durch die geringeren Kerntemperaturen begründet werden:

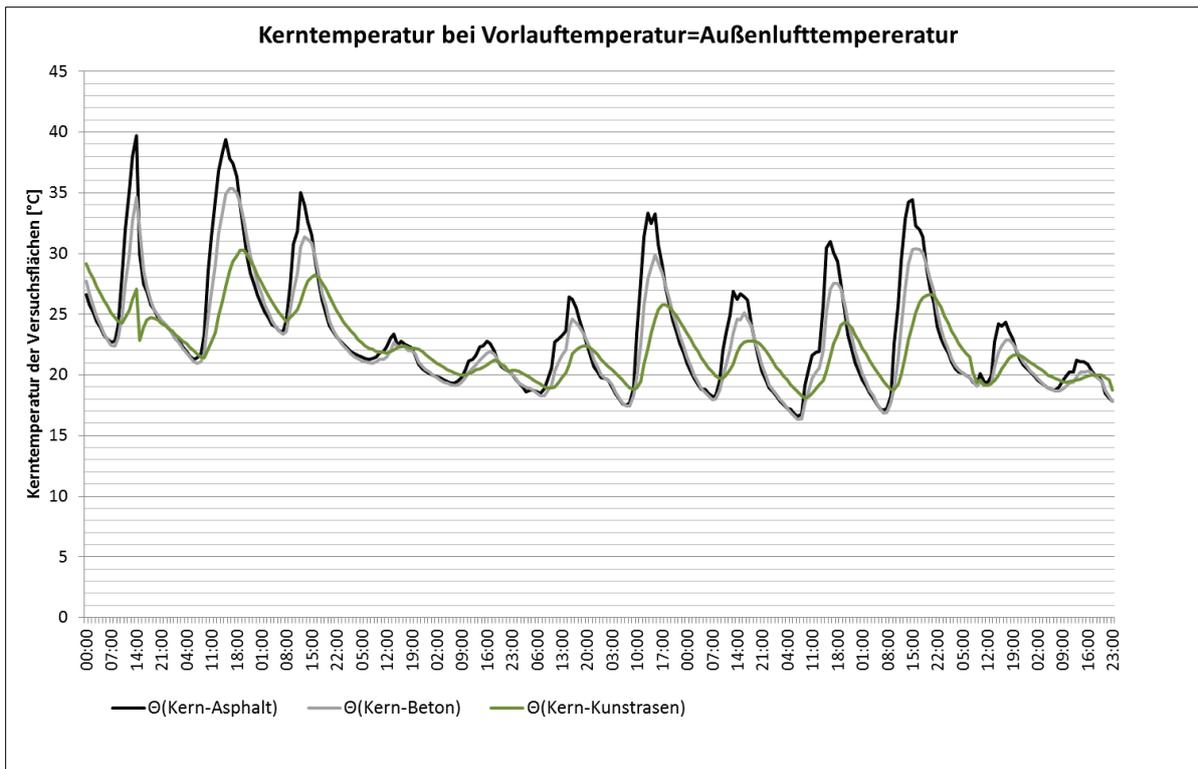


Abbildung 4: Kerntemperaturen der Versuchsflächen aus den Ergebnissen des Vorprojektes

In einem zweiten Schritt werden die Kerntemperaturen sowie die Vorlauftemperaturen und damit die Temperaturspreizungen mit den Entzugsleistungen der einzelnen Flächen in Zusammenhang gebracht:

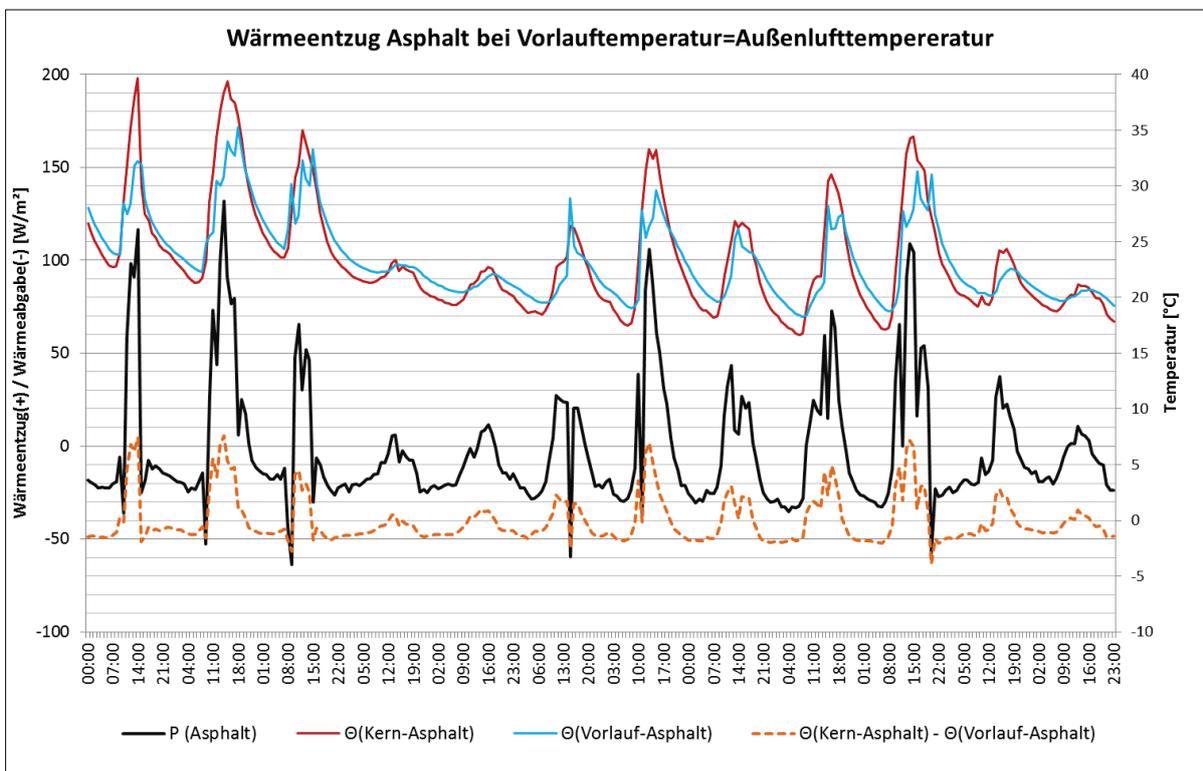


Abbildung 5: Entzugsleistung Asphalt in Abhängigkeit der Kern- und Vorlauftemperaturen sowie der daraus resultierenden Temperaturspreizung aus den Ergebnissen des Vorprojektes

Im Fall des Asphalt wird ersichtlich, dass entsprechende Entzugsleistungen nur bei hohen Temperaturspreizungen erreicht werden können. Entzugsleistungen von 100 W/m² können bei Temperaturspreizungen von ca. 5-6 K erzielt werden.

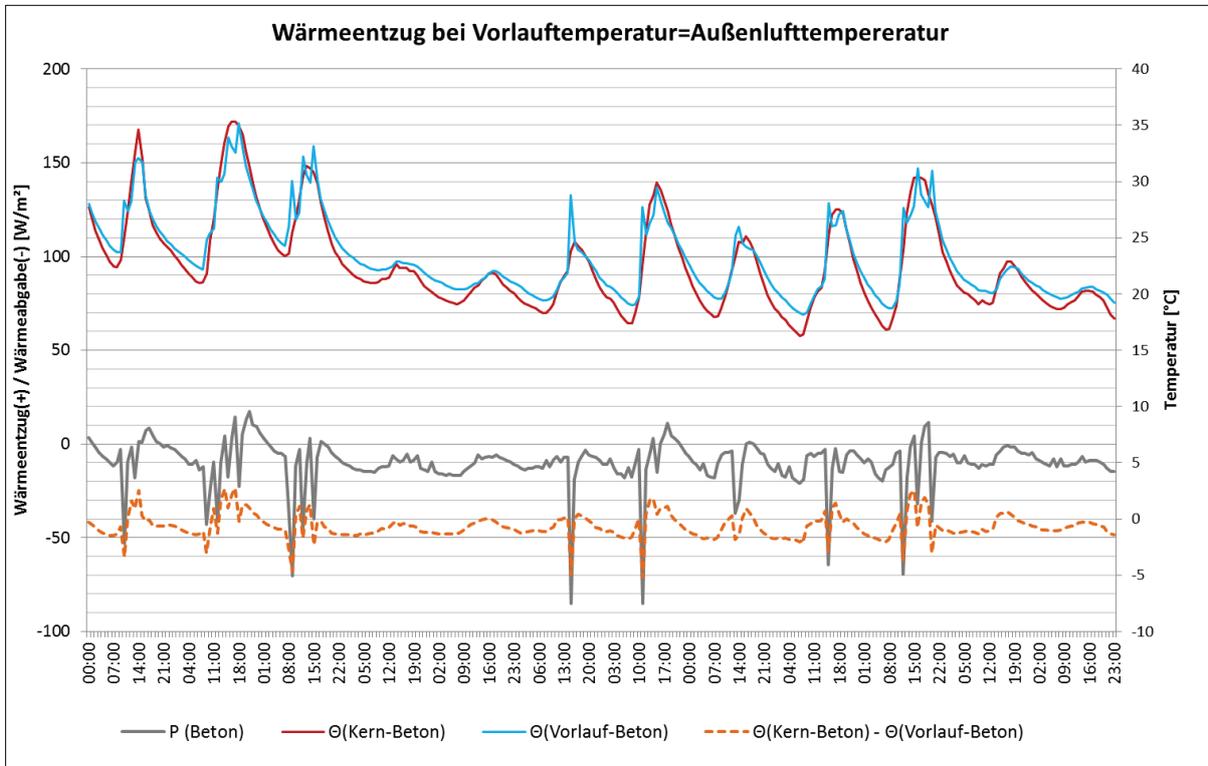


Abbildung 6: Entzugsleistung Beton in Abhängigkeit der Kern- und Vorlauftemperaturen (Vorprojekt)

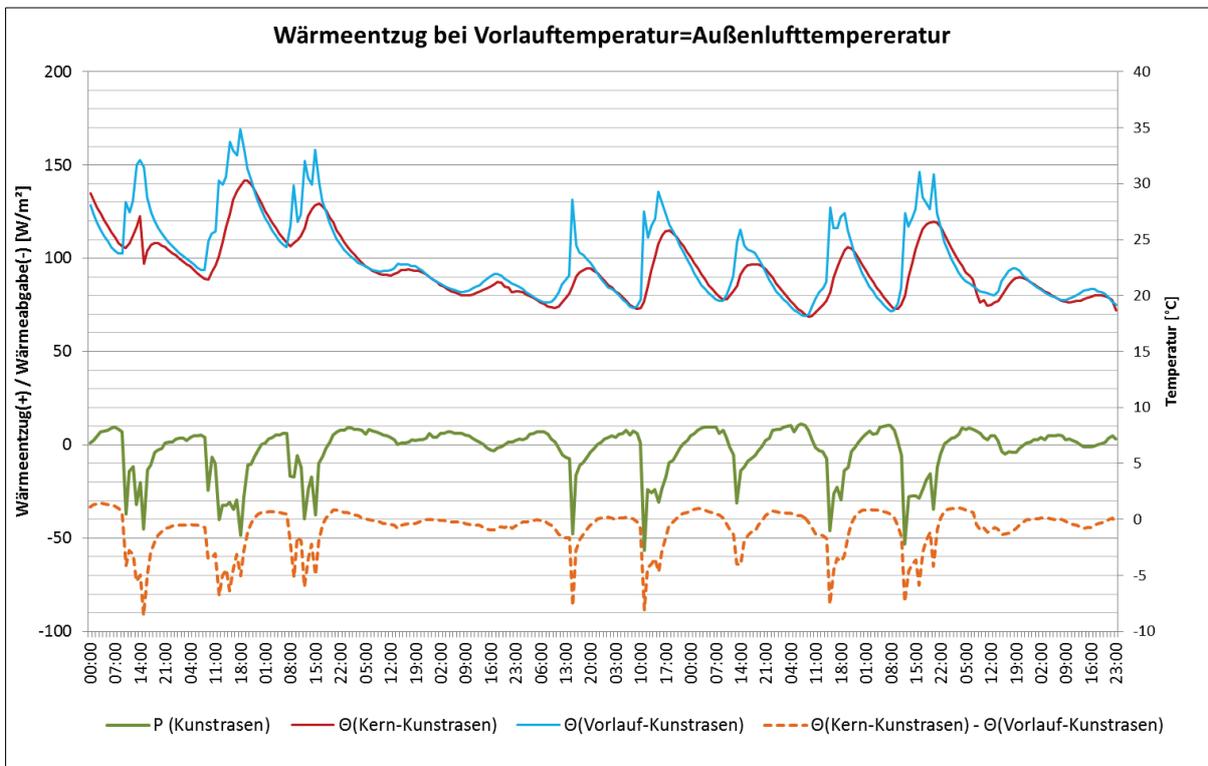


Abbildung 7: Entzugsleistung Kunstrasen in Abhängigkeit der Kern- und Vorlauftemperaturen (Vorprojekt)

Im Fall des Betons liegt die Vorlauftemperatur kaum unter der Kerntemperatur, sondern eher darüber, weshalb insgesamt mehr Energie zugeführt als abgeführt wird. Es werden maximale Temperaturspreizungen von 1-2 K erreicht. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Kunstrasenfläche wo maximale Temperaturspreizungen von 0,5-1 K erreicht werden.

Insgesamt bestätigt sich bei allen Flächen, dass die Entzugsleistungen direkt mit den vorhandenen Temperaturspreizungen in Zusammenhang stehen.

2.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Unter der Voraussetzung, dass die Vorlauftemperaturen immer Außenlufttemperaturen aufweisen, zeigt sich, dass nur Asphalt nennenswerte Entzugsleistungen im Vergleich mit der Beton- und der Kunstrasenfläche aufweist.

Es zeigt sich des Weiteren ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Kerntemperatur der Flächen und der daraus resultierenden Temperaturspreizung mit der erreichbaren Entzugsleistung.

Angemerkt werden muss, dass im Zuge des Vorprojektes die Vorlauftemperaturen konstant mit Außenlufttemperatur gefahren wurden und damit teilweise auch über den Kerntemperaturen der Versuchsflächen lagen, weshalb teilweise auch Energie an die Flächen abgegeben wurden. Aus diesem Grund kann bei dieser Betriebsweise nicht darauf rückgeschlossen werden, dass die entzogenen Wärmemengen immer dem solaren Ertrag entsprechen, da die eingetragenen Wärmemengen nicht mitberücksichtigt wurden.

Ebenfalls muss berücksichtigt werden, dass die Versuchsaufbauten unterschiedlich ausgeführt wurden (Rohrabstand, Rohrmaterial und Aufbauhöhen) weshalb ein direkter Vergleich schwierig ist.

2.1.4 Offene Fragestellungen aus dem Vorprojekt

Folgende Fragestellungen können nach den Auswertungen der Ergebnisse aus dem Vorprojekt nicht beantwortet werden:

- Möglicher Wärmeentzug bei großen Temperaturspreizungen (Außenluft zu Vorlauftemperatur)
- Wärmeentzug in Abhängigkeit der vorhandenen Solarstrahlung
- Wärmeentzug in Abhängigkeit der Albedos (z.B. durch Alterung des Asphalts)
- Auswirkungen des Wärmeentzuges auf die Oberflächentemperaturen
- Oberflächen- und Umgebungstemperaturen der einzelnen Flächen im Zustand ohne Wärmeentzug
- Auswirkungen von Verschattungsmaßnahmen auf die Oberflächentemperaturen und die Entzugsleistungen
- Potential der phasenverschobenen Nutzung

2.1.5 Lastenheft der zukünftigen Mess- und Betriebsszenarien

Auf Basis der Ergebnisse aus Kap. 1.2.2.3 sowie der daraus resultierenden offenen Fragestellungen aus Kap. 2.1.4 wird folgendes Lastenheft für die nachfolgenden Mess- und Betriebsszenarien erstellt:

Tabelle 1: Lastenheft der künftigen Mess- und Betriebsszenarien

Szenario	Zielsetzung	Messeinstellung	Beschattung der Oberflächen	Höhe der schwarzen Kugel	Dauer
0	Messung der Oberflächentemperaturen sowie der oberflächennahen Temperaturen im Zustand ohne Wärmeabfuhr und Verschattung	Keine Wärmeabfuhr (alle Flächen), gleichzeitig Wärmeabfuhr aus dem Eisspeicher in den Erdkollektor zur Bereitstellung des Eisspeichers (gefrorener Zustand)	nein	25 cm über Boden	1-2 Tage. Start bei überwiegend sonniger Witterung (kein Regen)
1		Wärmeabfuhr aller vorhandenen Flächen. Vorlauf = Außentemperatur	nein	25 cm über Boden	3 Tage, Start bei überwiegend sonniger Witterung (kein Regen)
2		Wärmeabfuhr aller vorhandenen Flächen. Vorlauf = 20°	nein	25 cm über Boden	3 Tage, Start bei überwiegend sonniger Witterung (kein Regen)
3		Wärmeabfuhr aller vorhandenen Flächen. Vorlauf = 15°	nein	25 cm über Boden	1 Tag, Start bei überwiegend sonniger Witterung (kein Regen)
4		Wärmeabfuhr aller vorhandenen Flächen. Vorlauf = 10°	nein	25 cm über Boden	bis Kapazität des Eisspeichers erreicht, Start bei überwiegend sonniger Witterung
5	Messung des Einflusses einer Beschattung auf die Oberflächen ohne Wärmeabfuhr	keine Wärmeabfuhr in den verschatteten Flächen	ja	25 cm über Boden	mindestens 1 voller Tag bei überwiegend sonniger Witterung
6	Messung des Einflusses einer Beschattung auf die Oberflächen mit Wärmeabfuhr	Wärmeabfuhr der verschatteten Flächen Vorlauf = 20°	ja	25 cm über Boden	mindestens 1 voller Tag bei überwiegend sonniger Witterung
		Wärmeabfuhr der verschatteten Flächen Vorlauf = 15°	ja	25 cm über Boden	mindestens 1 voller Tag bei überwiegend sonniger Witterung
		Wärmeabfuhr der verschatteten Flächen Vorlauf = 10°	ja	25 cm über Boden	mindestens 1 voller Tag bei überwiegend sonniger Witterung
7	Messung der Umgebungstemperaturen in Abhängigkeit des Abstandes von der Oberfläche	Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Ergebnisse Szenario 0-6	nein	zuerst 50 cm dann 100 cm	jede Distanz 2 Tage (insgesamt 4 Tage)

2.2 Festlegung des Messaufbaus

2.2.1 Notwendige Adaptierungen der Anlage

Für die weiteren Messungen mussten vorab folgende Adaptierungen der Versuchsanlage durchgeführt werden:

- Neuinstallation einer Sole/Wasser Wärmepumpe (ohne Kühlfunktion) aufgrund der sehr ineffizienten (überdimensionierten) bestehenden Wärmepumpe (mit Kühlfunktion)
- Thermische Trennung der bestehenden Versuchsflächen untereinander zur Minimierung der gegenseitigen Beeinflussung der Flächen mit einer 20 cm dicken XPS-Dämmung
- Thermische (seitliche) Trennung der bestehenden Versuchsanlagen zum umgebenden Erdreich zur Minimierung des Einflusses eines seitlichen Wärmetausches zwischen den Versuchsflächen und dem Erdreich mit einer 20 cm dicken XPS-Dämmung
- Umbau der bestehenden Kunstrasen- in eine Naturrasenfläche
- Installation von Temperatursensoren zur Messung der Oberflächen- und Umgebungstemperaturen

2.2.2 Darstellung der adaptierten Versuchsanlage

2.2.2.1 Übersicht Versuchsanlage

Nach erfolgtem Umbau stellt sich die Versuchsanlage folgendermaßen dar:

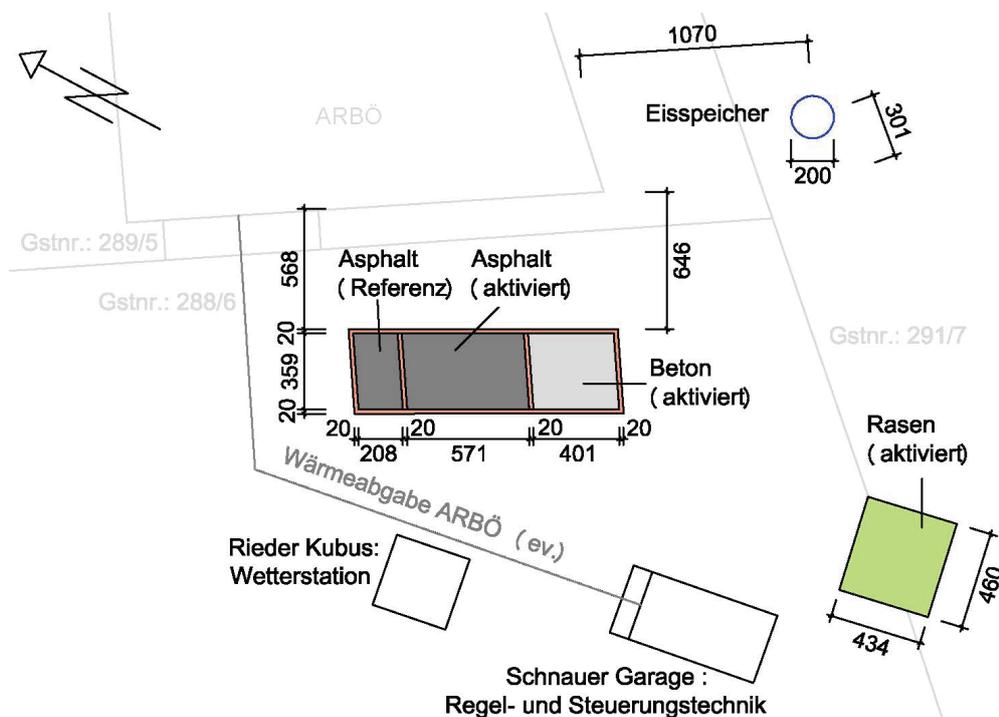


Abbildung 8: Lageplan Versuchsanlage, M 1:500

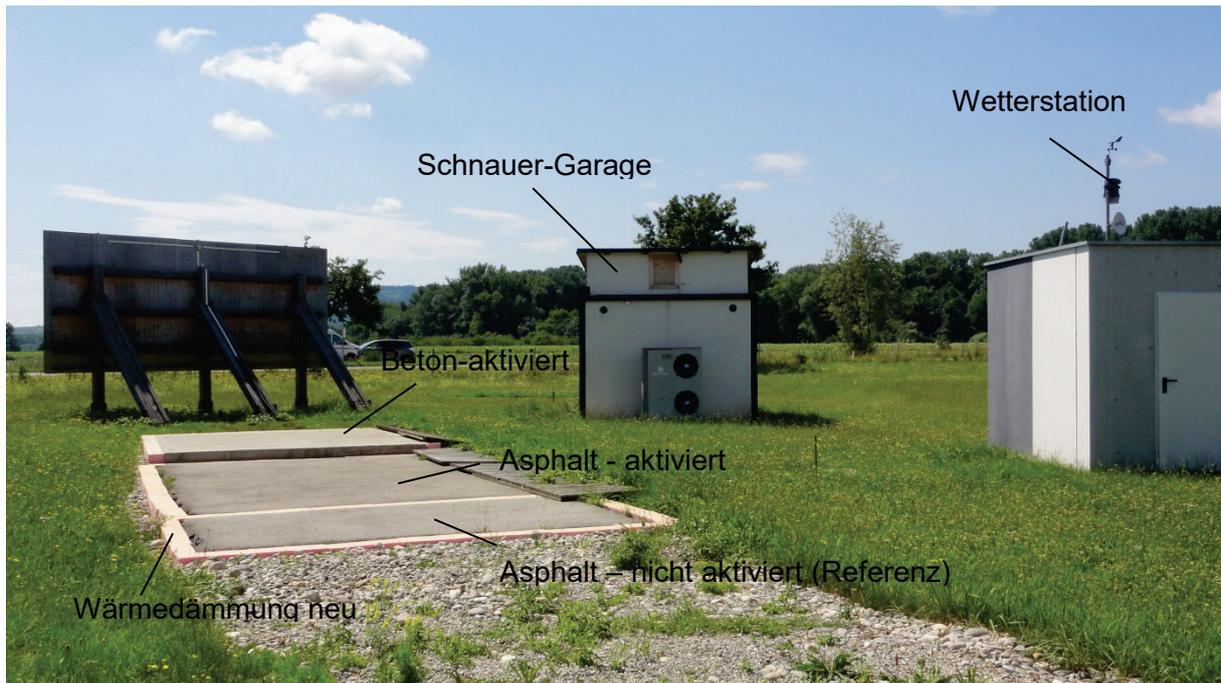


Abbildung 9: Ansicht der Versuchsanlage aus Richtung Nordwest

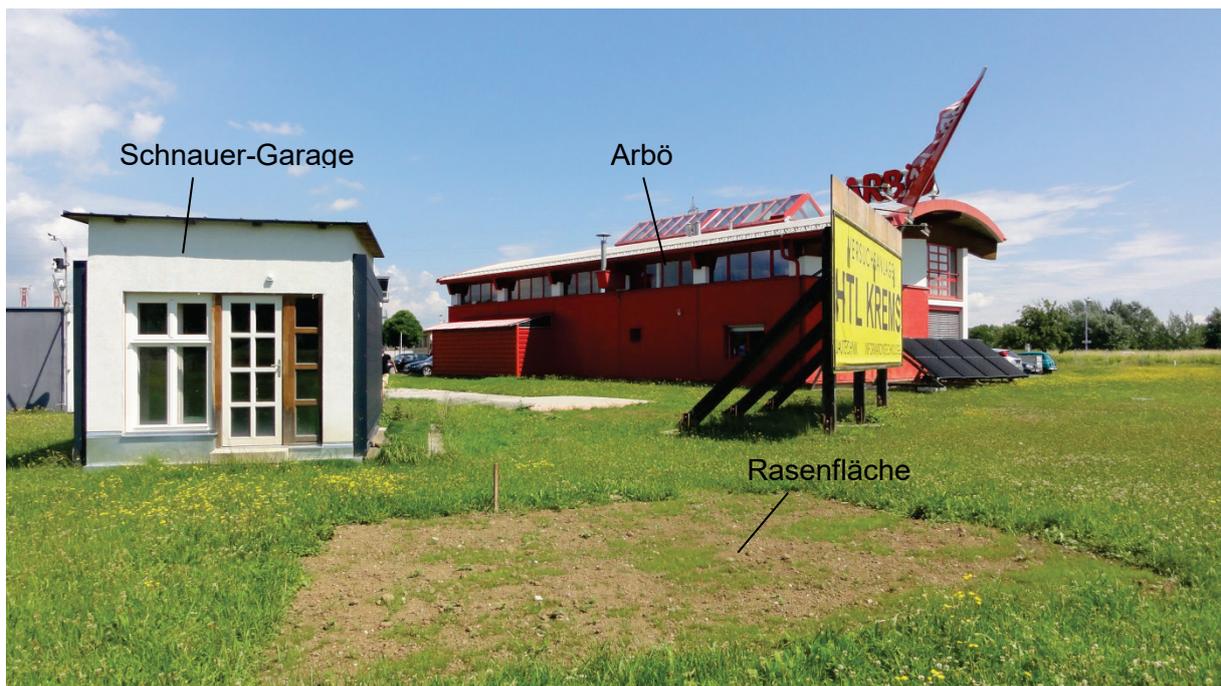


Abbildung 10: Ansicht der Versuchsanlage aus Richtung Südost

2.2.2.2 Aufbau der einzelnen Versuchsfächen

Die Aufbauten der einzelnen Versuchsfächen werden nachfolgend im Detail grafisch als Schnitt dargestellt:

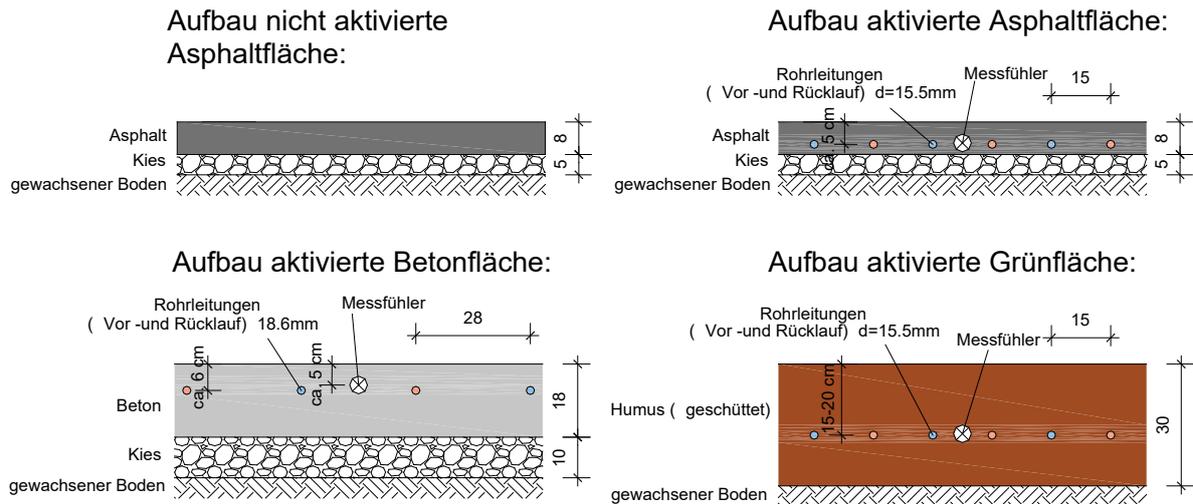


Abbildung 11: Aufbau Versuchsflächen (Schnitt)

2.2.2.3 Hydrauliksystem

Das hydraulische System wird von der Software SIEMENS UNIGYR EMS 40 gesteuert. Im Messkubus befindet sich zudem die komplette Mess-, Steuer-, Regel- und Leittechnik ebenso wie die Wärmepumpe, der Schaltschrank, die Pufferspeicher, Pumpen und dazugehörigen Regelorgane. Pro Versuchsfläche ist eine Hydraulikgruppe mit Mischventil, Umwälzpumpe und Wärmemengenzähler vorgesehen.

Die Wärmepumpe ist nicht modulierend und besitzt eine eigene stufenweise drehzahlgeregelte Umwälzpumpe, die den Volumenstrom bis zum Mischventil vorgibt. Direkt nachgeschaltet befinden sich drehzahlgeregelte Pumpen für die einzelnen Rohrkreise der Versuchsflächen.



Abbildung 12: Mess-, Steuer-, Regel- und Leittechnik in der Schnauer-Garage

Grundsätzlich können alle Aggregate und Steuerorgane auch händisch geschaltet werden. Im Automatikbetrieb können mit der Anlage folgende Betriebsarten eingestellt werden:

- ARBÖ heizen oder kühlen
- Eisspeicher einfrieren
- Eisspeicher auftauen
- Energiegewinnung von den Flächen

Es befinden sich 3 Pufferspeicher in der Schnauer-Garage:

1. Pufferspeicher kalt (bis zu -10°C) – 200l
2. Pufferspeicher warm (bis zu 45°C) – 200l
3. Pufferspeicher Mischtemperatur – 200l

Der Pufferspeicher kalt ist an den Verdampfer und der Pufferspeicher warm an den Verflüssiger der Wärmepumpe angeschlossen. Je nach Betriebsart werden die jeweiligen Anlagenteile durch Umschaltventile mit Kälte oder Wärme versorgt.

Im Pufferspeicher Mischtemperatur wird die gewünschte Vorlauftemperatur aus den beiden anderen Pufferspeichern gemischt.

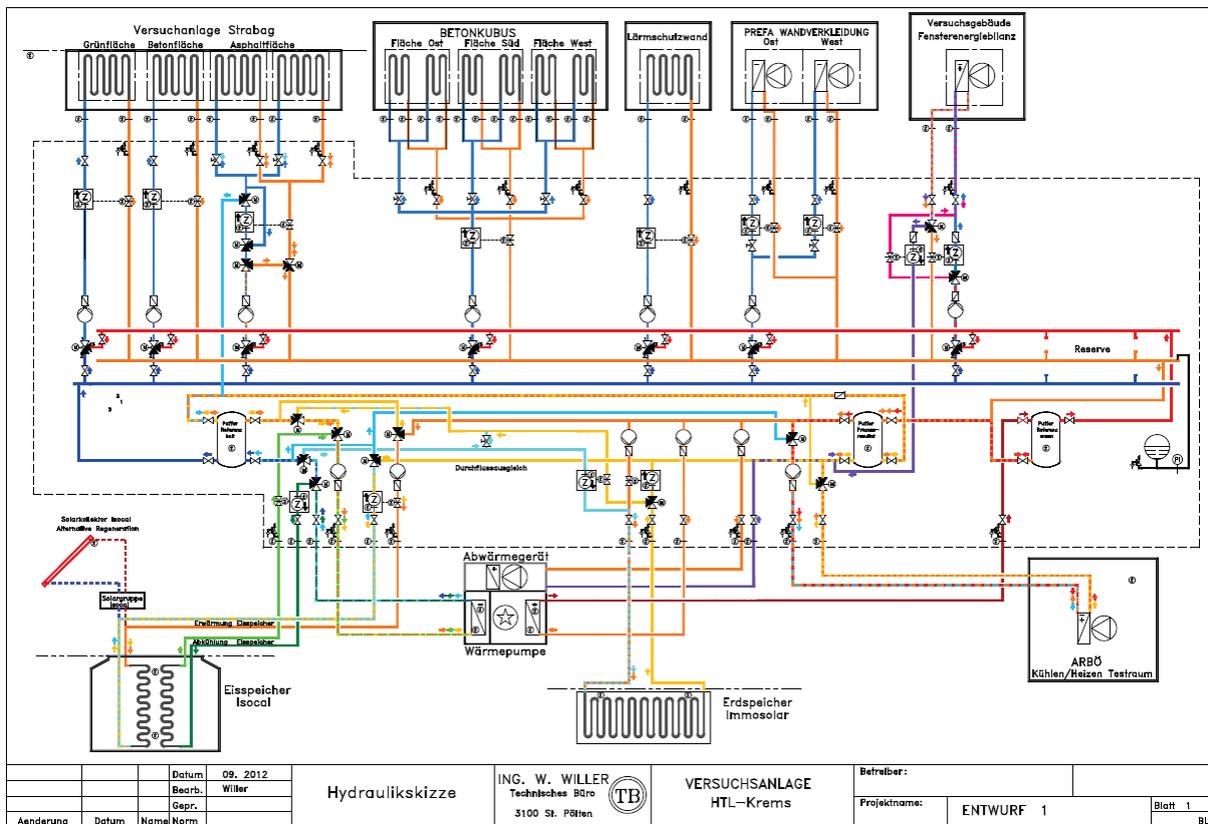


Abbildung 13: Hydraulikschema des vorhandenen Versuchsaufbaus¹³

Ziel des Vorprojektes war es auch, wie bereits in Kap. 1.2.2 erläutert, das Gebäude auf dem Nachbargrundstücks der Firma ARBÖ zu beheizen und zu kühlen. Da der Eisspeicher im vorliegenden Forschungsprojekt jedoch für die Messungen selbst als Wärmespeichermedium verwendet werden musste, konnte für den Zeitraum der Messungen in den Sommermonaten 2016 keine Kühlung des ARBÖ-Gebäudes stattfinden.

¹³ Ing. W. Willer, zur Verfügung gestellt von ees – energy environment solutions GmbH

2.2.3 Definition der Mess-Sensorik

Die Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen erfolgte unmittelbar an den Begrenzungen der Absorberflächen, womit die Leitungsverluste vom und zum Messcontainer nicht miterfasst wurden. Mit Hilfe des gemessenen Volumenstroms war es damit möglich, die Wärmemengen zu berechnen.

Zur Beurteilung der vorhandenen Umgebungstemperaturen wurde die Versuchsanlage mit Sensoren für die Messung der Oberflächentemperatur sowie der Luft- und operativen Temperatur erweitert.

Die Sensoren wurden mit Hilfe eines Statives jeweils in der Mitte der zu messenden Fläche positioniert.

Die Messung der Lufttemperatur erfolgte auf einer Höhe von ca. 1 m über dem Bodenniveau, die Messung der operativen Temperatur erfolgte in einer Höhe von 25, 50 und 100 cm, je nach eingestellten Messszenario. Um die Widerstände konstant zu halten und damit die Messgenauigkeit zu gewährleisten wurden bei allen 4 Versuchsflächen idente Kabellängen verwendet (30 m).



Abbildung 14: Anordnung der Messsensoren über der Versuchsfläche

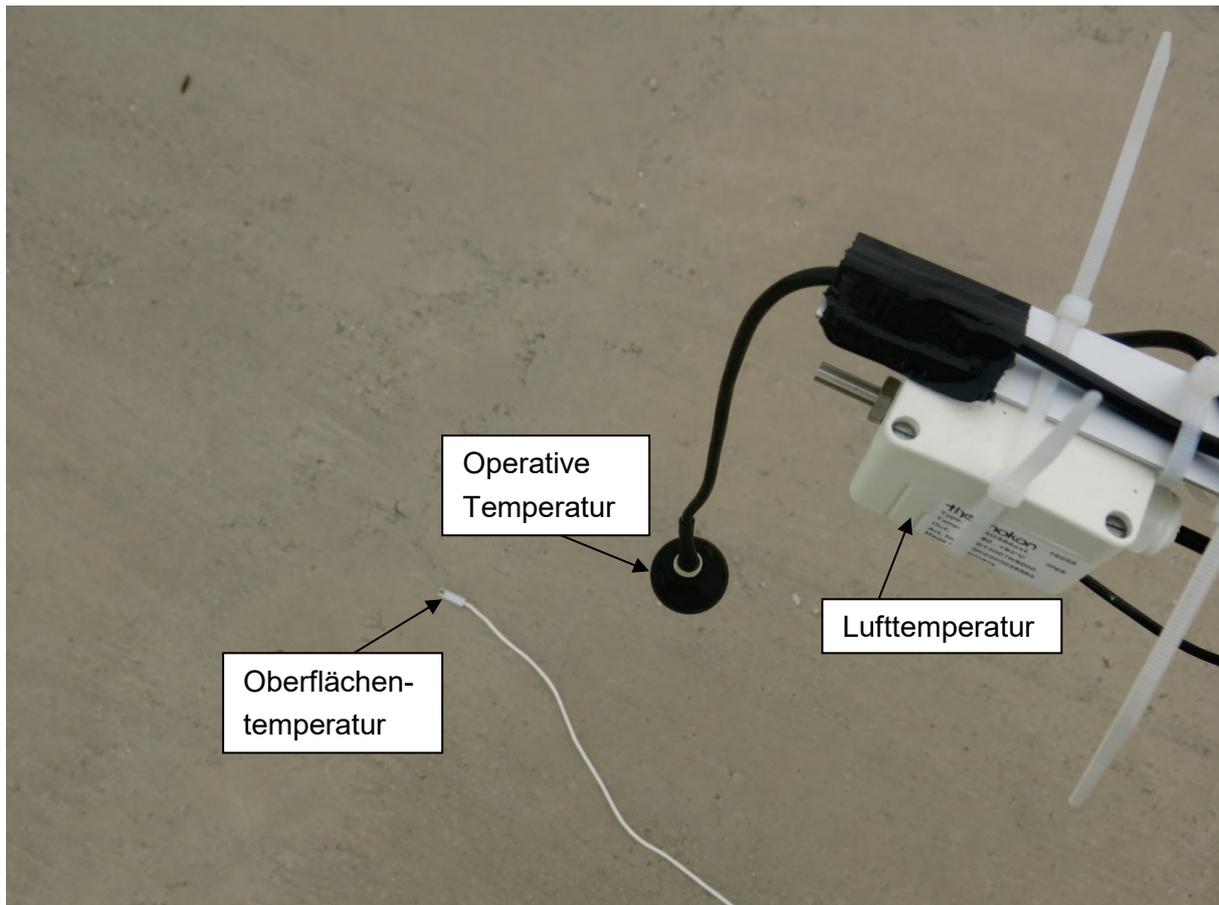


Abbildung 15: Beschreibung der Mess-Sensorik

Folgende Messsensoren kamen zur Anwendung (Produktdatenblätter s. Anhang B):

In Anlehnung an die bereits vorhandene Mess-Sensorik der vorhandenen Versuchsanlage wurden folgende Sensoren für die Temperaturmessung ausgewählt:

- Messung der Oberflächentemperatur (Beton und Asphalt): Anlegefühler OF14 (Thermokon) Ni1000 TK5000. Messgenauigkeit $\pm 1\%$
- Messung der Oberflächentemperatur (Grünfläche): Erdfeuchte- und Temperatursensor - Einsteckfühler (Decagon 5TM). Datenaufnahme mittels digitalem Datenlogger Decagon Em50.¹⁴ Messgenauigkeit: Dielektrizitätskonstante $\epsilon_a = \pm 1 \epsilon_a$ bei 0-40 V-% und $\pm 15 \epsilon_a$ bei 40-80 V-% Bodenfeuchtegehalt
- Messung der Lufttemperatur: Außenfühler AGS54 (Thermokon) Ni1000 TK 5000, IP65. Messgenauigkeit $\pm 1\%$
- Messung der operativen Temperatur: Raumpendelfühler RPF4030m40 (Thermokon) Ni1000 TK 5000, Kugel d=40mm schwarz. Messgenauigkeit $\pm 1\%$

¹⁴ <http://www.decagon.com/en/soils/volumetric-water-content-sensors/5tm-vwc-temp/>

Die Datenaufnahme erfolgte durch Implementierung der Sensoren in die bestehende Datenaufzeichnung der Firma Siemens (Ausnahme: Oberflächentemperatur der Grünfläche mittels Erdfeuchte- und Temperatursensor über digitalen Datenlogger).

Die Temperatursensoren (Luft- und Oberflächentemperatur) wurden nicht gegen einfallende Solarstrahlung geschützt, da zur Beantwortung der Forschungsfragestellung hauptsächlich die nächtlichen Temperaturen maßgeblich waren. Da entsprechende Schutzeinrichtungen die nächtlichen Temperaturaufzeichnungen bis zu einem gewissen Maß verfälscht hätten (z.B. durch Reflektion der langwelligen Abstrahlung), wurde die hohe Beeinflussung der Globalstrahlung an den Temperaturaufzeichnungen tagsüber in Kauf genommen, um damit nachts interpretierbare Aufzeichnungen zu erhalten.

Die Messung der Oberflächentemperaturen erfolgte mittels eines Kontaktsensors, womit der direkte Einfluss der Globalstrahlung auf den Einfluss ausgeschlossen werden konnte.

Die Wetterdatenaufzeichnungen erfolgten einerseits mittels einer, im Bereich der Versuchsanlage montierten, Wetterstation (Produktbezeichnung Vantage Pro2™). Die Wetterstation befindet sich am Rieder-Kubus in 3,5 m Höhe und zeichnet Lufttemperatur, Luftfeuchte, Regenmengen, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung auf.

Durch die schwarze Dachabdichtung in der Nähe des Messfühlers muss jedenfalls von einem systematischen Messfehler der Temperatur ausgegangen werden. Eine Umplatzierung der Messstation konnte vom Betreiber der Anlage kurzfristig nicht veranlasst werden, weshalb zusätzlich auf die Wetterdaten einer naheliegenden Wetterstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik zurückgegriffen wurde. Im September 2016 waren die Messdaten der Wetterstation an der Versuchsanlage zudem unvollständig, weshalb in diesem Monat ohnehin auf die Wetterdaten der ZAMG zurückgegriffen werden musste. Diese Wetterstation befindet sich in der Nähe der landwirtschaftlichen Fachschule Krems in ca. 3.600 m Entfernung (Luftlinie) zur Versuchsanlage. Die Lufttemperaturaufzeichnung erfolgte dabei in einer Höhe von 2 m über Grund. Daten, die sich auf die Wetterstation direkt bei der Versuchsanlage beziehen, wurden mit (Vantage) gekennzeichnet, Daten, die sich auf die Wetterdaten der ZAMG beziehen, sind durch den Klammerausdruck (ZAMG) erkennbar.



Abbildung 16: Wetterstation Versuchsanlage

2.2.4 Definition der Beschattungsvorrichtung

2.2.4.1 Allgemeines

Um Aussagen zum detaillierten Energiegewinnungspotentials in Abhängigkeit der Witterung und der Umgebungsbedingungen tätigen zu können, müssen u.a. die Strahlungsbedingungen beurteilt werden.

Es stellt sich vorrangig die Frage, inwieweit Beschattungen durch Gebäude etc. den nutzbaren solaren Ertrag im Vergleich mit einer direkten Sonnenbestrahlung der Wärmeentzugsflächen verringern.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung müssen die Randbedingungen soweit als möglich minimiert werden. Die Beurteilung einer Teilverschattung der Fläche liefert beispielsweise kein aussagekräftiges Ergebnis. Es muss also eine Vollbesonnung mit einer Vollbeschattung der Versuchsflächen unter möglichst ähnlichen Wetterbedingungen miteinander verglichen werden.

2.2.4.2 Vollbesonnung - Ist-Stand

Zur Definition des Ist-Standes der Vollbesonnung der einzelnen Flächen wurde eine Beschattungssimulation durchgeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Simulation tabellarisch dargestellt:

		Mai		Juni		Juli		August		September		
		1	15	1	15	1	15	1	15	1	15	30
Beton	ab	08:00	07:55	07:50	07:50	07:55	08:00	08:05	08:10	08:15	08:05	07:45
	bis	17:05	17:20	17:40	17:45	17:45	17:40	17:25	17:10	17:00	14:10	13:35
Asphalt	ab	08:10	08:00	08:00	08:00	08:05	08:10	08:15	08:20	08:20	08:25	08:25
	bis	16:30	17:00	17:20	17:30	17:30	17:20	16:55	16:30	15:55	15:30	15:05
Referenz	ab	08:15	08:05	08:05	08:05	08:10	08:15	08:15	08:25	08:25	08:30	08:30
	bis	SU	SU	SU	15:20	14:40						
Grünfläche	ab	SA	SA	SA	SA	SA						
	bis	SU	18:45	18:30	18:30	18:35	18:45	18:55	SU	SU	SU	SU

Abbildung 17: Vollbesonnung der einzelnen Flächen (ohne Werbetafel)

SU ... Sonnenuntergang

SA ... Sonnenaufgang

Von Mai bis September liegt eine Vollbesonnung aller Flächen ab spätestens 8:30 bis zumindest 16:30 vor. (Ab Mitte September liegen Teile der Versuchsfläche aufgrund der Beschattung durch den Messcontainer bereits ab 14:00 wieder im Schatten.)

2.2.4.3 Beschattung durch Beschattungselemente

Zur Sicherstellung einer Vollbeschattung der Versuchsflächen musste somit eine geeignete Verschattungsvorrichtung gefunden werden. Die einzelnen Versuchsflächen werden dabei einzeln beurteilt, es muss also immer nur die Vollbeschattung einer definierten Fläche (Asphalt, Beton oder Gras) gewährleistet werden.

Die notwendige Fläche und Ausgestaltung der Verschattungsvorrichtung wurde anhand einer Beschattungssimulation folgendermaßen ermittelt:

Zur vollen Beschattung in der Zeit von 8:30-16:30 ist eine Überdachung mit einem seitlichen Überstand der Versuchsflächen von zumindest 0,5 m sowie seitlichen Verschattungselementen (in allen Orientierungen) notwendig. Zur Sicherstellung einer Vollbeschattung bei tiefen Sonnenständen dürfen die seitlichen Verschattungselemente im Norden und Westen max. 0,5 m, im Süden 1,0 m und im Osten 0,25 m über dem Boden angeordnet sein.

Als geeignetste Verschattungsvorrichtung wurde ein Partyzelt mit Abmessungen von 5 x 8 m ausgewählt. Damit können die oben genannten Anforderungen zur Vollverschattung der größten Versuchsfläche (Asphalt) eingehalten werden. Die seitlichen Elemente des Zeltes sind höhenverstellbar.

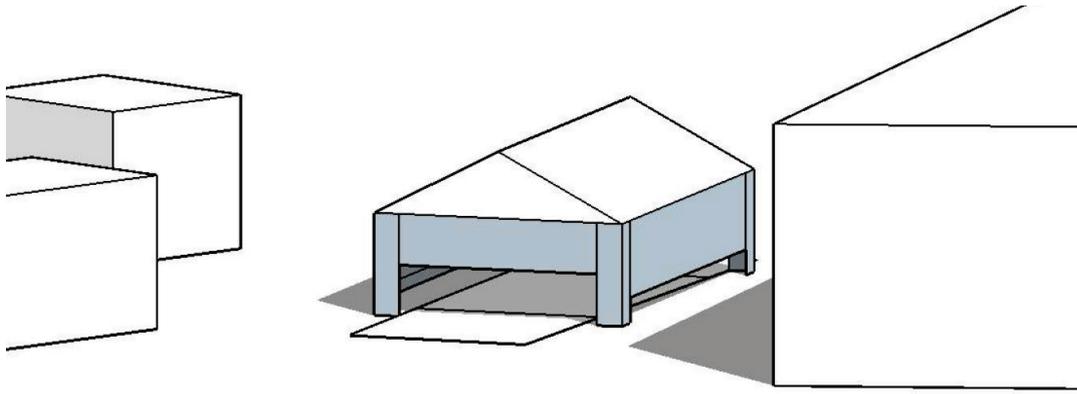


Abbildung 18: Beschattung der Asphaltfläche durch Partyzelt - Ansicht Südost (15. Mai, 8:30).

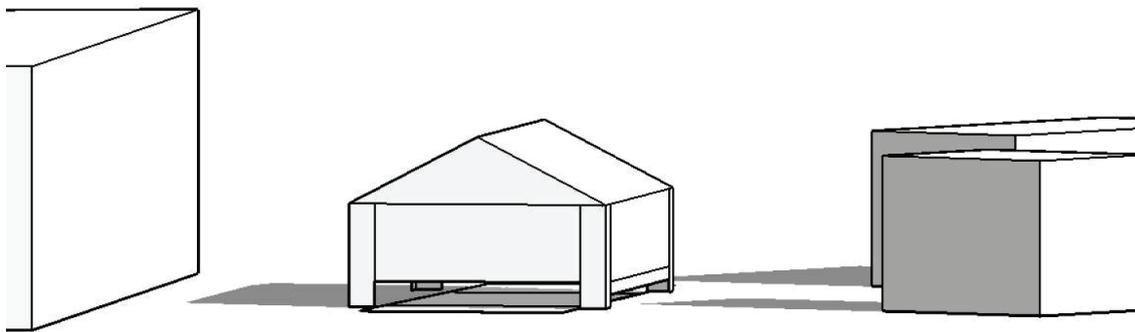


Abbildung 19: Beschattung der Asphaltfläche durch Partyzelt - Ansicht Nordwest (15. Mai, 16:30).

2.3 Messergebnisse - Temperaturabsenkung

2.3.1 Temperaturabsenkung in Abhängigkeit des Oberflächenmaterials

2.3.1.1 Allgemeines

Um das Potential der Reduktion von Hitzeinseln abschätzen zu können, wurde sowohl die Lufttemperatur, die Oberflächentemperatur als auch die operative Temperatur gemessen.

Die Messung der Lufttemperatur erfolgte dabei in einem Abstand von 1 m über Bodenniveau. Die operative Temperatur wurde in einem Abstand von 25 cm über dem Bodenniveau gemessen. Die Temperaturaufzeichnung der Außenluft erfolgte in einer Höhe von ca. 3 m über Grund.

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse grafisch dargestellt.

Die Temperaturaufzeichnungen werden je nach Quelle, wie in Kap. 2.2.3 beschrieben, mit ZAMG (für Daten der ZAMG-Wetterstation) oder Vantage (für Daten der Wetterstation vor Ort) zugeordnet.

2.3.1.2 Temperaturverlauf ohne Wärmeentzug

In einem ersten Schritt wird der Temperaturverlauf der einzelnen Flächen ohne Wärmeentzug dargestellt (Szenario 0).

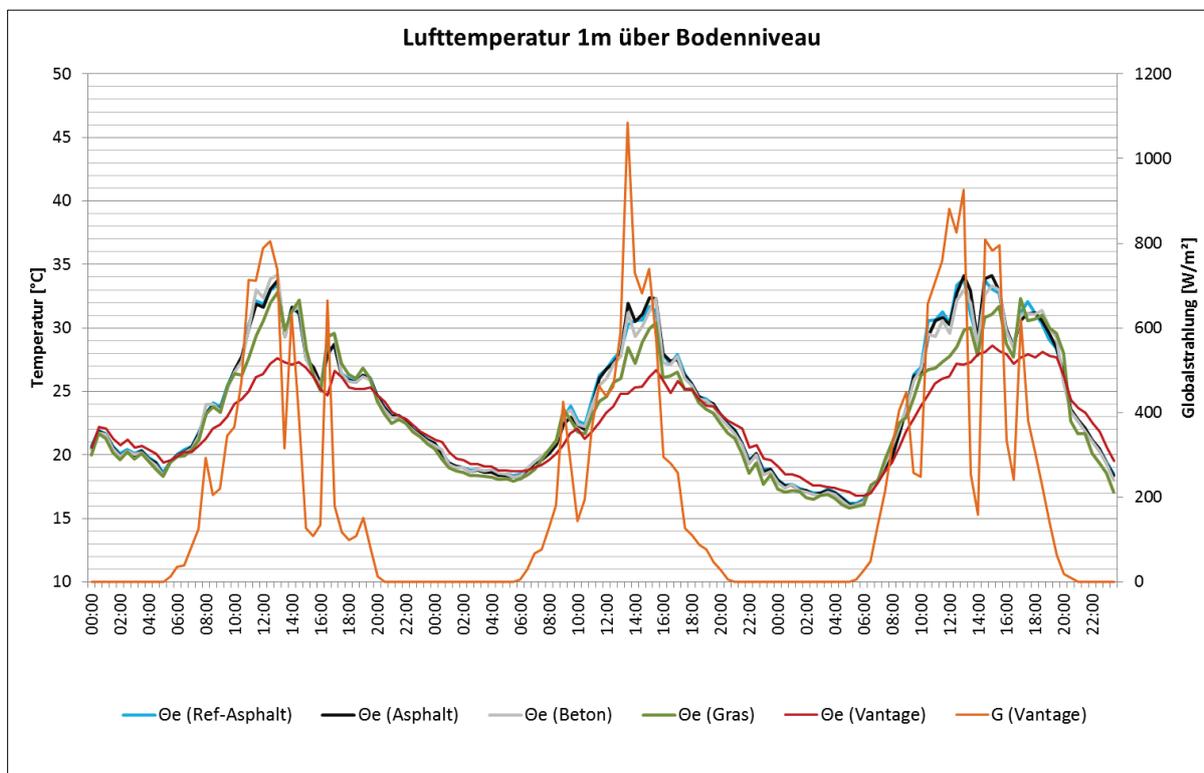


Abbildung 20: Lufttemperatur über den Versuchsflächen bei Szenario 0 (keine Wärmeabfuhr), 27.-29.7.2016

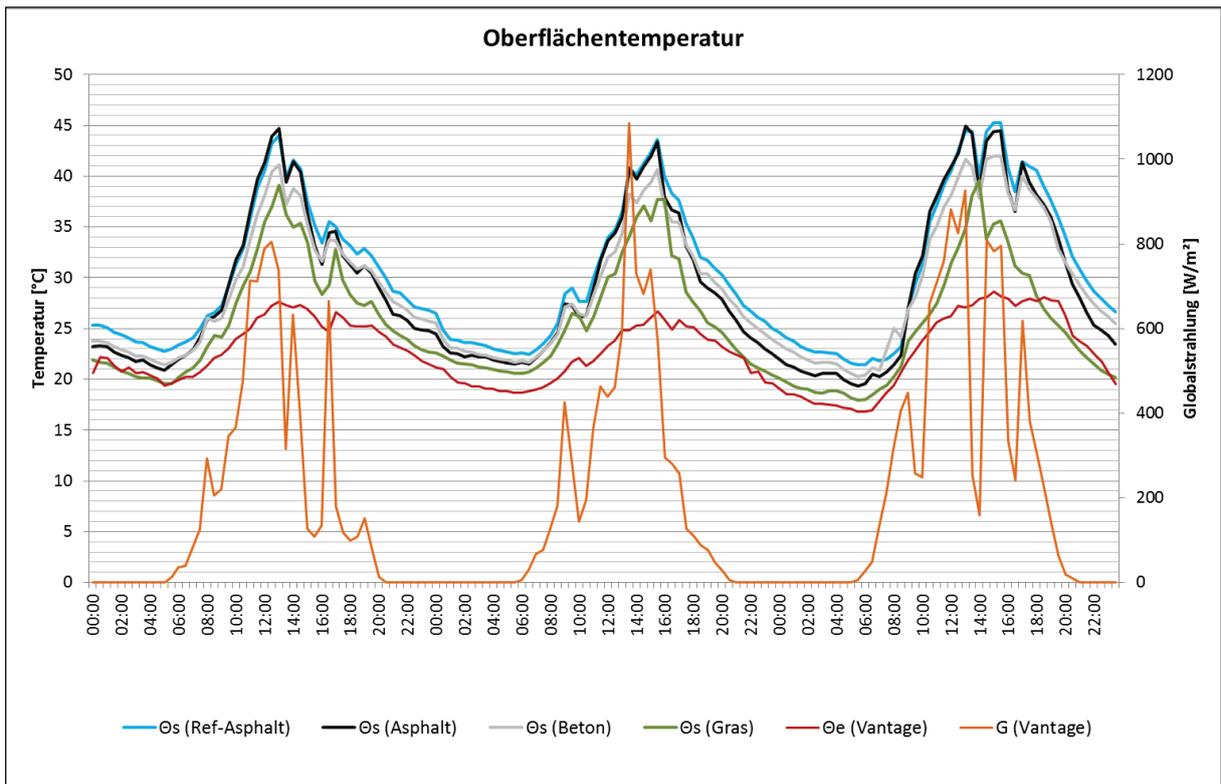


Abbildung 21: Oberflächentemperatur der Versuchsflächen bei Szenario 0 (keine Wärmeabfuhr), 27.-29.7.2016

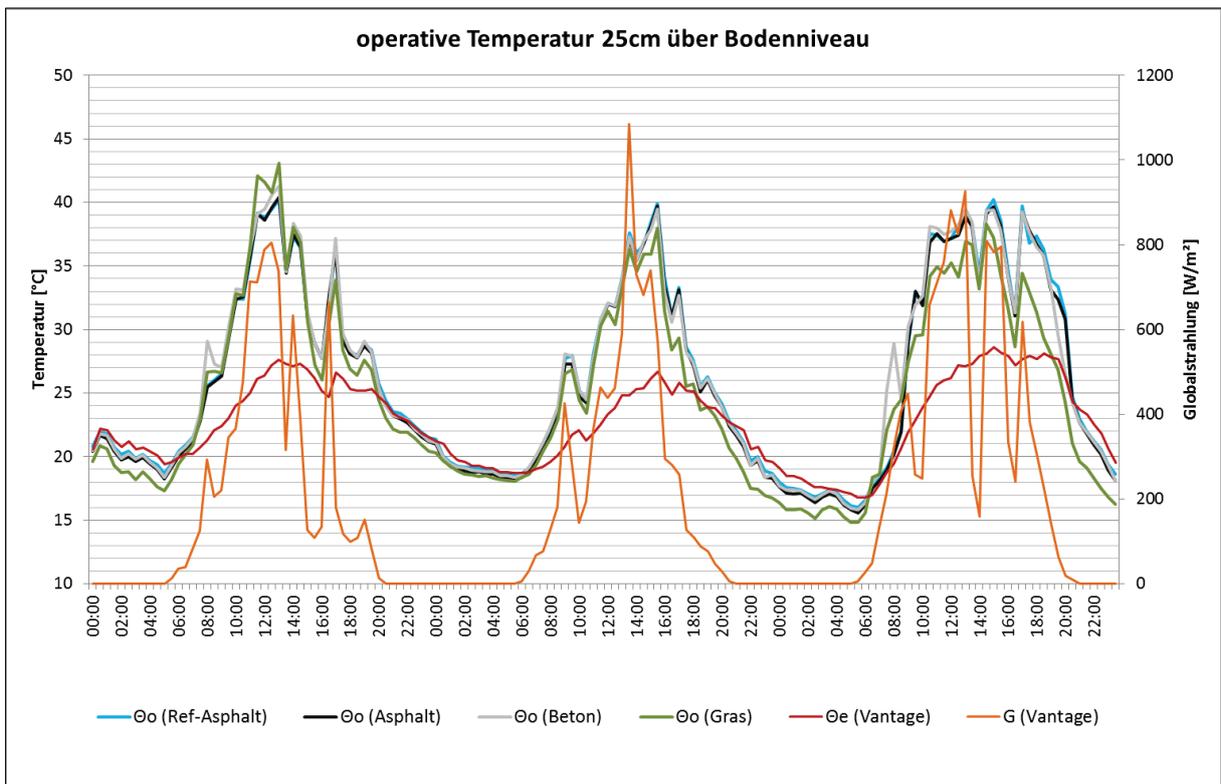


Abbildung 22: operative Temperatur über den Versuchsflächen bei Szenario 0 (keine Wärmeabfuhr) 27. - 29.7.2016

Aus obigen Abbildung 20 bis Abbildung 22 können folgende Aussagen getroffen werden:

- Tagsüber wird die operative Temperatur, ebenso wie die Lufttemperatur maßgeblich durch die solare Strahlung beeinflusst (s. Kap. 2.2.3).
- Die Oberflächentemperatur der Bauteile wird maßgeblich durch die Globalstrahlung bestimmt.
- Nachts zeigt sich, dass sowohl die operative Temperatur als auch die Lufttemperatur direkt über den Versuchsfächen tendenziell kühler ist als die Lufttemperatur an der Wetterstation.
(Dies lässt sich durch die Tatsache begründen, dass der Messfühler der Wetterstation gegen langwellige terrestrische Abstrahlung geschützt ist, während die über den Versuchsfächen installierten Sensoren Wärmestrahlung an die Atmosphäre abgeben und somit entsprechend mehr abkühlen können.)
- Die operative Temperatur sowie die Lufttemperatur über der Grünfläche liegen in den meisten Fällen ebenso wie die Oberflächentemperatur der Grünfläche unter den Temperaturen der Asphalt- und Betonflächen. Bei den Oberflächentemperaturen sind Absenkungen von 3-5°C¹⁵ erkennbar, was sich auch in den nächtlichen Temperaturspreizungen der operativen Temperatur von 1-1,5°C widerspiegelt.
- Die Oberfläche der Asphaltfläche heizt sich tagsüber etwas stärker auf als die Betonfläche. Es kann ein Temperaturunterschied von ca. 2-3°C festgestellt werden. Nachts befinden sich die Oberflächentemperaturen in einem ähnlichen Größenordnungsbereich. Ähnliche Beobachtungen konnten auch durch Berechnungen von Kreč gemacht werden, der diesen Effekt dem größeren Wärmespeichervermögen von Beton zuschreibt.¹⁶

2.3.1.3 Temperaturverlauf bei Wärmeentzug in Abhängigkeit der Vorlauftemperaturen

In einem ersten Schritt werden die Temperaturabsenkungen des Asphalts analysiert, mit dem Vorteil, dass hier auch eine Referenzfläche ohne Wärmeentzug parallel mitbetrachtet und messtechnisch erfasst wurde:

Temperaturabsenkungen der Asphaltfläche bei 20°C Vorlauftemperatur

Nachfolgend werden die gemessenen Temperaturdaten (operative Temperatur, Lufttemperatur und Oberflächentemperatur) bei einer Vorlauftemperatur von 20°C dargestellt. Das entspricht tagsüber Temperaturspreizungen von 0-5 K zwischen Vorlauf- und Außenlufttemperatur. Nachts übersteigt die konstant gehaltene Vorlauftemperatur von 20°C sogar die Außenlufttemperatur von 15°C was eine Temperaturspreizung von 0-5 K in die andere Richtung ergibt.

¹⁵ Messungenauigkeiten in dieser Größenordnung können aufgrund des geringen Feuchtegehaltes des Bodens zum Messzeitpunkt ausgeschlossen werden.

¹⁶ Vgl. Kreč (2008)

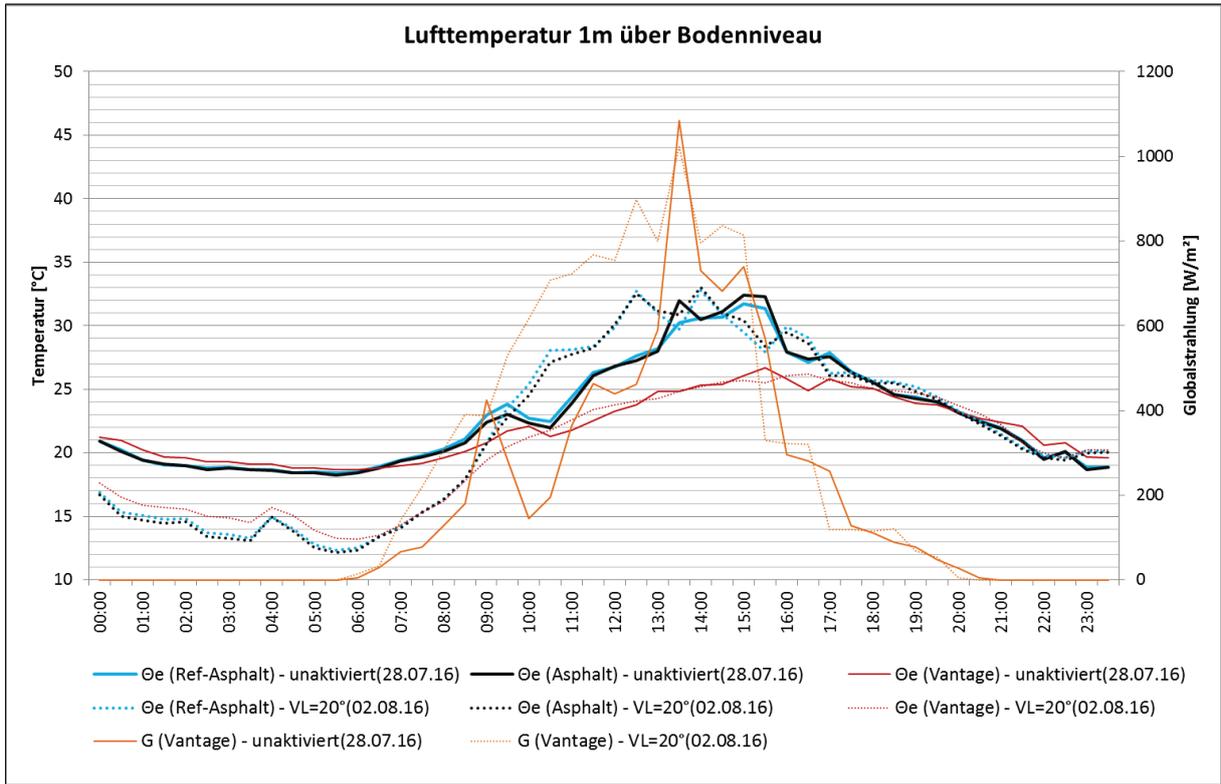


Abbildung 23: Lufttemperatur über Asphaltflächen bei 20°C Vorlauftemperatur

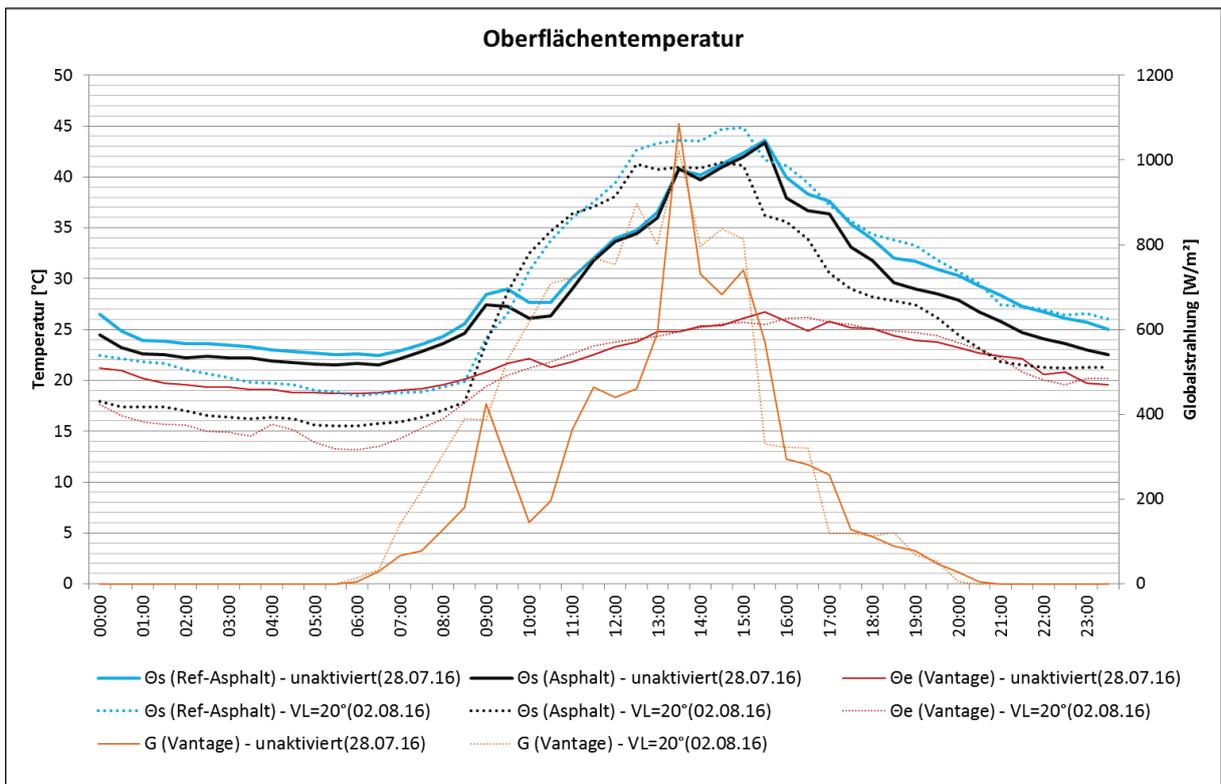


Abbildung 24: Oberflächentemperatur Asphaltflächen bei 20°C Vorlauftemperatur

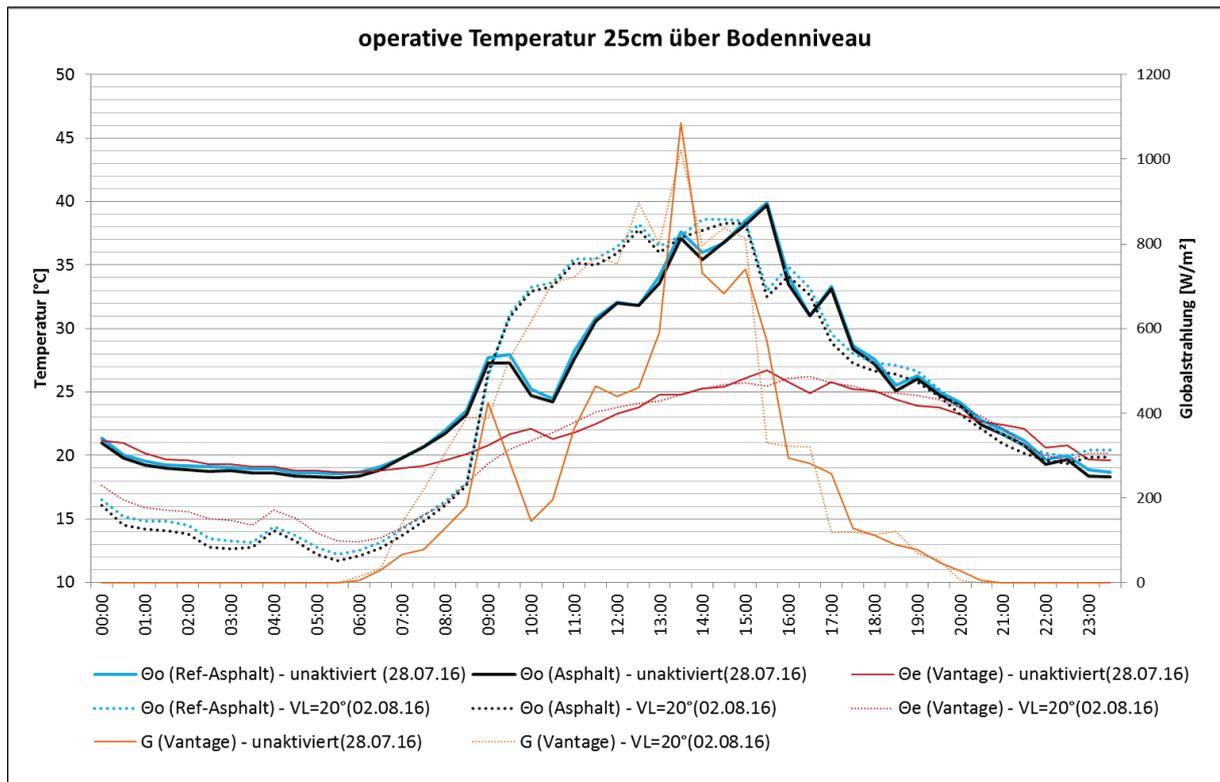


Abbildung 25: operative Temperatur über Asphaltflächen bei 20°C Vorlauftemperatur

Wie aus obigen Abbildungen ersichtlich wird, kann bei einer Vorlauftemperatur von 20°C keine merkliche Absenkung der operativen Temperatur sowie der Lufttemperatur festgestellt werden. Es ist jedoch eine deutliche Temperaturabsenkung der Oberflächentemperatur von ca. 5 K, v.a. ab den späten Nachmittagsstunden und nachts zu verzeichnen. Dies ist insofern bedeutsam, da die Vorlauftemperatur nachts die Außenlufttemperatur um bis zu 5 K übersteigt. Es kann damit darauf geschlossen werden, dass der Wärmeentzugseffekt tagsüber bereits bei 20°C Vorlauftemperatur so hoch ist, dass die Kerntemperatur auch nachts niedriger gehalten werden kann, als bei der nicht aktivierten Fläche. Dabei berücksichtigt werden muss jedoch auch die Schwankungsbreiten der Oberflächentemperatursensoren zwischen Referenz- und Asphaltfläche von ca. 1-2 K.

Temperaturabsenkungen der Asphaltfläche bei 15°C Vorlauftemperatur

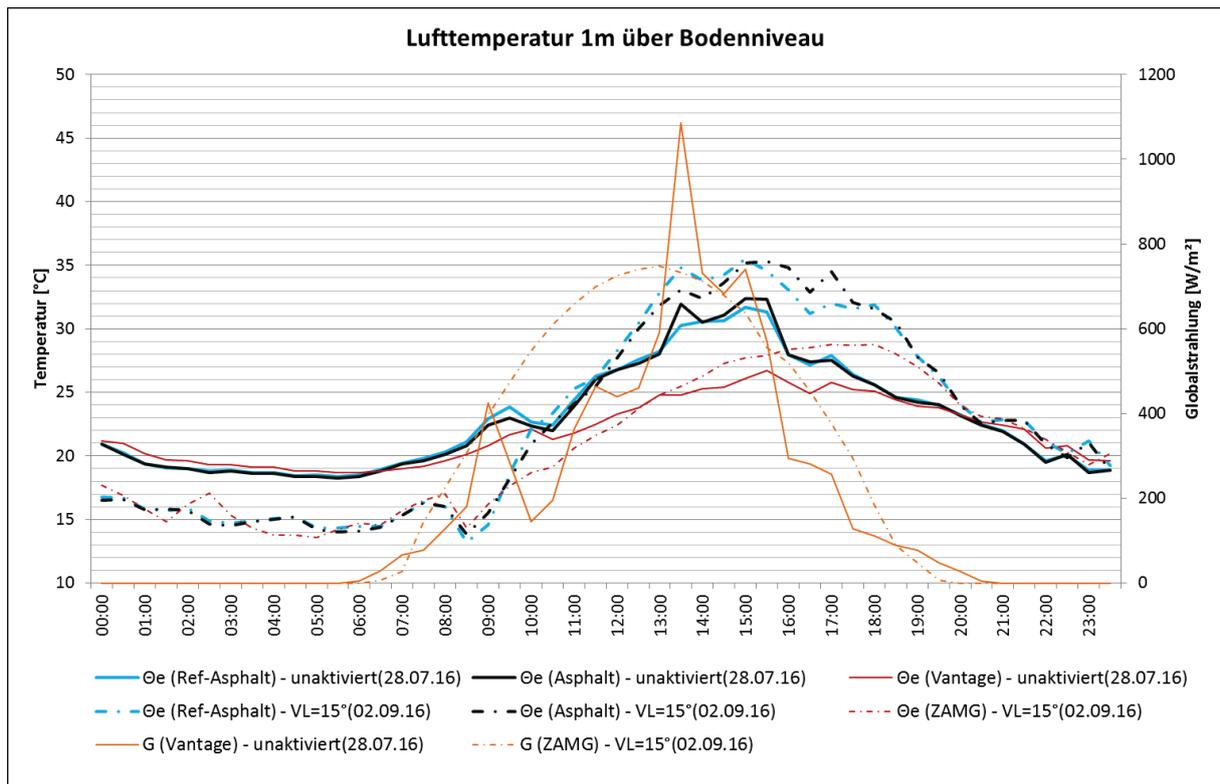


Abbildung 26: Lufttemperatur über Asphaltflächen bei 15°C Vorlauftemperatur

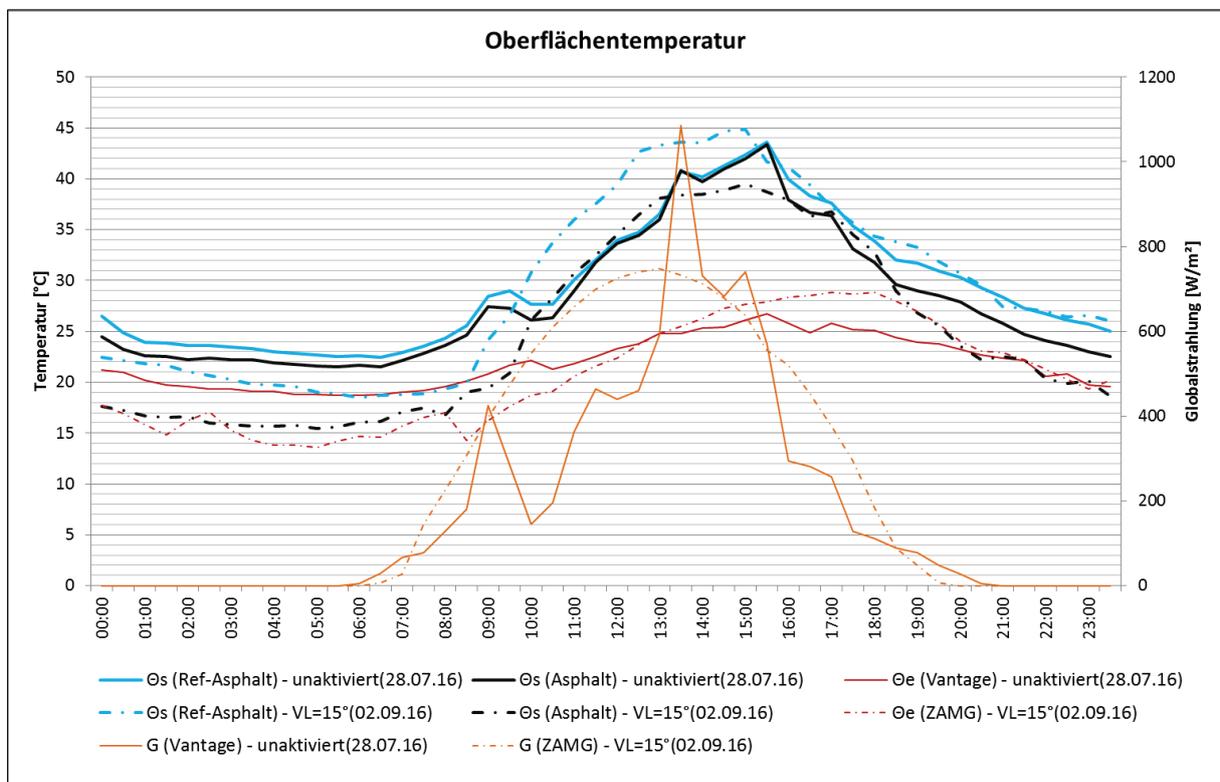


Abbildung 27: Oberflächentemperatur Asphaltflächen bei 15°C Vorlauftemperatur

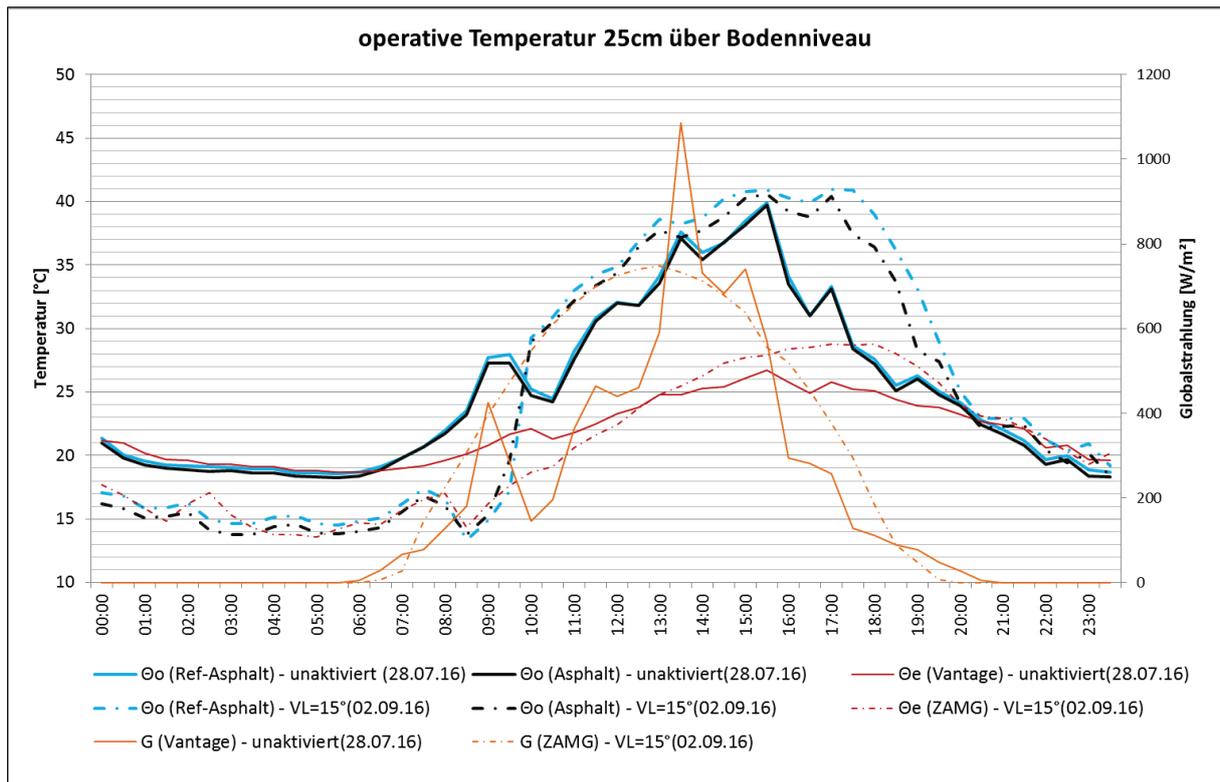


Abbildung 28: operative Temperatur über Asphaltflächen bei 15°C Vorlauftemperatur

Auch bei 15°C Vorlauftemperatur lassen sich keine relevanten Absenkungen der Luft- und operativen Temperaturen verzeichnen. Eine Absenkung der Oberflächentemperatur von ca. 5 K ist auch bei 15°C Vorlauftemperatur deutlich erkennbar. Die Oberflächentemperaturabsenkung befindet sich in einer ähnlichen Größenordnung wie bei einer Vorlauftemperatur von 20°C (geringfügig höhere Absenkungen sind tagsüber zu verzeichnen).

Temperaturabsenkungen der Asphaltfläche bei 10°C Vorlauftemperatur

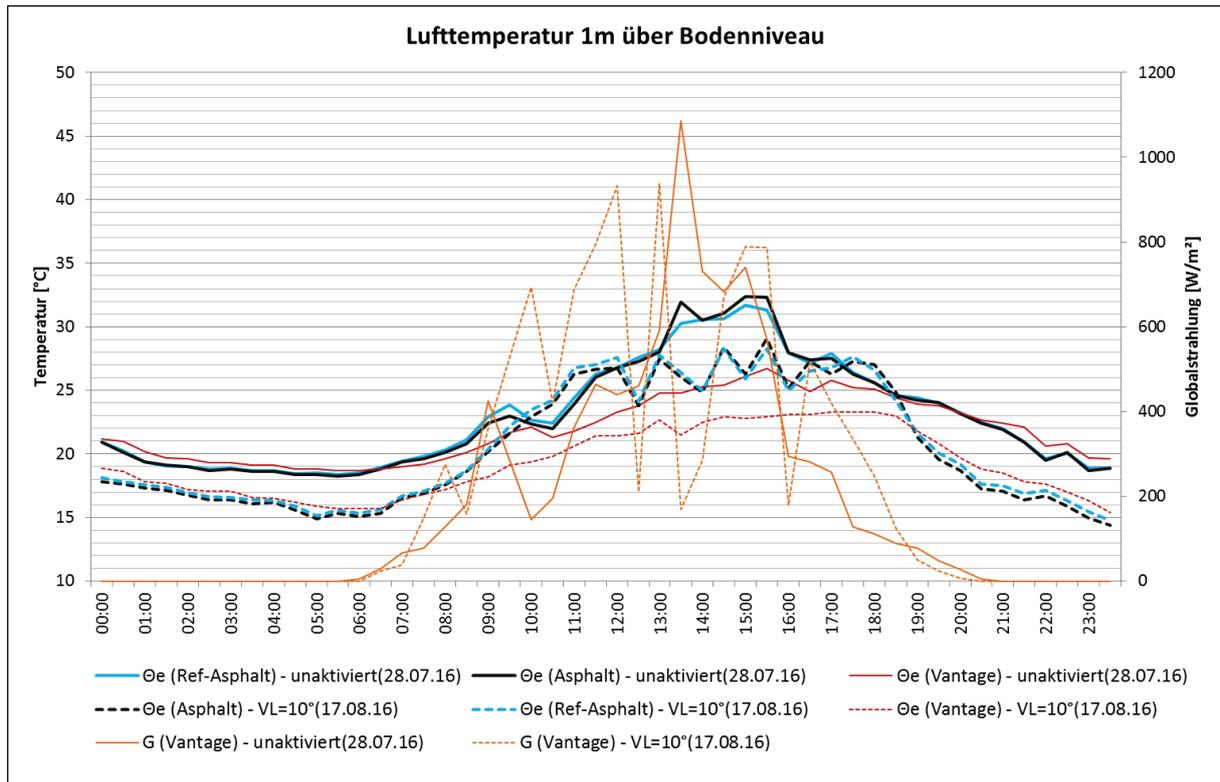


Abbildung 29: Lufttemperatur über Asphaltflächen bei 10°C Vorlauftemperatur

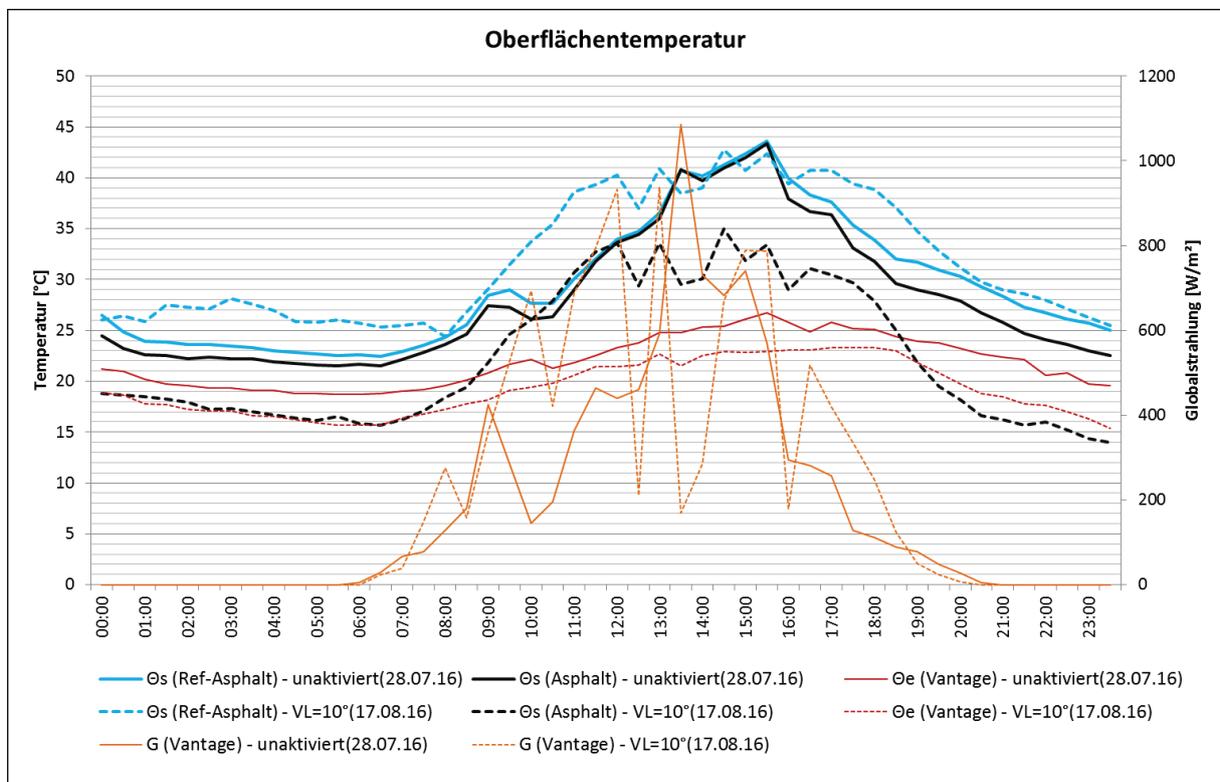


Abbildung 30: Oberflächentemperatur bei 10°C Vorlauftemperatur

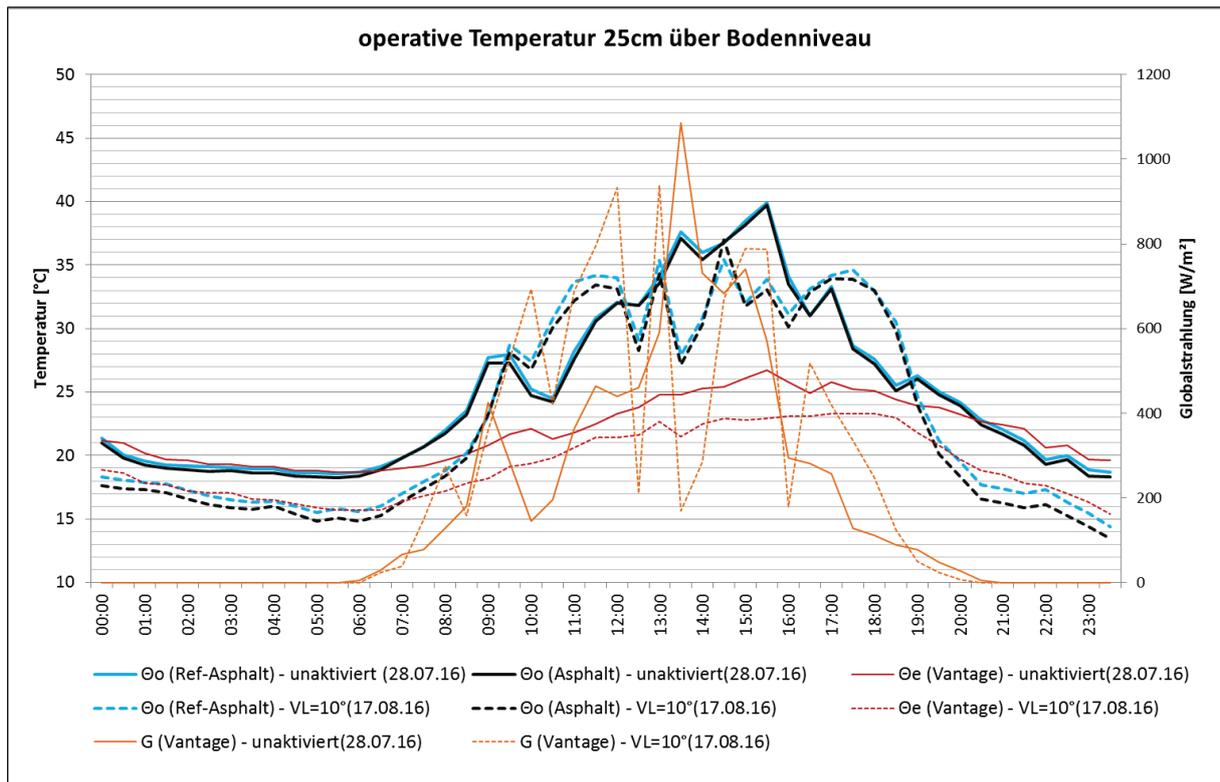


Abbildung 31: operative Temperatur über Asphaltflächen bei 10°C Vorlauftemperatur

Bei einer Vorlauftemperatur von 10°C kann eine signifikante Reduktion der Oberflächentemperatur erreicht werden. Temperaturunterschiede zwischen der Referenzfläche und der aktivierten Fläche von 10 K sind messbar und übersteigen somit merklich die Temperaturabsenkungen im Bereich von 5 K bei 15°C bzw. 20°C Vorlauftemperatur. Diese hohen Oberflächentemperaturabsenkungen schlagen sich jedoch auch bei 10°C Vorlauftemperatur bei diesem Versuchsaufbau nicht auf die Messungen der operativen Temperatur bzw. der Lufttemperatur nieder.

In einem zweiten Schritt werden die Temperaturverhältnisse des Betons im Vergleich mit der Asphaltfläche dargestellt.

Temperaturabsenkungen der Betonfläche im Vergleich zur Asphaltfläche

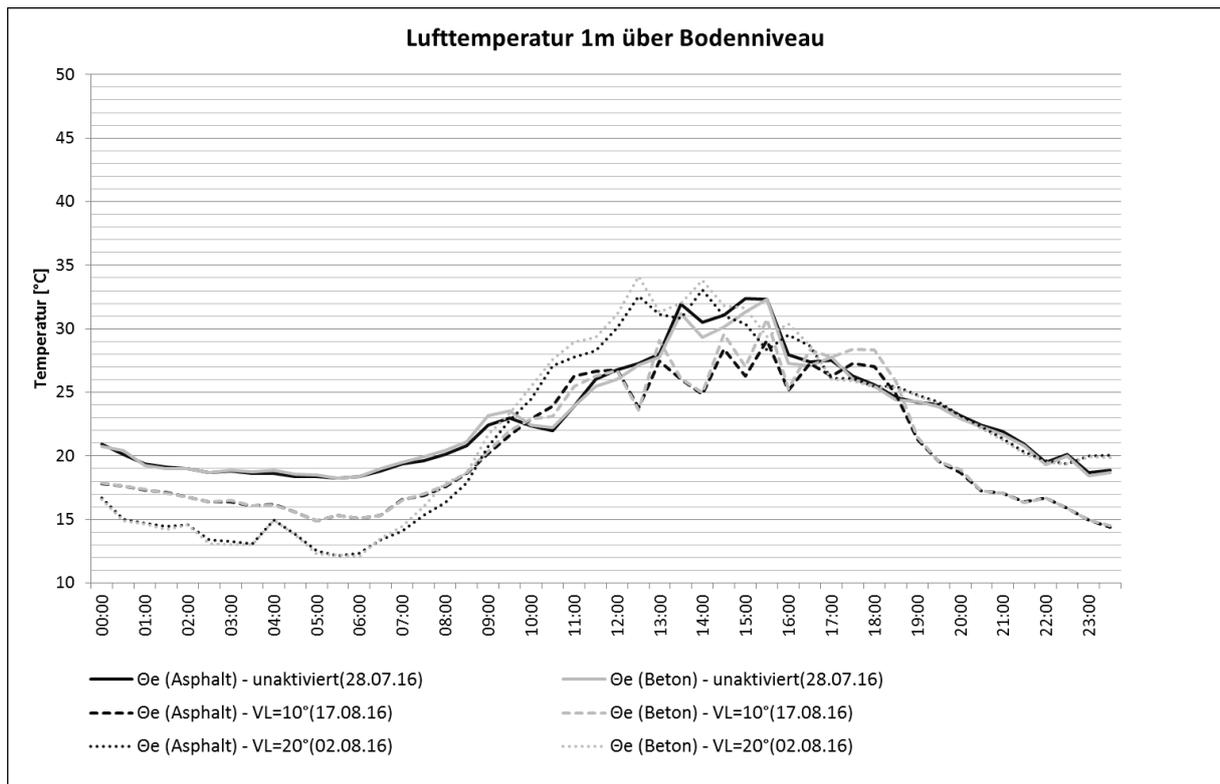


Abbildung 32: Lufttemperatur bei unterschiedlichen Vorlaufftemperaturen (Asphalt und Beton)

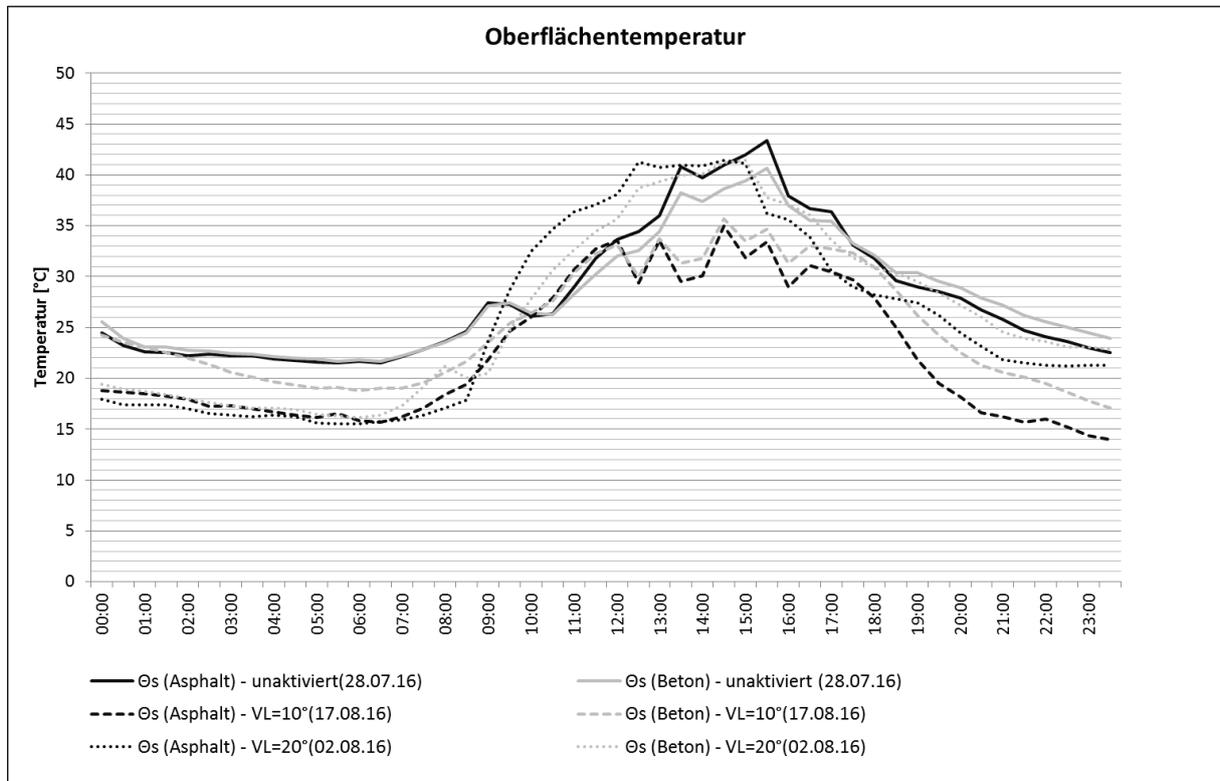


Abbildung 33: Oberflächentemperatur bei unterschiedlichen Vorlaufftemperaturen (Asphalt und Beton)

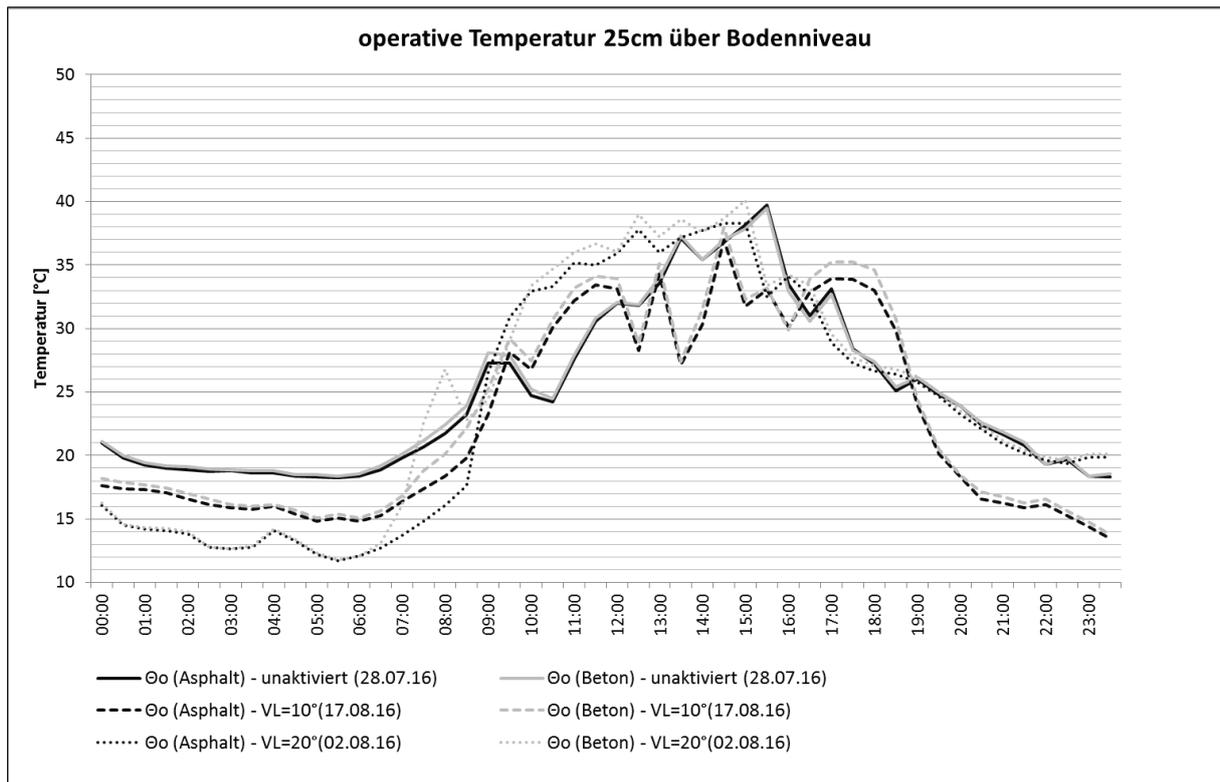


Abbildung 34: operative Temperatur bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen (Asphalt und Beton)

Wie aus obigen Abbildungen ersichtlich wird, können beim vorliegenden Versuchsaufbau die Oberflächentemperaturen bei der Asphaltfläche höher abgesenkt werden als bei der Betonfläche. Bei 10°C Vorlauftemperatur sind nachts Unterschiede im Bereich von 3-5 K messbar. Tagsüber sind die Temperaturunterschiede etwas geringer. Bei 20°C Vorlauftemperatur sind sowohl tagsüber als auch nachts Unterschiede im Bereich von 1-2 K messbar. Tagsüber kann durch den Wärmeentzug der Asphaltfläche bei 10°C Vorlauftemperatur eine Oberflächentemperaturabsenkung um ca. 10 K erreicht werden während bei der Betonfläche eine Reduktion der Oberflächentemperatur um ca. 5 K erreicht wird.

Offenbar kann durch die vorhandene Asphaltfläche mehr Wärme entzogen werden als über die Betonfläche. Dabei muss angemerkt werden, dass die Rohrabstände bei der Betonfläche fast doppelt so groß sind als bei der Asphaltfläche (28 cm Beton, 15 cm Asphalt). Als Vergleich sei hier eine Betonkernaktivierung angeführt, wo bei einer Erhöhung des Rohrabstandes von 15 auf 30 cm der flächenbezogene thermische Leitwert um ca. 25% reduziert wird.¹⁷ Zudem wurde die Betonfläche wesentlich dicker ausgeführt als die Asphaltfläche (18 cm Beton, 8 cm Asphalt). Lediglich die Tiefe (obere Überdeckung) der Rohre (5 bzw. 6 cm) ist annähernd ident.

Die Unterschiede in den Oberflächentemperaturen schlagen sich jedenfalls auch hier nicht in Unterschieden in den operativen Temperaturen bzw. Lufttemperaturen durch.

¹⁷ Vgl. Friembichler/Handler/Kreč//Kuster (2016), S.76

2.3.2 Temperaturabsenkung durch ein Beschattungselement

Die Temperaturabsenkung durch ein Beschattungselement wurde, wie in Kap. 2.2.4 beschrieben, mit Hilfe eines Zeltes über den Versuchsflächen gemessen.

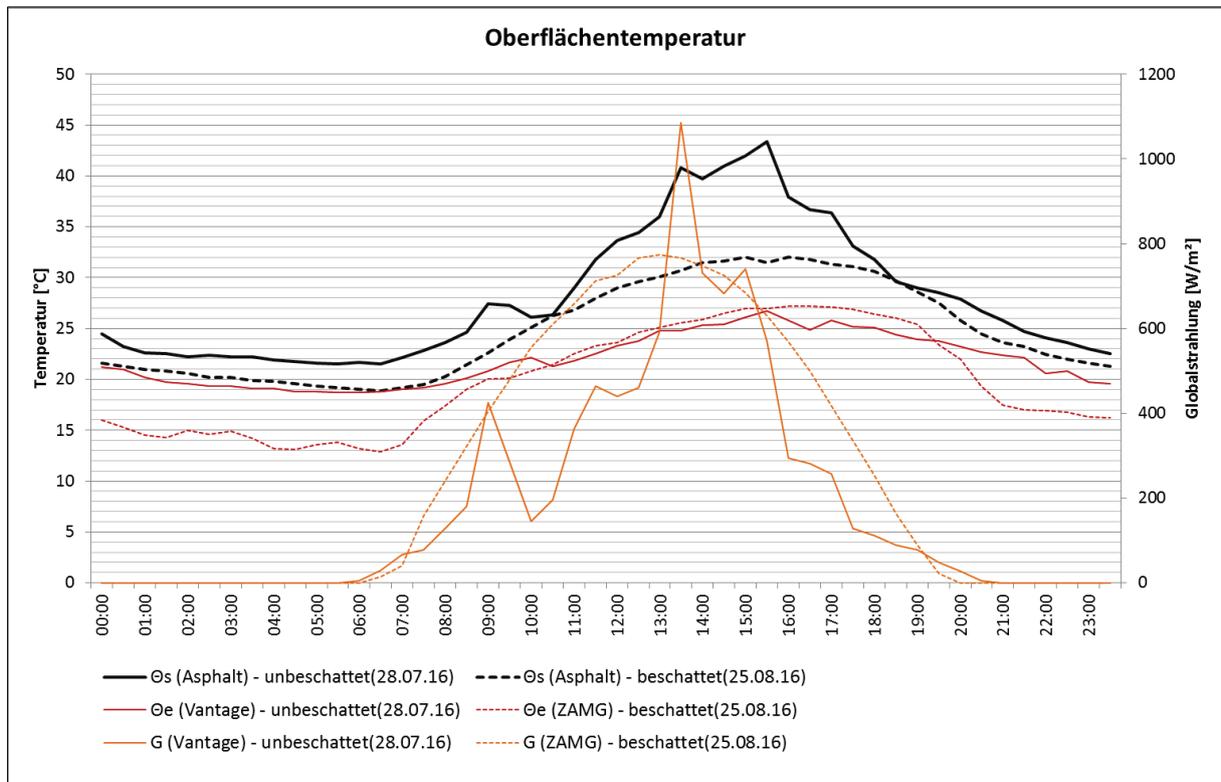


Abbildung 35: Oberflächentemperatur Asphalt mit und ohne Verschattungselement

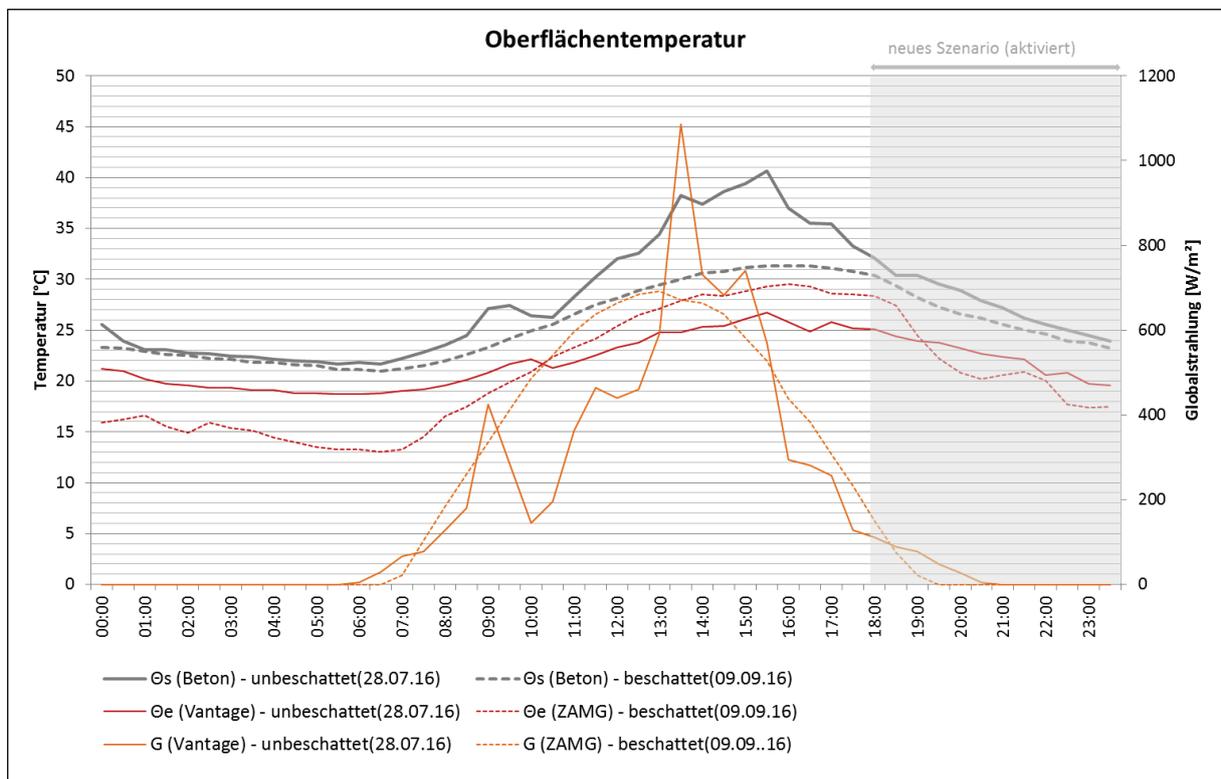


Abbildung 36: Oberflächentemperatur Beton mit und ohne Verschattungselement

Wie aus obigen Abbildungen ersichtlich wird, ist eine merkliche Reduzierung der Oberflächentemperatur tagsüber zu verzeichnen. Nachts kann der gegenteilige Effekt festgestellt werden, wo die Oberflächentemperatur der verschatteten Versuchsfächen im Vergleich zur Umgebungstemperatur wesentlich höhere Temperaturspreizungen aufweist als die unbeschatteten Flächen. Dies lässt auf eine Reduzierung der nächtlichen terrestrischen Abstrahlung durch die Verschattung schließen.

2.3.3 Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse

Insgesamt können auf Basis der obigen Darstellungen folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Oberflächen von Asphalt- und Grünflächen heizen sich tagsüber wesentlich stärker auf als Grünflächen. Dies führt sowohl tagsüber als auch nachts zu höheren operativen Temperaturen im Bereich der Beton- und Asphaltflächen.
- Dunkle Flächen wie Asphalt werden tagsüber wesentlich wärmer als hellere Betonflächen. Unterschiede im Ausmaß von ca. 2-3°C können an einem sonnigen Tag festgestellt werden.
- Bereits bei geringen Temperaturspreizungen zwischen Außenluft- und Vorlauftemperatur (ca. 0-5 K tagsüber) lassen sich die Oberflächentemperaturen merklich absenken.
- Durch die Tatsache, dass eine Oberflächentemperaturabsenkung nachts auch dann erreicht wird, wenn die Vorlauftemperatur nachts die Außenlufttemperatur übersteigt (bei gleichzeitiger Unterschreitung der Außenlufttemperatur tagsüber), lässt sich schließen, dass der Wärmeentzug tagsüber maßgeblich für die Absenkung der Oberflächentemperatur nachts verantwortlich ist.
- Bei Vorlauftemperaturen, die ca. den Nachttemperaturen entsprechen, können Temperaturabsenkungen der Oberfläche von ca. 5 K erreicht werden. Bei entsprechend niedrigeren Vorlauftemperaturen (5 K unter den nächtlichen Außenlufttemperaturen) können Temperaturabsenkungen bis zu 10 K erreicht werden.
- Die Oberflächentemperatur der Asphaltfläche kann wesentlich höher abgesenkt werden als die Oberflächentemperatur der Betonfläche. Ein Rückschluss auf die Materialität als Ursache dieses Unterschiedes ist allerdings nicht zulässig, da die Versuchsaufbauten unterschiedlich aufgebaut sind. Es ist v.a. nicht auszuschließen, dass die Differenzen im Rohrabstand maßgeblich zu diesem Temperaturunterschied beitragen.
- Durch eine Beschattung kann die Oberflächentemperatur tagsüber gesenkt werden.
- Gleichzeitig führt eine Verschattung über der Fläche, aufgrund der verringerten terrestrischen Abstrahlung, zu einer verminderten nächtlichen Abkühlung der Oberflächentemperatur.

2.4 Messergebnisse - Energiegewinnung

2.4.1 Wärmeentzug in Abhängigkeit des Oberflächenmaterials und der Vorlauftemperatur

Zur Bestimmung der Entzugsleistung wurden Messungen bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen durchgeführt:

- Vorlauftemperatur = Außentemperatur
- Vorlauftemperatur = 20°C
- Vorlauftemperatur = 10°C

Die oben aufgelisteten Werte für die Vorlauftemperaturen stellen Zielwerte dar, die aus hydraulischen Gründen, wie in Kap. 2.2 erläutert, nicht konstant und über alle Flächen ident gehalten werden konnten. Die tatsächlichen Vorlauftemperaturen werden für die ausgewerteten Tage sowie die Tage davor und danach deshalb grafisch dargestellt und in den Auswertungen entsprechend berücksichtigt. Ebenfalls zu berücksichtigen ist der Umstand, dass die Flächen zum Frieren des Eisspeichers teilweise als Wärmeabgabemedium herangezogen wurden und die geringe Größe des Eisspeichers zudem zur Folge hatte, dass Vorlauftemperaturen von 10°C nur sehr kurzfristig gehalten werden konnten, da der Eisspeicher gering dimensioniert ist und die Wärmepumpe keine aktive Kühlfunktion aufweist.

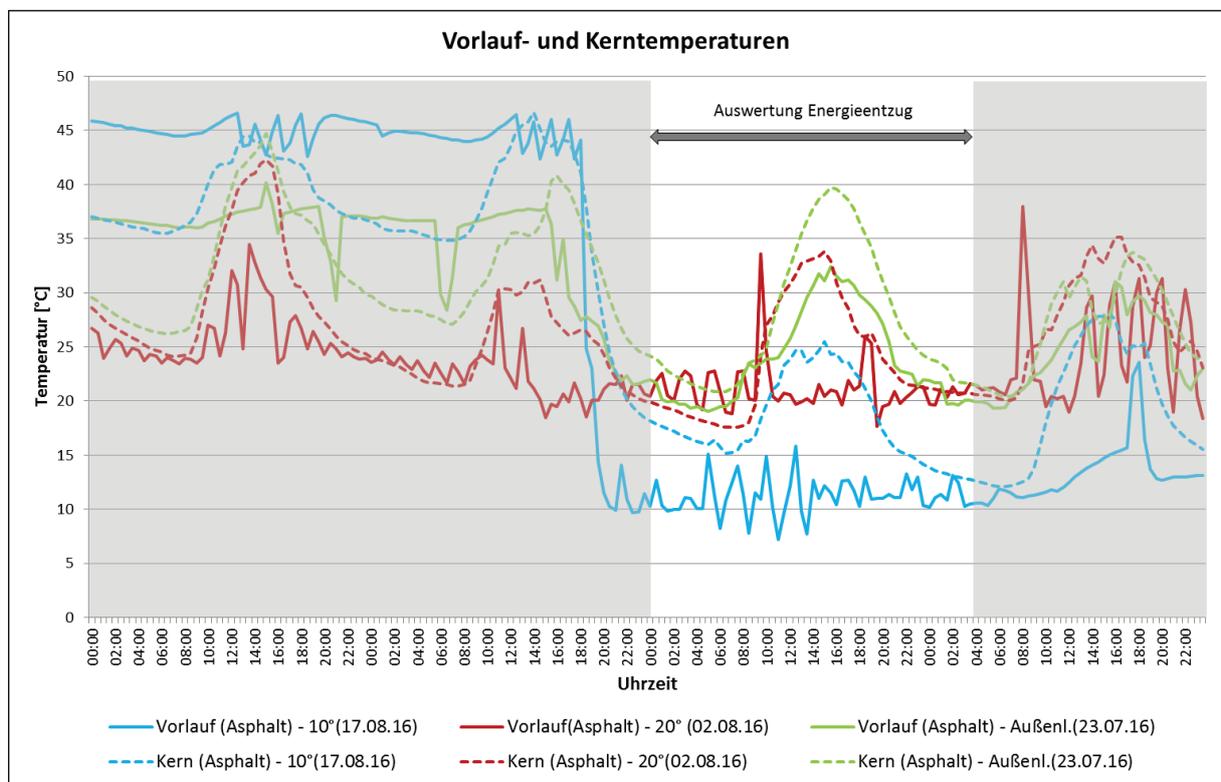


Abbildung 37: Verlauf der Vorlauf- und Kerntemperaturen Asphalt bei unterschiedlichen Szenarien

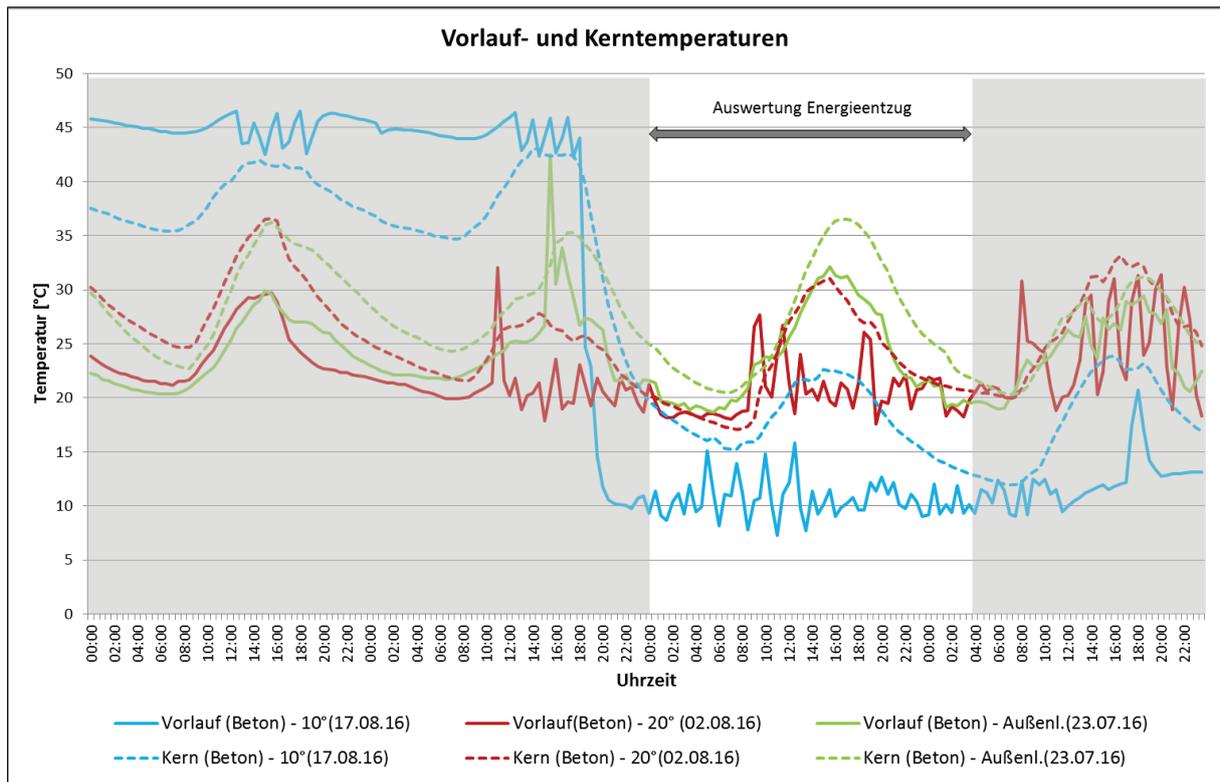


Abbildung 38: Verlauf der Vorlauf- und Kerntemperaturen Beton bei unterschiedlichen Szenarien

Die entzogene Wärmeleistung (durchschnittliche Wärmeleistung innerhalb einer halben Stunde) wurde auf Basis der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur (ΔT) bei einer Durchflussrate von 10-12 l/(hm²) nach folgender Formel berechnet.¹⁸

$$\dot{Q} = \Delta T * \Delta t * c * \rho * \dot{V}$$

ΔT ... Temperaturdifferenz (Rücklauf- minus Vorlauftemperatur) in [K]

Δt ... Zeiteinheit in [h]

c ... spezifische Wärmekapazität des Wasser-Glykolgemisches in [kJ/kgK]

ρ ... Dichte des Wasser-Glykolgemisches in [kg/m³]

\dot{V} ... Volumenstrom in [m³/h]

\dot{Q} ... Energiemenge in [kJ]

Auf Basis dieser Energiemenge wurde die durchschnittliche Entzugsleistung pro 0,5 h berechnet und nachfolgend für eine Vorlauftemperatur von 10°C dargestellt. Die Auswertung erfolgt in Abhängigkeit der Solarstrahlung sowie der Vorlauf- und Kerntemperatur (und der daraus resultierenden Temperaturdifferenz). Detaillierte Darstellungen für eine Vorlauftemperatur von 20°C und einer Vorlauftemperatur, die der Außenlufttemperatur entspricht, befinden sich im Anhang A.

¹⁸ Die spezifische Wärmespeicherkapazität und Dichte für das Glykolgemisch wurde dabei konstant angenommen.

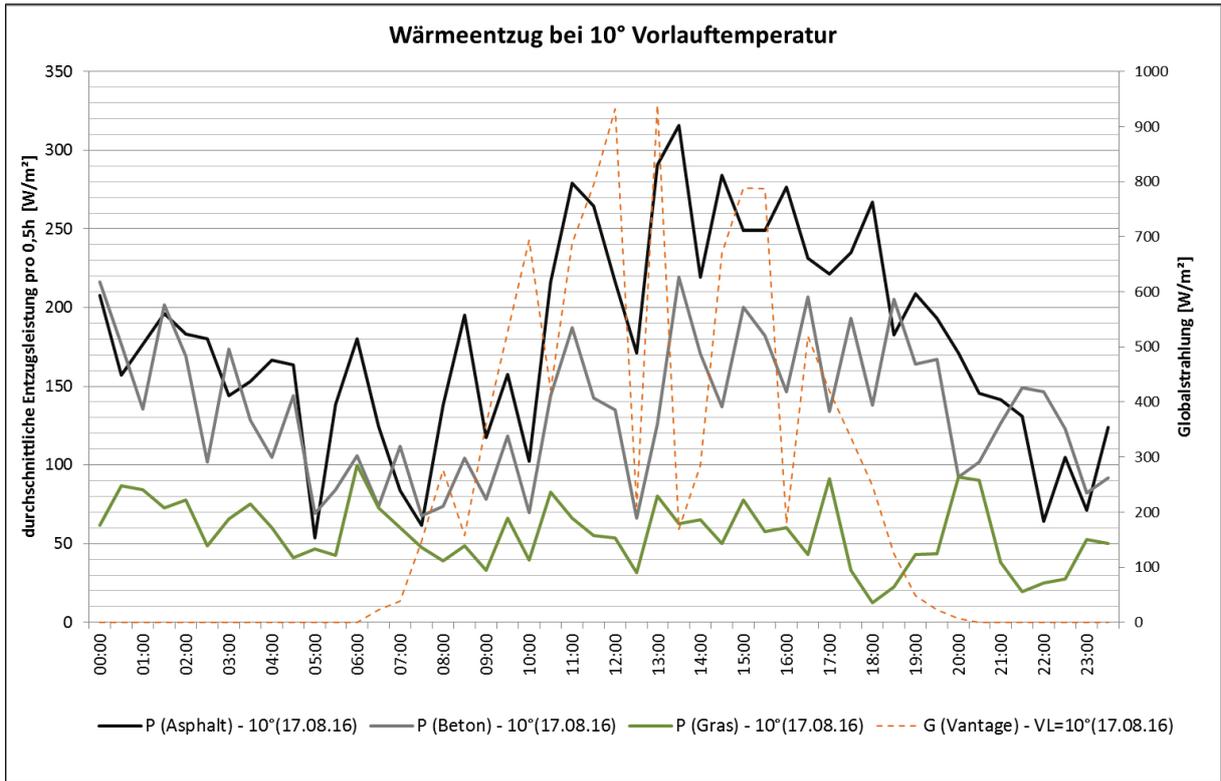


Abbildung 39: Wärmeentzug der Flächen im Vergleich bei 10°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Solarstrahlung

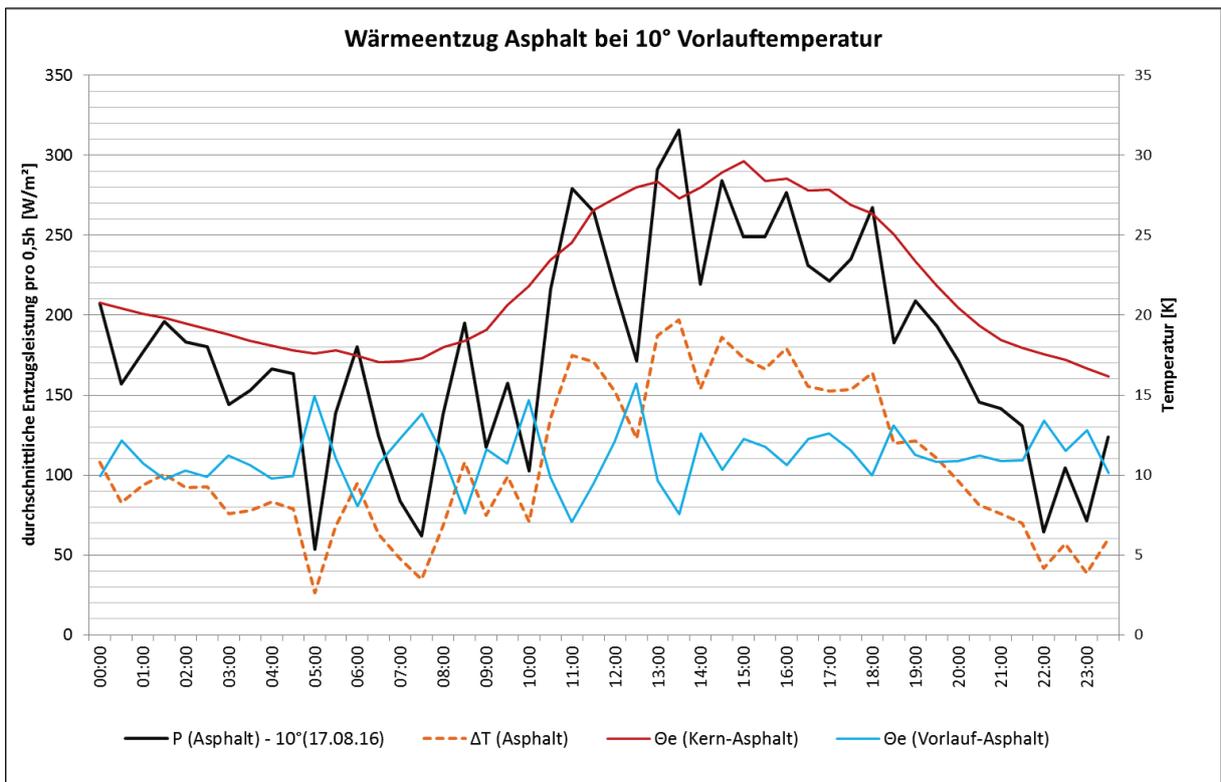


Abbildung 40: Wärmeentzug Asphalt bei 10°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

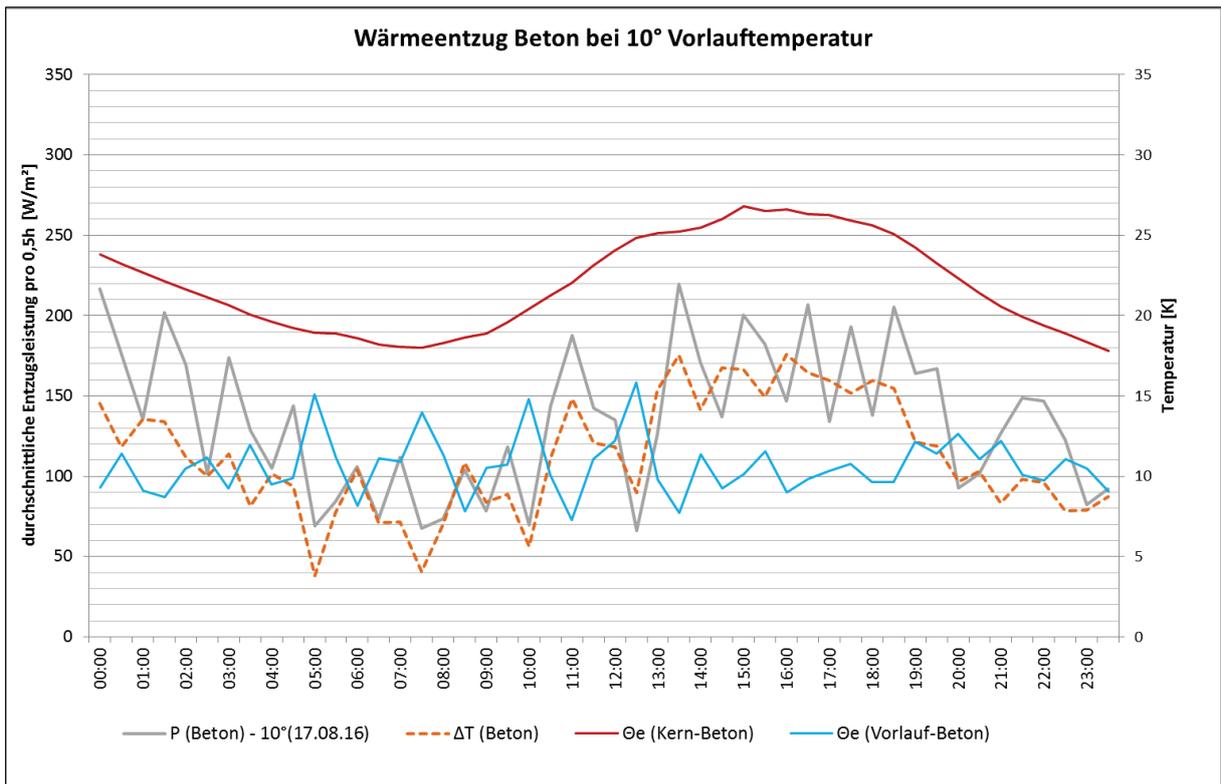


Abbildung 41: Wärmeentzug Beton bei 10°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

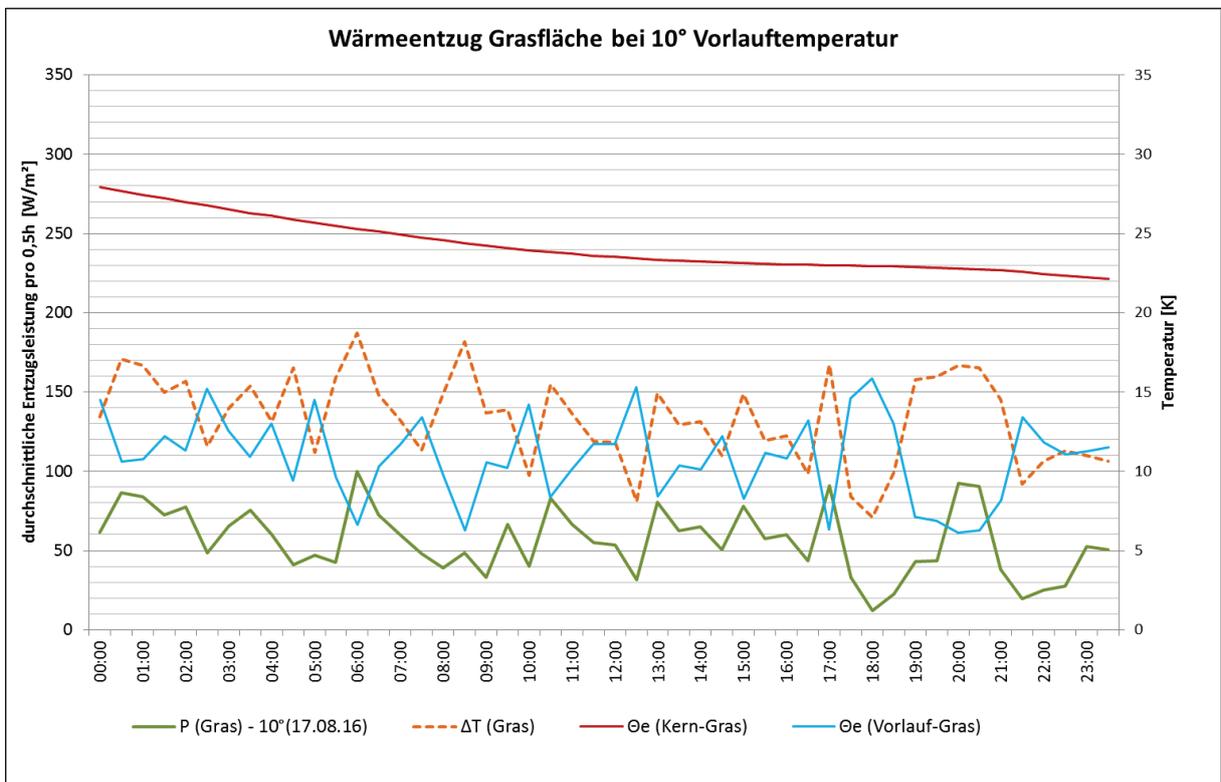


Abbildung 42: Wärmeentzug Grasfläche bei 10°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

Da die Vorlauftemperatur von 10°C nur sehr schwer und kurz bereitgestellt werden konnte, musste der Eisspeicher einige Tage vor dem Szenario vollständig gefroren werden. Dies war nur möglich, indem die Versuchsflächen als wärmeabgebende Medien zur Verfügung gestellt wurden. Aus diesem Grund sind die Vorlauf- und Kerntemperaturen direkt vor Inbetriebnahme des Szenarios mit 10°C Vorlauftemperatur sehr hoch. Insgesamt kann aus obigen Abbildungen jedoch festgestellt werden, dass dieses kurzfristig zurückliegende Ereignis der Beheizung die Entzugsleistung der Asphalt- und Betonfläche tagsüber nur minimal beeinflusst. Vielmehr wird die Entzugsleistung unabhängig von der Vorgeschichte der Bewirtschaftung, maßgeblich von der Solarstrahlung des Tages bestimmt.

Im Gegensatz dazu wird die Entzugsleistung der Grasfläche allerdings noch ganz wesentlich von dem vorhergehenden Szenario (Regeneration des Eisspeichers durch Wärmeabfuhr über die Versuchsflächen) beeinflusst, was an der stetigen Abnahme der Kerntemperatur sichtbar wird. Das kann mitunter daran liegen, dass die Rasenfläche sehr lange als wärmeabgebendes Medium zum Frieren des Eisspeichers verwendet wurde.

In allen Fällen wird die Entzugsleistung erwartungsgemäß durch die Temperaturspreizung bestimmt. Je stärker die Fläche in der Lage ist sich aufzuheizen, desto mehr Wärmemenge kann entzogen werden. Bei der Asphaltfläche sind Temperaturspreizungen bis zu 20 K möglich, womit bei den vorherrschenden Klimarandbedingungen und Betriebsparametern maximale Entzugsleistungen von ca. 300 W/m² erreicht werden. Im Fall der Betonfläche sind etwas geringere Temperaturspreizungen von ca. 18 K möglich, was sich auch in den niedrigeren maximalen Entzugsleistungen von knapp über 200 W/m² niederschlägt. Die Entzugsleistung der Grünfläche ist aus oben genannten Gründen nicht aussagekräftig. Aufgrund der geringen Aussagekraft sowie der ohnehin sehr geringen Entzugsleistung wird die Grünfläche in den nachfolgenden Auswertungen nicht weiter berücksichtigt.

Insgesamt muss auch hier festgestellt werden, dass der Vergleich zwischen der Asphalt- und Betonfläche nur bedingt interpretierbar ist, da einerseits der Rohrabstand der Betonfläche fast doppelt so groß ist wie der Rohrabstand der Asphaltfläche und andererseits die Betonfläche doppelt so dick ist wie die Asphaltfläche, was auch zu höheren U-Werten des Aufbaus unterhalb der Rohrebene führt (relevant für den Wärmetausch mit dem Untergrund).

Für unterschiedliche Temperaturspreizungen werden nachfolgend die an einem sonnigen, windstillen und regenfreien Sommertag entzogenen maximalen Entzugsleistungen und Wärmemengen grafisch dargestellt:

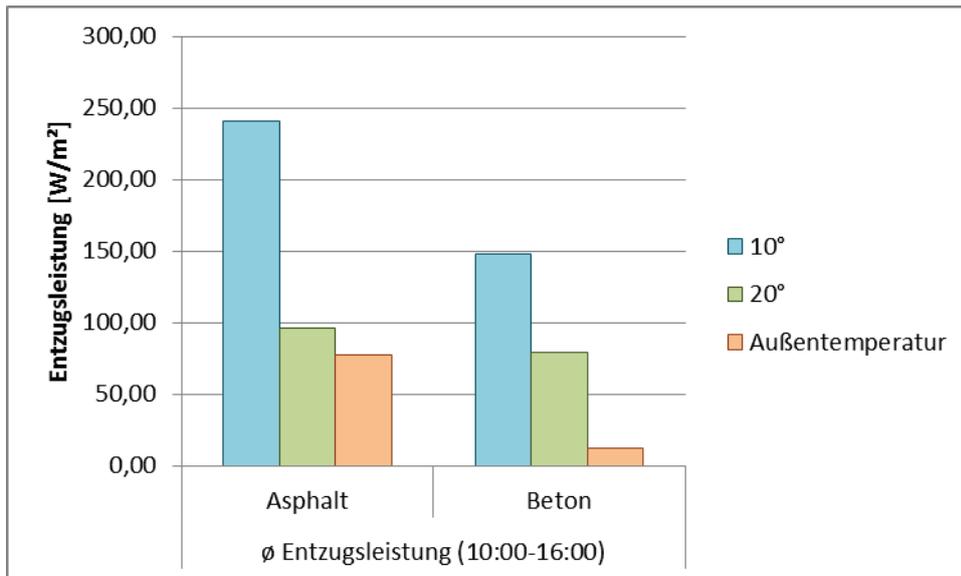


Abbildung 43: durchschnittliche Entzugsleistungen der Versuchsflächen zwischen 10:00 und 16:00 bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen

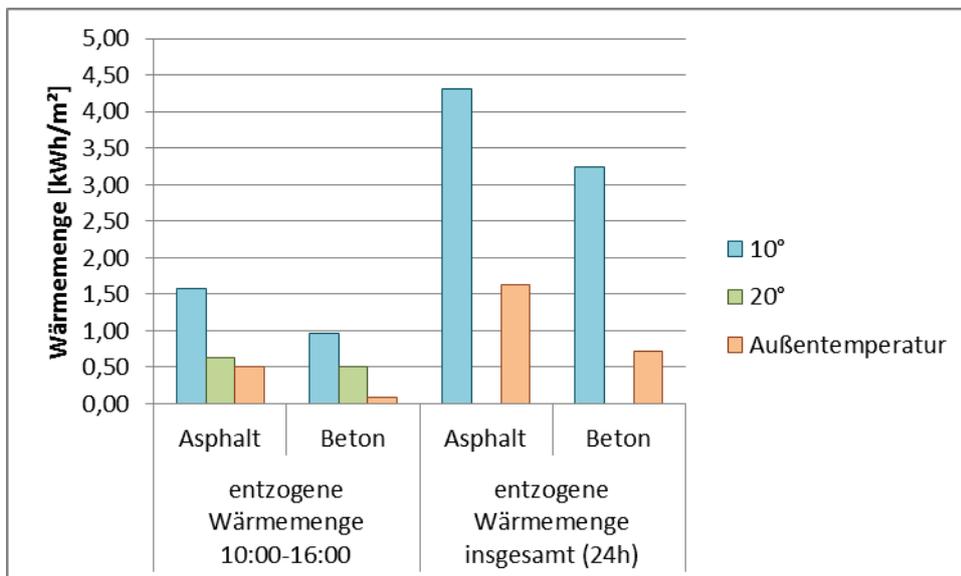


Abbildung 44: entzogene Wärmemenge der Versuchsflächen bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen¹⁹

Obige Abbildungen zeigen, dass die Entzugsleistungen mit abnehmender Vorlauftemperatur, sprich mit höheren Temperaturspreizung zwischen Kern- und Vorlauftemperatur stark zunehmen. Dies spiegelt sich auch in den entzogenen Wärmemengen wieder.

Insgesamt können an einem sonnigen Sommertag mit entsprechend hohen Temperaturspreizungen mehr als 4 kWh durch die Asphaltfläche entzogen werden, während mit der vorhandenen Betonfläche (mit unterschiedlichen Randbedingungen bezüglich Rohrabstand und Schichtenaufbau) 1 kWh weniger an Energie entzogen werden kann.

¹⁹ Entzugsleistung bei 20°C ist für 24 h nicht aussagekräftig, da in den Morgenstunden starke Schwankungen in den Durchflussraten gemessen wurden.

Die gemessenen Werte stimmen sehr gut mit den Literaturwerten überein. So konnte beispielsweise beim QuaWiDis®-Testsystem an besonders heißen Tagen in rund 10 Betriebsstunden bis zu 4 kWh/m² Energie von der Asphaltfläche entzogen werden, an warmen Tagen im Mittel 2 kWh/m².

2.4.2 Abnahme der Entzugsleistung durch Verschattungsmaßnahmen

Zur Messung der Auswirkung von Verschattungsmaßnahmen auf die Entzugsleistung wurde, wie in Kap. 2.2.4 beschrieben, ein Verschattungselement über den Versuchsfächen installiert. Damit sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Umgebungsbedingungen wie z.B. Schattenwirkung durch Nachbargebäude, Topografie und Bewölkung abgeschätzt werden.

Die Vergleichsmessungen der unverschatteten und verschatteten Fläche werden nachfolgend für den Zeitraum zwischen 10:00 und 16:00 für eine Vorlauftemperatur von 10°C und 20°C grafisch dargestellt:

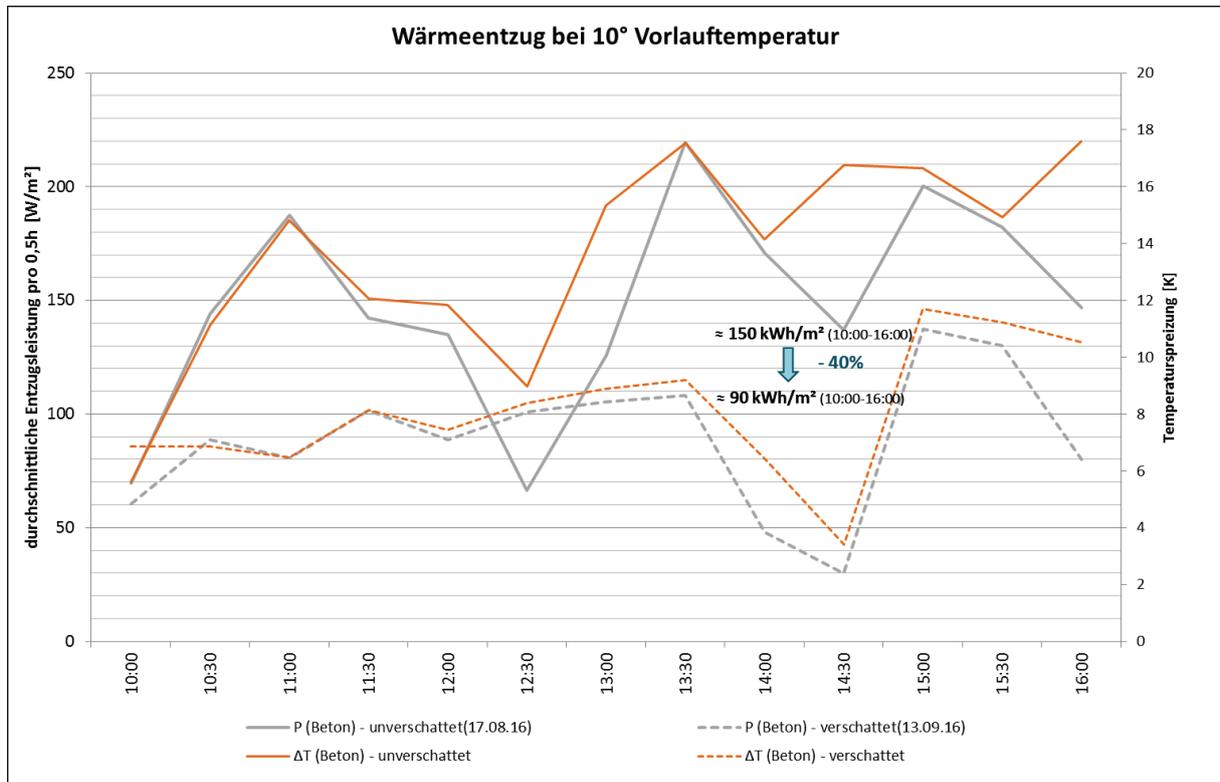


Abbildung 45: Abnahme der Entzugsleistung durch Verschattungsmaßnahmen bei 10°C Vorlauftemperatur (Beton)

Durch die Verschattung der Betonfläche kann eine signifikante Reduktion der Entzugsleistung festgestellt werden. Die entzogene Wärmemenge reduziert sich zum Zeitpunkt der höchsten solaren Einstrahlung zwischen 10:00 und 16:00 um 40%.

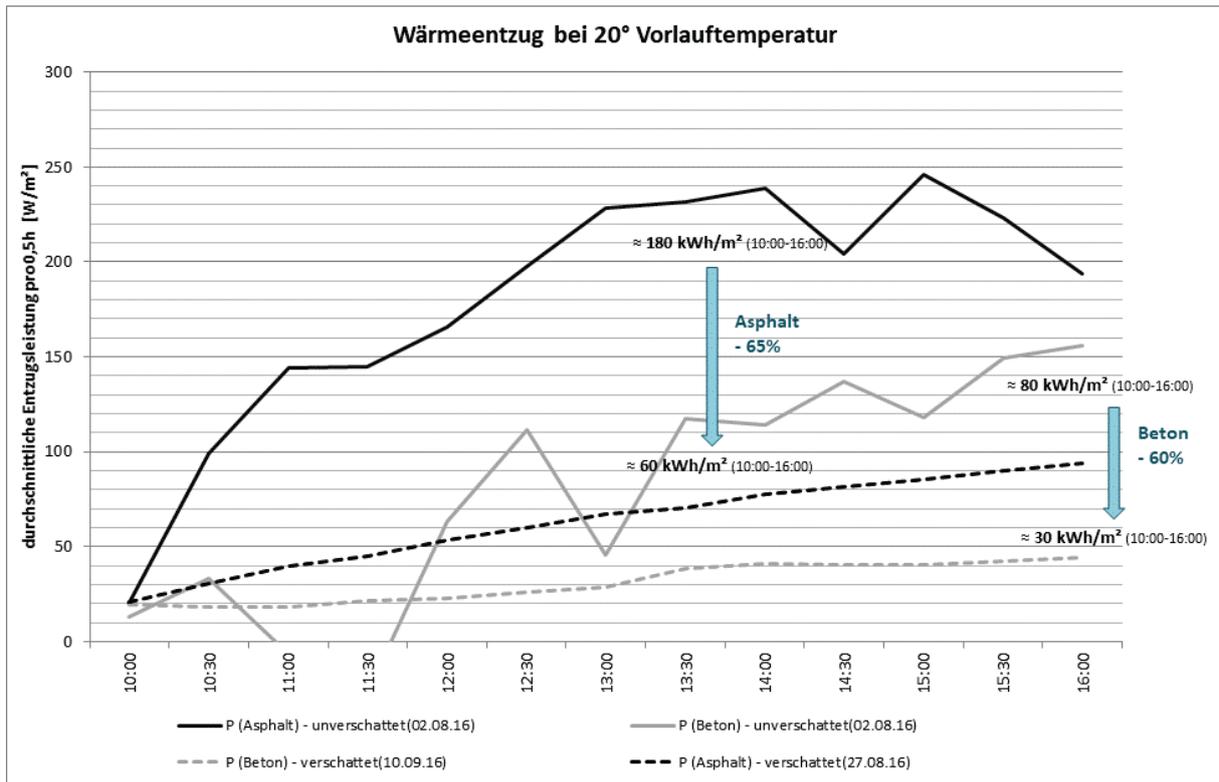


Abbildung 46: Abnahme der Entzugsleistung durch Verschattungsmaßnahmen bei 20°C Vorlauftemperatur (Beton und Asphalt)

Bei einer Vorlauftemperatur von 20°C zeigt sich ein noch deutlicherer Rückgang der Entzugsleistungen und entzogenen Energiemengen durch die Verschattungsmaßnahme. Die entzogene Wärmemenge zum Zeitpunkt der höchsten Solarstrahlung (zwischen 10:00 und 16:00) reduziert sich um 60-65%.

2.4.3 Ermittlung einer Kollektorgleichung auf Basis der Messergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe der Asphaltfläche unter den vorherrschenden Bedingungen (Rohrabstand, Aufbaustärke) mehr Wärme entzogen werden kann, als bei der Betonfläche. Bei 10°C Vorlauftemperatur sind an einem sonnigen, windstillen Sommertag bei einer Durchflussrate von ca. 10 l/(hm²) maximale Entzugsleistungen bis zu 300 W/m² bei der Asphalt- und 200 W/m² bei der Betonfläche möglich.

Durch eine Verschattung wird diese Entzugsleistung je nach Temperaturspreizung auf ca. die Hälfte reduziert.

Die Entzugsleistung selbst weist erwartungsgemäß einen direkten Zusammenhang mit der Temperaturspreizung zwischen Absorber (Kern)- und Vorlauftemperatur auf, was in untenstehender Abbildung grafisch veranschaulicht wird:

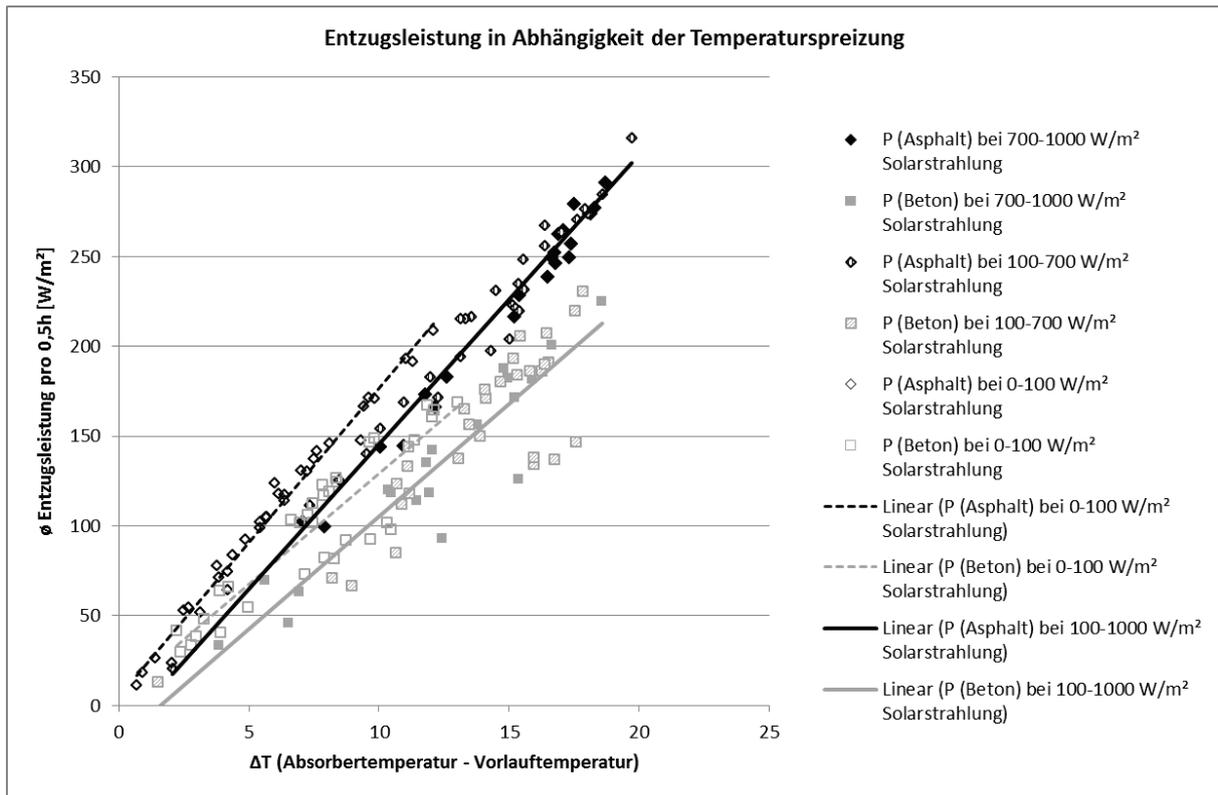


Abbildung 47: Entzugsleistung in Abhängigkeit der Temperaturspreizung zwischen Absorber(Kern)- und Vorlauftemperatur (aus den Messergebnissen bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen)

Wie aus Abbildung 47 ersichtlich wird, ist die Entzugsleistung pro K Temperaturdifferenz nachts höher, was damit zusammenhängt, dass sowohl der Bodenwärmestrom als auch der fühlbare Wärmestrom nachts niedriger ausfällt als tagsüber. Diese Zusammenhänge werden in Kap. 2.5 eingehend erläutert.

Die Schwankungsbreiten der linearen Zusammenhänge sind bei der Asphaltfläche wesentlich geringer als bei der Betonfläche, was mit dem Versuchsaufbau zusammenhängen kann. Einerseits ist die Betonfläche wesentlich dicker als die Asphaltfläche und andererseits sind die Rohrabstände der Betonfläche doppelt so groß als die der Asphaltfläche. Beides führt dazu, dass der Temperaturverlauf innerhalb der Fläche im Gegensatz zur Asphaltfläche nicht mehr als konstant angenommen werden kann.

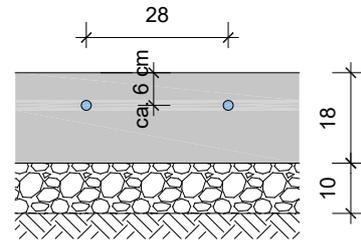
Zusammenfassend können aus den Ergebnissen folgende Kollektorgleichungen für die vorhandene Asphalt- und Betonfläche aufgestellt werden:

Betonfläche:

Formel 1: Kollektorgleichung der vorhandenen Betonfläche

$$P_{(Beton,G>100W)} = 12,529 * (T_{Absorber} - T_{Vorlauf}) - 20,101$$

$$P_{(Beton,G<100W)} = 12,348 * (T_{Absorber} - T_{Vorlauf}) + 5,8623$$

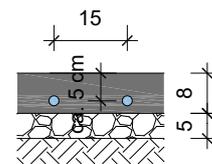


Asphaltfläche:

Formel 2: Kollektorgleichung der vorhandenen Asphaltfläche

$$P_{(Asphalt,G>100W)} = 16,107 * (T_{Absorber} - T_{Vorlauf}) - 15,784$$

$$P_{(Asphalt,G<100W)} = 17,141 * (T_{Absorber} - T_{Vorlauf}) + 5,0843$$



Die Messergebnisse stellen jedenfalls Momentaufnahmen unter bestimmten Randbedingungen dar, womit qualitative Aussagen für die Messungen unter den vorhandenen Klimarandbedingungen und Versuchsaufbauten getroffen werden können. Um jedoch auch detaillierte Aussagen über die Energiegewinnung in Abhängigkeit der Jahreszeit, der Windexponiertheit sowie des Versuchsaufbaus, ebenso wie über die jährliche Entzugsleistung, treffen zu können, wird auf Basis der Messergebnisse im folgenden Kapitel ein Rechenmodell erstellt.

2.5 Erstellen eines vereinfachten Rechenmodells

2.5.1 Allgemeines

Um Aussagen über die jährliche Entzugsleistung der befestigten Flächen treffen zu können, wird mit Hilfe der Messergebnisse ein vereinfachtes statisches Rechenmodell erstellt, welches für eine anschließende Parameterstudie herangezogen wird.

Das Rechenmodell basiert auf einem vereinfachten Ansatz zur Berechnung der Straßenoberflächentemperatur auf Basis einer Energiebilanzgleichung für die befestigte Fläche des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.²⁰

Für die Energieübergänge an der Straßenoberfläche kann dabei folgende Energiebilanzgleichung aufgestellt werden:²¹

Formel 3: Energiebilanzgleichung einer befestigten horizontalen Oberfläche im Außenraum

$$Q_{net} = Q + B + H + V - Q_{Entzug} = 0$$

Q_{net} Summe aller Energieübergänge an der Oberfläche

Q ... Gesamtstrahlungsbilanz

B ... Bodenwärmestrom

H ... fühlbarer Wärmestrom

V ... latenter Wärmestrom

Q_{Entzug} entzogene Wärmemenge

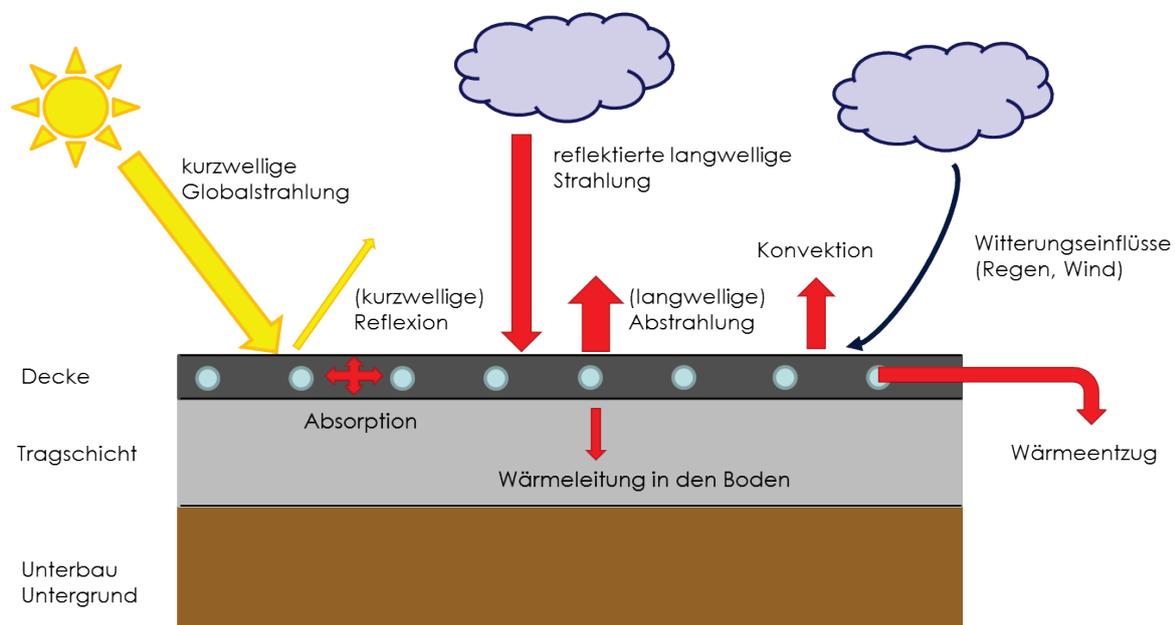


Abbildung 48: Wärmetransportmechanismen Straße

²⁰ Wistuba/Litzka/Blab (2001)

²¹ vgl. Wistuba/Litzka/Blab (2001), S.60

2.5.2 Rechenansatz zur Beschreibung des Modells

Nachfolgend werden die einzelnen Parameter sowie deren verwendete Rechenansätze im Detail beschrieben:²²

Gesamtstrahlungsbilanz Q:

Formel 4: Berechnung der Gesamtstrahlungsbilanz Q

$$Q = Q_K + Q_L = (1 - \alpha) * G + (\varepsilon_a * F * T_L^4 - \varepsilon_b * F * T_O^4)$$

Q_K ... kurzwellige Strahlungsbilanz (setzt sich zusammen aus der Globalstrahlung (direkte Sonnenstrahlung + diffuse Himmelsstrahlung) sowie der kurzwelligen Reflexionsstrahlung) [W/m²]

Q_L ... langwellige Strahlungsbilanz (setzt sich zusammen aus der atmosphärischen Gegenstrahlung sowie der langwelligen Ausstrahlung von der Erdoberfläche) [W/m²]

α ... Albedo der Straßenoberfläche [-]

G ... Globalstrahlung [W/m²]

ε_a ... Emissionskoeffizient der Atmosphäre für den langwelligen Strahlungsbereich [-]

ε_b ... Emissionskoeffizient des Fahrbahnbelages für den langwelligen Strahlungsbereich [-]

F ... Stefan-Boltzmannkonstante ($5,6697 \pm 0,0029$)*10⁻⁸ [W/m²K⁴]

T_L ... Lufttemperatur

T_O ... Straßenoberflächentemperatur

Bodenwärmestrom B:

Formel 5: Berechnung des Bodenwärmestroms B

$$B = -\frac{\lambda}{d} * (T_O - T_u) = -U * (T_O - T_u)$$

λ ... Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

d ... Schichtdicke [m]

T_u ... Fahrbahntemperatur an der Schicht-Unterseite [K]

T_O ... Fahrbahntemperatur an der Schicht-Oberseite [K]

U ... Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion [W/m²K]

Fühlbarer Wärmestrom H:²³

Formel 6: Berechnung des fühlbaren Wärmestroms H

$$H = \alpha_K * (T_L - T_O) = 7 * \sqrt{v} * (T_L - T_O)$$

α_K ... Konvektionsfaktor oder Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]

v ... Windgeschwindigkeit [m/s]

T_L ... Lufttemperatur in [K]

T_O ... Fahrbahntemperatur an der Schicht-Oberseite [K]

²² Häckel (1993)

²³ Ansatz lt. Frankenberger in Hofmann (1965) in Wistuba (2001).

Latenter Wärmestrom L:

Der latente Wärmestrom wird in einer vereinfachten Energiebilanzgleichung vernachlässigt, da sich die Mechanismen des latenten Wärmestroms in ihrer Wirkung gegenseitig so gut wie aufheben.²⁴

Entzogene Wärmemenge Q_{Entzug} :

zur Bestimmung der entzogenen Wärmemenge wird die Kollektorgleichung lt. Kap. 2.4.3 herangezogen:

Betonfläche:

Formel 1: Kollektorgleichung der vorhandenen Betonfläche

$$P_{(Beton, G > 100W)} = 12,529 * (T_{\text{Absorber}} - T_{\text{Vorlauf}}) - 20,101$$

$$P_{(Beton, G < 100W)} = 12,348 * (T_{\text{Absorber}} - T_{\text{Vorlauf}}) + 5,8623$$

Asphaltfläche:

Formel 2: Kollektorgleichung der vorhandenen Asphaltfläche

$$P_{(Asphalt, G > 100W)} = 16,107 * (T_{\text{Absorber}} - T_{\text{Vorlauf}}) - 15,784$$

$$P_{(Asphalt, G < 100W)} = 17,141 * (T_{\text{Absorber}} - T_{\text{Vorlauf}}) + 5,0843$$

2.5.3 Verwendete Parameter

Für die Berechnung werden folgende Parameter angesetzt:

- G – Globalstrahlung und T_L – Lufttemperatur
Da es sich bei den gemessenen Globalstrahlungsdaten um Momentaufnahmen in W/m^2 handelt, wurden die stündlichen Globalstrahlungswerte in Wh/m^2 sowie die dazugehörigen Temperaturverläufe anhand eines halbsynthetischen Klimadatensatzes für Wien, innere Stadt (Messpunkt Operngasse) für den Zeitraum von 1990 bis 2010 herangezogen. Berechnet und zur Verfügung gestellt durch Dr. Klaus Kreč.
- α – Albedo der Straßenoberfläche. Lt. Nefzger et al. (1997) befindet sich die Albedo eines neuwertigen Asphaltbetons zwischen 6,8 und 11,6%. Für einen, wie im vorliegenden Fall, gealterten Belag liegt die Albedo zwischen 13,1 und 25,3%. Die Albedo für einen Beton unterschiedlichen Alters liegt zwischen 17,2% und 30,2%. Im vorliegenden Fall sind die Flächen bereits gealtert, womit die Farbgebung des Asphalts optisch dem Beton bereits sehr nahe liegt.
Nach Validierung mit den gemessenen Werten wurden folgende Albedos angenommen:
Asphalt, verwittert – 25%
Beton, verwittert – 25%

²⁴ Vgl. Arand (1991) in Wistuba/Litzka/Blab (2001), S.68

- ε_b – Emissionskoeffizient des Fahrbahnbelages. Dieser liegt für irdische Oberflächen zwischen 0,9 und 0,99 und wird für die nachfolgenden Berechnungen mit 0,95 angenommen.
- ε_a – Emissionskoeffizient der Atmosphäre für den langwelligen Strahlungsbereich wurde als Funktion der Seehöhe gemäß Wistuba et al. (2001) folgendermaßen angenommen: $\varepsilon_a = 0,813 - \frac{0,243}{e^{0,0945 \cdot (-0,005 \cdot h + 18)}}$. Bei Berücksichtigung der Seehöhe von Krems mit 203 m ü. A. ergibt sich damit ein Koeffizient $\varepsilon_a = 0,76$.
- λ – Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit wurde für einen Asphalt mit einer Rohdichte von 2100 kg/m³, für Beton mit einer Rohdichte von 2200 kg/m³, für ein toniges Erdreich mit einer Rohdichte von 1200-1800 kg/m³ und für Kies mit einer Rohdichte zwischen 1.700 und 2.200 kg/m³ lt. VDI Wärmeatlas (2013) mit folgenden Werten angenommen:
 $\lambda(\text{Asphalt}) = 1,0 \text{ W/mK}$ ²⁵
 $\lambda(\text{Beton}) = 1,75 \text{ W/mK}$
 $\lambda(\text{Humusschicht}) = 1,5 \text{ W/mK}$
 $\lambda(\text{Kies}) = 2,0 \text{ W/mK}$
- U-Wert. Der U-Wert wurde für die unterschiedlichen Aufbauten jeweils für eine Dicke von 20 cm inkl. Kies- und Erdreichschichten über den Kehrwert der einzelnen Wärmedurchlasswiderstände ermittelt.
- T_u – Fahrbahntemperatur an der Schicht-Unterseite. Für die Berechnung des Bodenwärmestroms wurde die für den Standort Krems gemessene Erdreichtemperatur in 20 cm Tiefe herangezogen. Die Daten stammen von der Messstation Krems der ZAMG.

2.5.4 Validierung des Rechenmodells

Zur Validierung und Überprüfung des in Kap. 2.5 beschriebenen Rechenmodells wurden unterschiedliche Messwerte mit stundenweise berechneten Werten verglichen. Für die Asphaltfläche ergibt sich tagsüber beispielsweise:

Formel 7: Aufstellen der Energiebilanzgleichung für die vorhandene Asphaltfläche ($G > 100 \text{ W/m}^2$)

$$Q_{net} = 0,76 * 5,6697 * 10^{-8} * T_L^4 - 0,95 * 5,6697 * 10^{-8} * T_O^4 - U * (T_O - T_u) + 7 * \sqrt{v} * (T_L - T_O) - 16,107 * (T_{Absorber} - T_{Vorlauf}) - 15,784 = 0$$

Bei bekannter Außenlufttemperatur, Erdreichtemperatur, Vorlauftemperatur und Windgeschwindigkeit ergeben sich damit 2 Unbekannte:

- Absorber- bzw. Kerntemperatur $T_{Absorber}$ und
- Oberflächentemperatur T_O

Die Absorbentemperatur (Kerntemperatur) steht in einem direkten Zusammenhang mit der Oberflächentemperatur. Dieser Zusammenhang wird nachfolgend anhand der

²⁵ Annahme unterer Grenzwert für bituminöse Decken lt. FGSV (1994) in Wistuba/Litzka/Blab (2001) als nächste Annäherung zu den Werten lt. VDI Wärmeatlas (2013) mit 0,7 W/mK

Messergebnisse bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen grafisch dargestellt und ausgewertet:

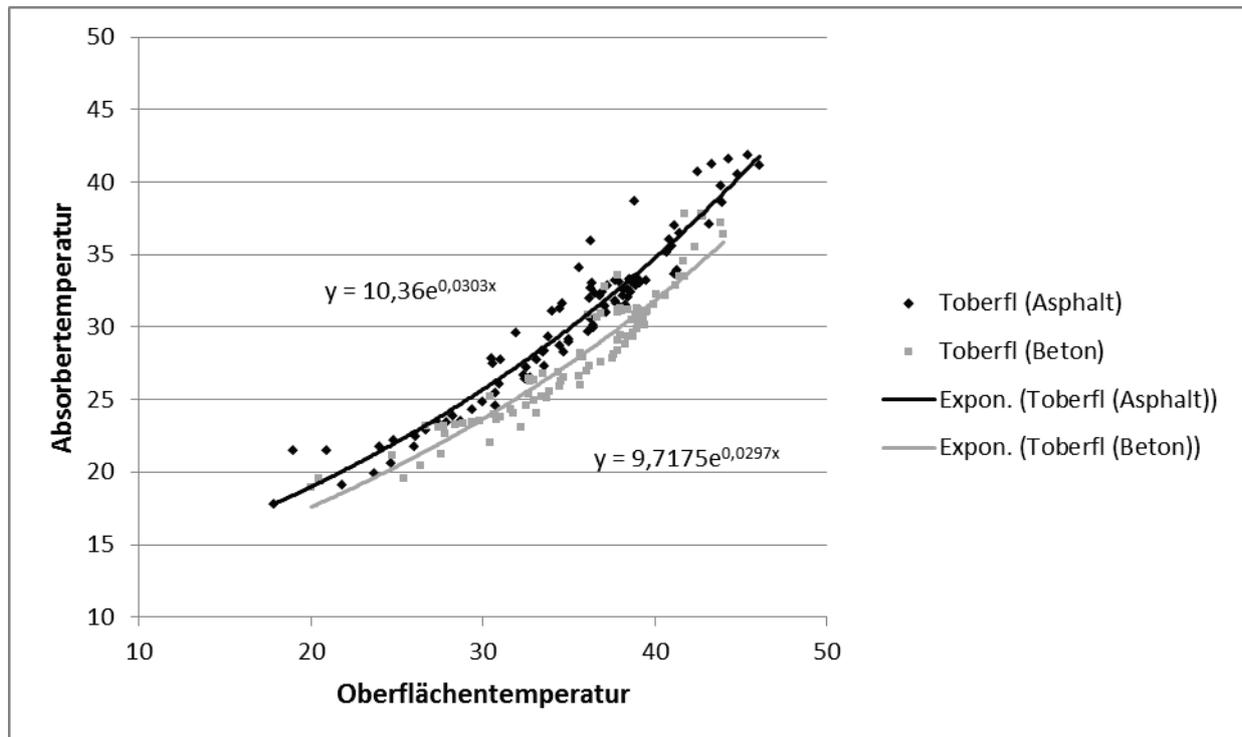


Abbildung 49: messtechnischer Zusammenhang zwischen der Absorber- und der Oberflächentemperatur

Lt. obiger Darstellung ergeben sich folgende exponentielle Zusammenhänge zwischen der Oberflächen- und der Absorbertemperatur:

Formel 8: Berechnung der Kerntemperatur (Absorbertemperatur) auf Basis der Oberflächentemperatur

$$\theta_{(Absorber-Beton)} = 9,7175 * e^{0,0297 * \theta_s}$$

$$\theta_{(Absorber-Asphalt)} = 10,36 * e^{0,0303 * \theta_s}$$

Damit bleibt nur mehr eine Unbekannte übrig, womit die Gleichung iterativ mit der Bedingung $Q_{net} = 0$ pro Zeitschritt (1 h) gelöst werden kann.

Wie aus nachfolgenden Abbildungen ersichtlich wird, stimmen die Ergebnisse des vereinfachten Modells gut mit den gemessenen Werten überein. Bei der Betonfläche ist jedoch aufgrund der größeren Schwankungsbreite der Messwerte (vgl. Abbildung 47) eine höhere Ungenauigkeit als bei der Asphaltfläche festzustellen.

Für die nachfolgende Parameterstudie wird deshalb vorwiegend die Asphaltfläche als Beurteilungsgrundlage herangezogen.

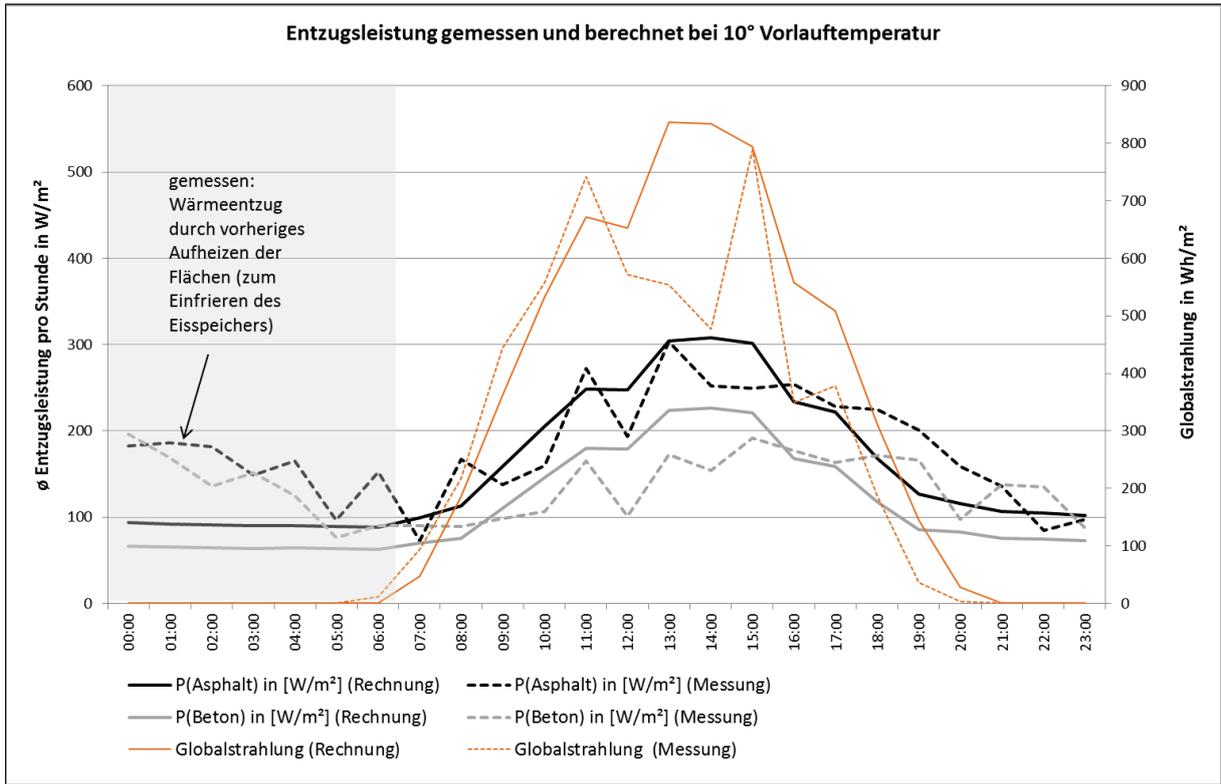


Abbildung 50: Vergleich der gemessenen und berechneten Entzugsleistungen bei 10°C Vorlauftemperatur

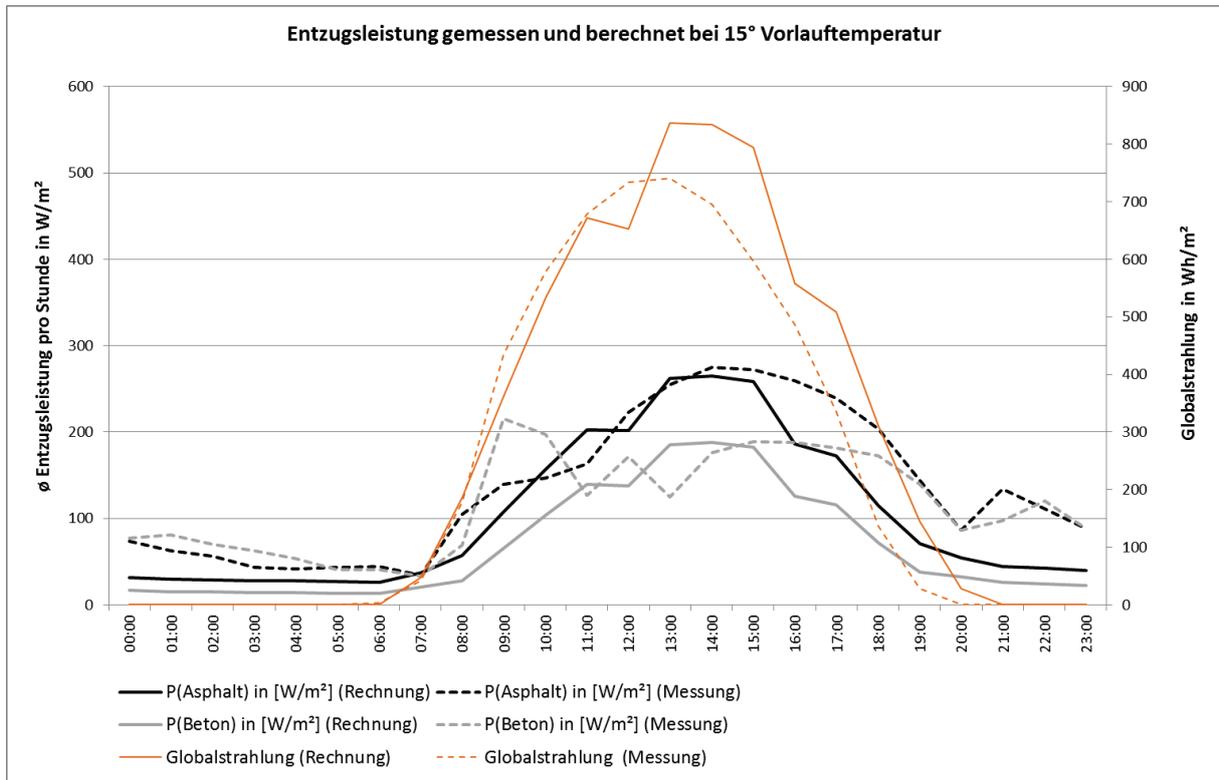


Abbildung 51: Vergleich der gemessenen und berechneten Entzugsleistungen bei 15°C Vorlauftemperatur

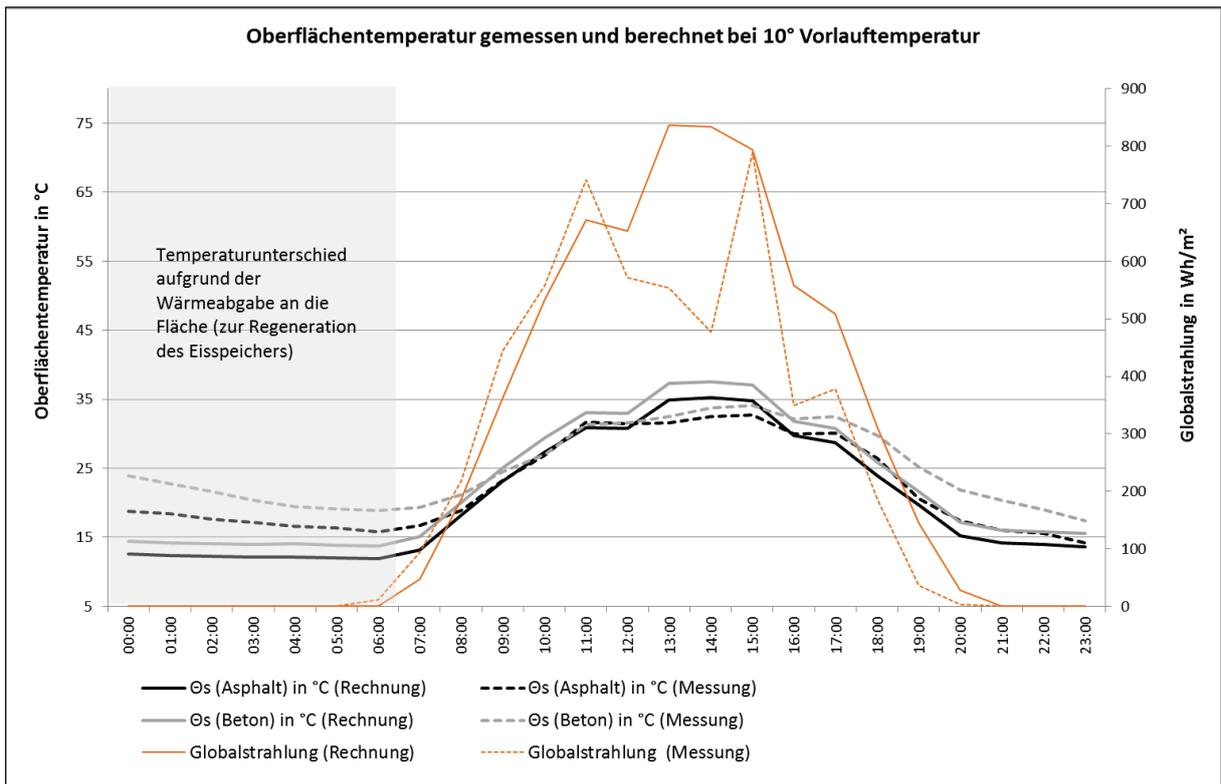


Abbildung 52: Vergleich der gemessenen und berechneten Oberflächentemperatur bei 10°C Vorlauftemperatur

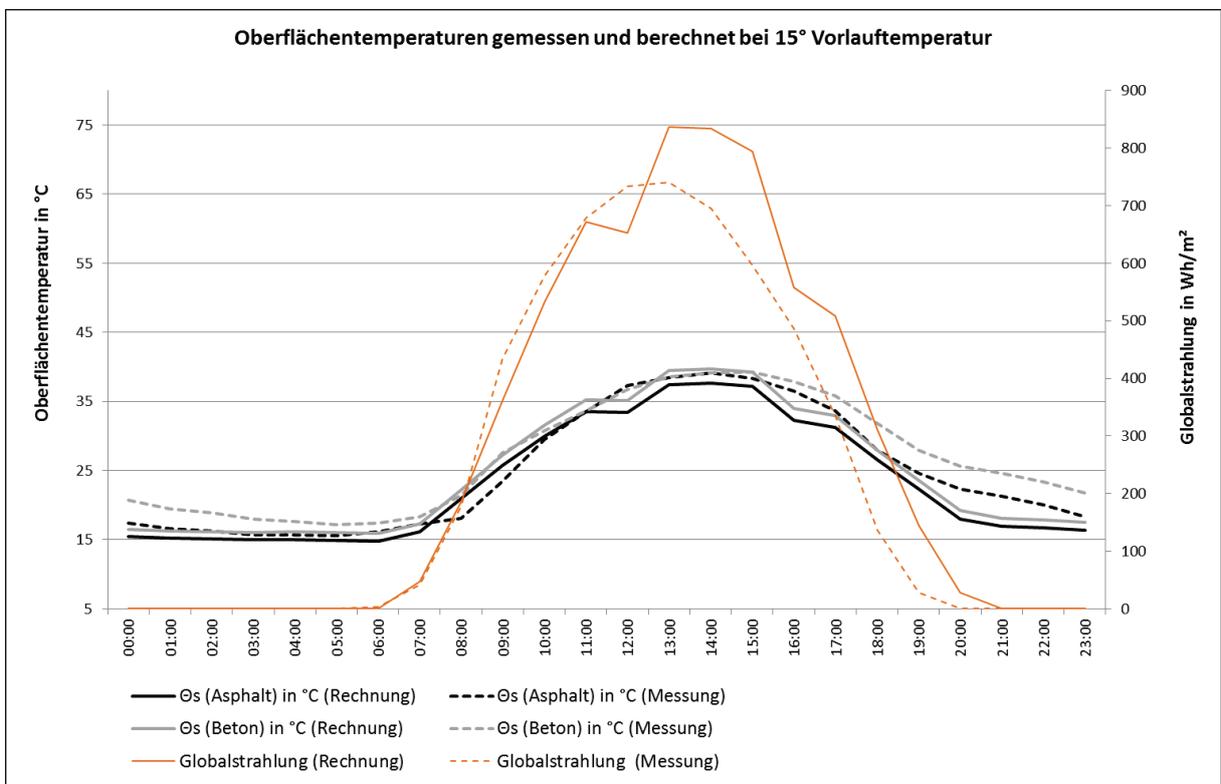


Abbildung 53: Vergleich der gemessenen und berechneten Oberflächentemperatur bei 15°C Vorlauftemperatur

2.6 Parameterstudie auf Basis des Rechenmodells

2.6.1 Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen

Auf Basis des in Kap. 2.5 validierten Rechenmodells werden die Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen auf das Ergebnis untersucht. Die Parameterstudie wird unter folgenden gleichbleibenden Rahmenbedingungen durchgeführt:

- Für die Berechnung der Wärmeentzugsmenge pro Tag werden die Globalstrahlung und die Temperaturwerte für den wärmsten Sommertag des halbsynthetischen Klimadatenmodells²⁶ mit einer Tropennacht ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) am 7. Juli verwendet.
- Die Erdreichtemperatur in 20 cm Tiefe beträgt bei allen Berechnungen 20°C .
- Die Vorlauftemperatur beträgt 10°C .
- Die Windgeschwindigkeit beträgt 5 km/h (leichte Brise lt. Beaufort Skala).

Die Auswirkungen der Maßnahmen werden jeweils einem Vergleichsszenario gegenübergestellt. Der U-Wert sowie die Albedo werden in diesem Vergleichsszenario gemäß Kap. 2.5.3 angenommen.

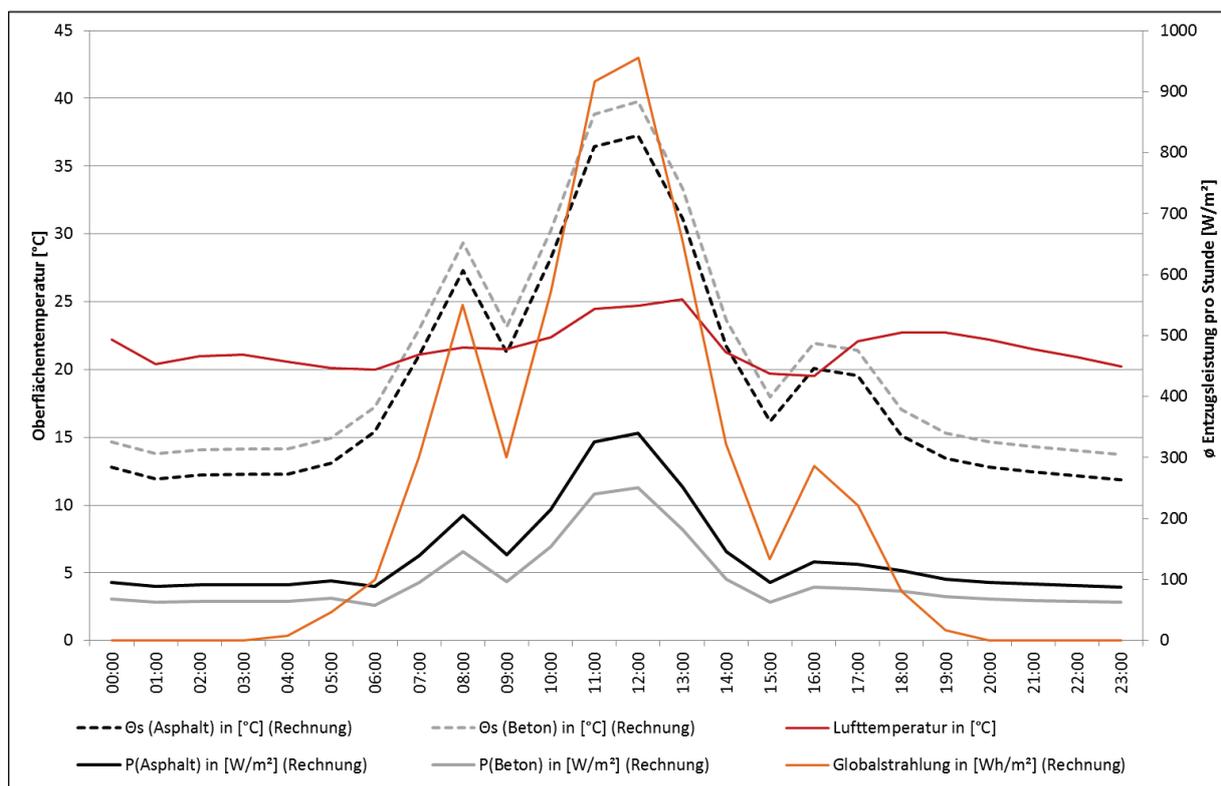


Abbildung 54: Entzugsleistung und Oberflächentemperatur des Vergleichsszenarios in Abhängigkeit der Klimarandbedingungen

²⁶ Halbsynthetischer Klimadatenatz für den Zeitraum von 1980 bis 2010, berechnet und zur Verfügung gestellt durch Dr. Klaus Kreč

Auf Basis dieses Vergleichsszenarios werden die Auswirkungen unterschiedlicher Parameterveränderungen nachfolgend tabellarisch aufgelistet:

Tabelle 2: Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen auf die Temperatur und die Entzugsleistung der Versuchsflächen

Maßnahme	Temperaturerhöhung/ -reduktion der Oberfläche		Erhöhung/Reduktion der max. Entzugsleistung	
	Asphalt	Beton	Asphalt	Beton
Reduktion des Albedos (für Asphalt von 25% auf 10%=frischer Asphalt)	+ 3,8 °C	-	+ 19 %	-
Dämmung der Platte nach unten (mit 10cm XPS)	+ 3,4 °C	+ 5,6 °C	+ 17 %	+ 29 %
geringfügige Erhöhung der Vorlauftemperatur (12,7°C = \varnothing der GW-Temp in Wien (1997-2009))	+ 1,2 °C	+ 0,9 °C	- 7 %	- 9 %

Bei einer frisch asphaltierten Asphaltfläche ist erwartungsgemäß sowohl die Oberflächentemperatur als auch die Entzugsleistung erhöht. Die Albedo des Asphalts gleicht sich jedoch mit den Jahren mehr und mehr an jene von Betonoberflächen durch Bitumenabrieb an. Höhere Entzugsleistungen sind damit nur in den ersten Jahren nach Fertigstellung des Asphalts zu erwarten.

Nicht unwesentlich ist auch der Einfluss des Untergrundaufbaues auf die Oberflächentemperatur und Entzugsleistung der befestigten Flächen. Durch eine Dämmung gegen das Erdreich kann, aufgrund des geringeren Wärmetransportes in den Untergrund, die Entzugsleistung wesentlich erhöht werden. Dies ist insbesondere bei der Betonfläche mit einer höheren Temperaturleitfähigkeit als Asphalt von Bedeutung. Auf der anderen Seite wird durch die Dämmmaßnahme jedoch auch die Oberflächentemperatur maßgeblich erhöht, was zu einer Verschärfung der Hitzeinselproblematik führt.²⁷

Eine Erhöhung der Vorlauftemperatur wirkt sich bereits bei kleinen Temperaturerhöhungen sowohl in Bezug auf die Oberflächentemperatur als auch auf die Entzugsleistung negativ aus, wobei diese Einbußen sowohl ökologisch als auch ökonomisch dem Mehraufwand für die Kühlung der Sole gegenübergestellt werden müssen. Die mittlere Grundwassertemperatur in Wien beträgt beispielsweise 12,7°C²⁸, wobei im Sommer sicher höhere Werte angenommen werden müssen.

2.6.2 Auswirkungen unterschiedlicher Klimarandbedingungen

Wie bereits in Kap. 2.3.2 und Kap. 2.4.2 erläutert, konnte durch die Messungen festgestellt werden, dass sowohl die Oberflächentemperatur als auch die Entzugsleistung durch Verschattungsmaßnahmen maßgeblich reduziert wird. Es konnten

²⁷ Die Veränderung des Untergrundaufbaus führt auch zu einer Veränderung des linearen Zusammenhanges der Temperaturspreizung und der Entzugsleistung und damit der Kollektorgleichung, was mit dem vereinfachten Modell nur bedingt abgebildet werden kann. Bei den hier ermittelten Werten handelt es sich somit nur um Tendenzen und grobe Richtwerte.

²⁸ Schartner/Kralik (2011)

Oberflächentemperaturabsenkungen um ca. 10°C sowie die Abnahme der Entzugsleistung auf ca. die Hälfte festgestellt werden.

Nachfolgend werden auf Basis des vereinfachten Rechenmodells lt. Kap. 2.5 auch die Auswirkungen unterschiedlicher Klimarandbedingungen auf die Entzugsleistung sowie die Oberflächentemperatur untersucht.

Folgende Ereignisse werden dabei im Detail betrachtet:

- Auswirkungen eines hohen Bewölkungsgrades
- Auswirkungen einer reduzierten Außenlufttemperatur
- Auswirkung eines windstillen Tages
- Auswirkung eines stürmischen Tages

Die Klimarandbedingungen eines bewölkten Tages sowie eines Tages mit reduzierter Außenlufttemperatur wurden auf Basis des 28. Juni des halbsynthetischen Klimadatensatzes angenommen.^{29,30} Der Bewölkungsgrad sowie die Reduzierung der Außenlufttemperatur werden dabei auch getrennt voneinander untersucht.

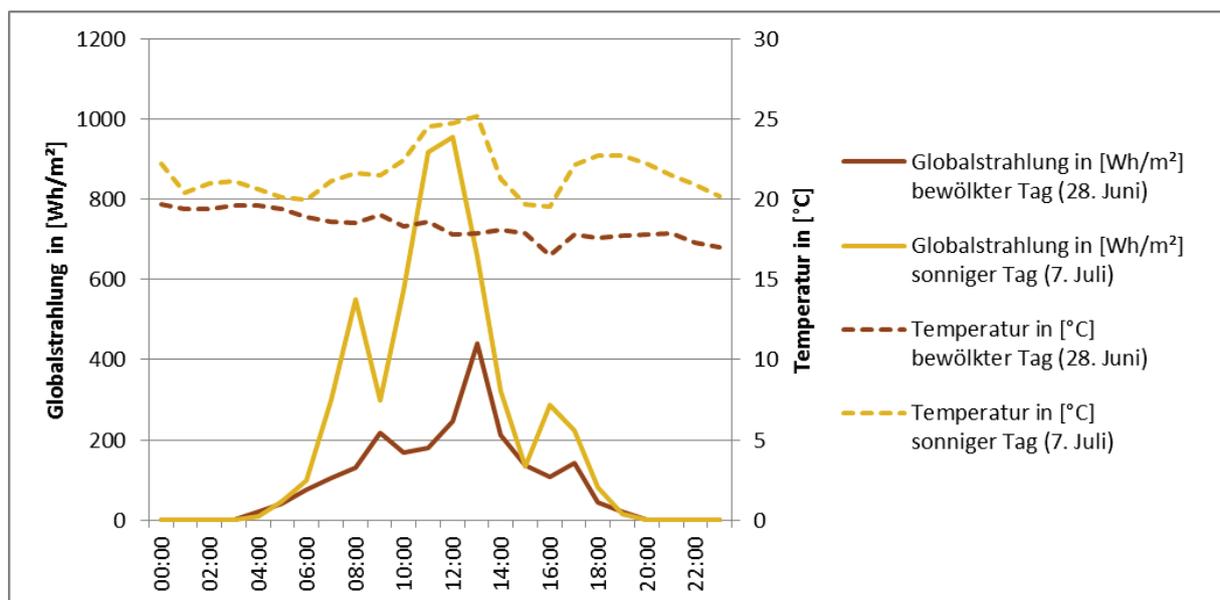


Abbildung 55: Klimarandbedingungen sonniger und bewölkter Tag

Die Ergebnisse der Berechnungen mit unterschiedlichen Klimarandbedingungen werden nachfolgend tabellarisch aufgelistet:

²⁹ Die Auswirkungen auf die langwellige terrestrische Rückstrahlung wurden dabei nicht berücksichtigt.

³⁰ Halbsynthetischer Klimadatensatz für den Zeitraum von 1980 bis 2010, berechnet und zur Verfügung gestellt durch Dr. Klaus Kreč

Tabelle 3: Entzugsleistungen und Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit der Klimarandbedingungen

Entzugsleistung/Wärmeentzug und Oberflächentemperatur in Abhängigkeit der Klimarandbedingungen	maximale Oberflächentemperatur in [°C]		maximale Entzugsleistung in [W/m ²]		Wärmeentzug in [kWh/m ²] zwischen 10:00 und 16:00	
	Asphalt	Beton	Asphalt	Beton	Asphalt	Beton
Vergleichsszenario (5 km/h, sonniger Sommertag)	37,3 °C	39,8 °C	339 W/m ²	251 W/m ²	1,5 kWh/m ²	1,1 kWh/m ²
Windgeschwindigkeit (45 km/h - starker Wind)	33,2 °C	34,8 °C	281 W/m ²	197 W/m ²	1,4 kWh/m ²	0,9 kWh/m ²
Reduktion der Windgeschwindigkeit (0,5 km/h - Windstille)	39,5 °C	42,6 °C	376 W/m ²	286 W/m ²	1,6 kWh/m ²	1,2 kWh/m ²
Bewölkung	26,2 °C	28,2 °C	192 W/m ²	136 W/m ²	0,9 kWh/m ²	0,6 kWh/m ²
Reduzierung der Außenlufttemperatur	34,9 °C	37,2 °C	303 W/m ²	222 W/m ²	1,4 kWh/m ²	1,0 kWh/m ²
Bewölkung + Reduzierung der Außenlufttemperatur	23,2 °C	25,1 °C	160 W/m ²	111 W/m ²	0,7 kWh/m ²	0,5 kWh/m ²

Bei starkem Wind ist eine Oberflächentemperaturabsenkung um ca. 5°C feststellbar, was sich zwar einerseits in den maximalen Entzugsleistungen niederschlägt, andererseits den Wärmeentzug in dem Zeitraum der höchsten solaren Strahlung aber nur unwesentlich abschwächt. Analoges kann in die umgekehrte Richtung bei einer Reduzierung der Windgeschwindigkeit festgestellt werden.

Eine Bewölkung wirkt sich, ähnlich wie bei einem Solarkollektor, ganz wesentlich auf die Entzugsleistung und die zu entnehmende Wärmemenge aus. Ähnlich den gemessenen Werten durch die Verschattung sind hier auch rechnerisch Einbußen von ca. 50% beim Beton und 40% beim Asphalt zu verzeichnen. Auch die Oberflächentemperaturen reduzieren sich an einem bewölkten Tag wesentlich um mehr als 10°C. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich wird, hängt die Oberflächentemperatur auch zu einem gewissen Teil von der Außenlufttemperatur ab, während die zu entziehende Wärmemenge, wie bei einem Solarkollektor, maßgeblich von der Solarstrahlung und nur in einem sehr geringen Ausmaß von der Außenlufttemperatur abhängt.

2.7 Potential der Energiespeicherung

2.7.1 Eisspeicher

2.7.1.1 Stand der Technik Eisspeicher

Eisspeicher sind Latentspeicher, die Kälteenergie in Form von Eis beim Phasenübergang von Wasser auf Eis speichern. Diese Kälteenergie kann beim Schmelzen zu fast 100 % wieder an den Wärmeüberträger abgegeben werden.³¹

In der Gebäudetechnik werden Eisspeicher vorwiegend in Kombination mit Wärmepumpen und Solar- bzw. Solar-/Luftkollektoren zum Heizen oder Kühlen eingesetzt. Dabei kommen Eisspeichersysteme in der Regel als eine Kombination aus wassergefülltem Niedertemperatur-Latentspeicher (Betontank/Zisterne), in welchem Wasser gefriert und bei konstanter Temperatur weiter Energie entzogen werden kann, Wärmepumpe und Solar/Luftkollektoren zum Einsatz. Die nachfolgende Abbildung 56 stellt schematisch die Komponentenwahl und die Energieströme einer Eisspeicher-Solar-Wärmepumpen Kombination dar.

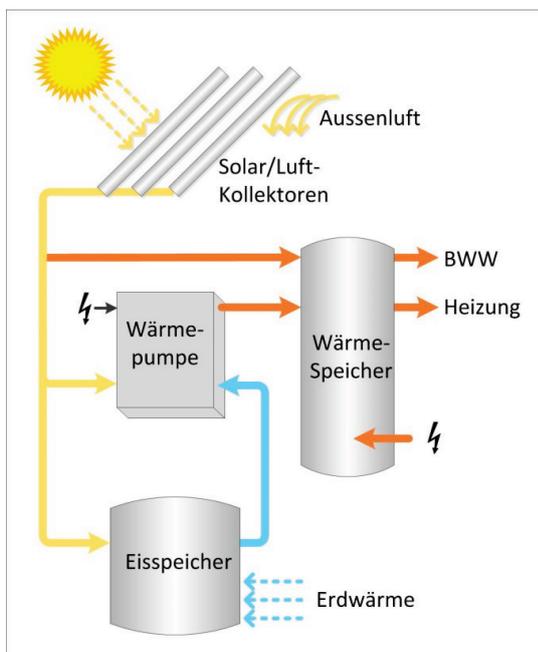


Abbildung 56: schematische Darstellung der Energieströme, Wärmequellen und Komponenten einer Eisspeicher-Solar-Wärmepumpen Kombination³²

³¹ Recknagel/Sprenger/Schramek (2013/14), S.1714f

³² Bundesamt für Energie Schweiz (2014)

Bei den derzeit am Markt üblichen Eisspeicherkomplettpaketen unterscheidet man zwischen drei unterschiedlichen Systemen:

1. Direktverdampfersysteme
2. Eisspeicher mit wassergefüllten Kunststoffkugeln
3. Eisspeicher mit spiralförmig angeordneten Wärmetauscherrohren

zu 1) Direktverdampfersystem

Der Verdampfer der Wärmepumpe/Kältemaschine wird direkt in den Eisspeicher geführt. Durch Einblasen von Luft am Tankboden oder durch Umwälzung wird sichergestellt, dass das Eiswachstum an der Wärmetauschoberfläche gleichmäßig erfolgt.

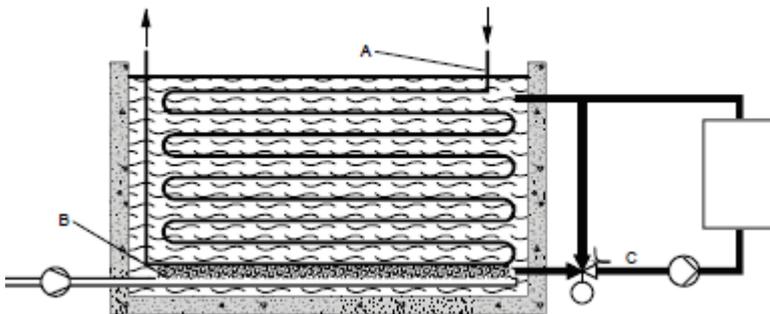


Abbildung 57: A - Direktverdampfer mit Kältemittel, B - Lufteinperlung, C - Kühlwasserkreis, ©Siemens AG³³

zu 2) Eisspeicher mit wassergefüllten Kunststoffkugeln

Der Eisspeicher ist in einen Solekreislauf eingebunden, welcher durch einen Verdampfer gekühlt wird. Der Speichertank enthält elastische, wassergefüllte Kunststoffkugeln (Volumenanteil 50%-70% im Tank), die die Ausdehnung beim Frieren ohne Beschädigung aufnehmen können.

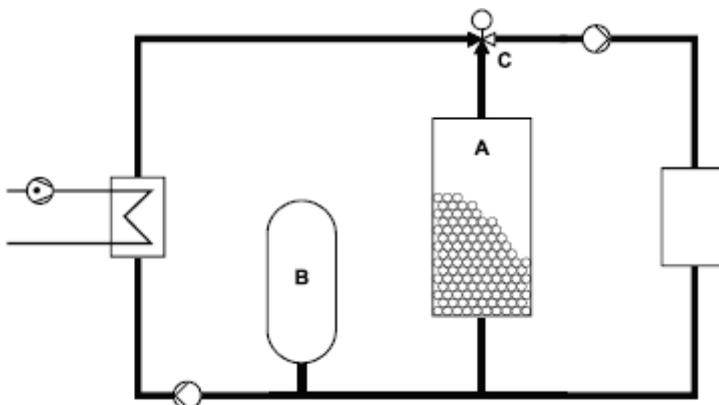


Abbildung 58: A - Eisspeicher, B - Ausdehnungsgefäß, C - Umstellventil, ©Siemens AG³³

³³ Siemens AG-Building (2017)

zu 3) Eisspeicher mit spiralförmig angeordneten Wärmetauscherrohren

Dabei handelt es sich um die heute weit verbreitetste Form von Eisspeichern, wobei die Wärmetauscherrohre von einem Wasser-Glykol-Gemisch (Sole) durchströmt werden.

Die Wärmetauscherrohre sind spiralförmig aufgewickelt und in Ebenen übereinander angeordnet. Sie durchdringen im Eisspeichertank nahezu das gesamte Volumen, womit eine möglichst große Wärmeübergabefläche geschaffen wird.

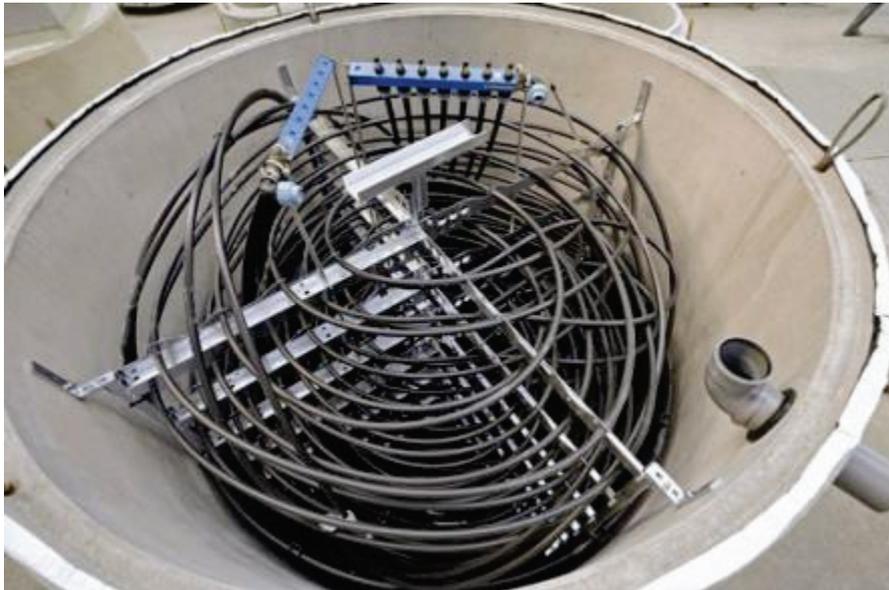


Abbildung 59: Zisterne Eisspeicher mit spiralförmig angeordneten Wärmetauscherrohren³⁴

Am Beispiel von Eisspeichern mit spiralförmig angeordneten Wärmetauscherrohren erfolgt der Energieentzug über ein mit Sole gefülltes Rohrsystem, welches den Speicher fast vollständig durchdringt. Dabei erfolgt die Be- und Entladung des Eisspeichers über einen jeweils eigenen innenliegenden Wärmetauscher. Bei Erreichen von 0 °C und weiterem Wärmeentzug beginnt die Wärmetauscheroberfläche zu gefrieren. Die freiwerdende Kristallisationswärme, wenn sich der Aggregatzustand von flüssig nach fest ändert, kann mit Unterstützung einer Wärmepumpe genutzt werden.

Die elektrisch betriebene Wärmepumpe hebt dabei die nullgrädige (bzw. auch darunterliegende) Rücklauftemperatur aus dem Eisspeicher auf ein definiertes Temperaturniveau an. Wärmepumpen sind dahingehend hinsichtlich ihrer Effizienz an bestimmten Prüfpunkten geprüft. Am Beispiel eines Eisspeichers ist ein typischer Prüfpunkt B0/W35, B=brine (englisch für Sole) bei 0 °C Rücklauftemperatur und W=water (englisch für Wasser) bei 35 °C am Austritt aus der Wärmepumpe (Heizwasser-Vorlauftemperatur). Daraus kann bei konstanten Betriebsbedingungen die Leistungszahl (COP - coefficient of performance) einer Wärmepumpe bestimmt werden. Diese gibt das Verhältnis der

³⁴ <http://www.udoboing.de/erneuerbare-energie/eisspeicher-viessmann>

abgegebenen, nutzbaren Wärmeleistung bezogen auf die eingesetzte elektrische Leistung an. Der COP liegt bei klassischen Sole-Wasser-Wärmepumpen am Prüfpunkt B0/W35 bei 4,6³⁵.

Durch geringe/kleine Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf können dadurch große Mengen an Energie entzogen bzw. im umgekehrten Fall eingespeichert werden. Im Fall von Eisspeichern findet der Phasenwechsel bei 0 °C statt. Dabei wird im Vergleich dieselbe Menge an Wärme benötigt wie 1 kg Wasser bei gleichbleibender Temperatur zu schmelzen und 1 kg Wasser von 0 °C auf 80 °C zu erwärmen. Die Schmelzenthalpie ist jene Energiemenge, die benötigt wird, um eine Stoffprobe an ihrem Schmelzpunkt bei konstantem Druck zu schmelzen, beträgt bei Wasser 335 kJ/kg (93 Wh/kg), siehe Abbildung 60.

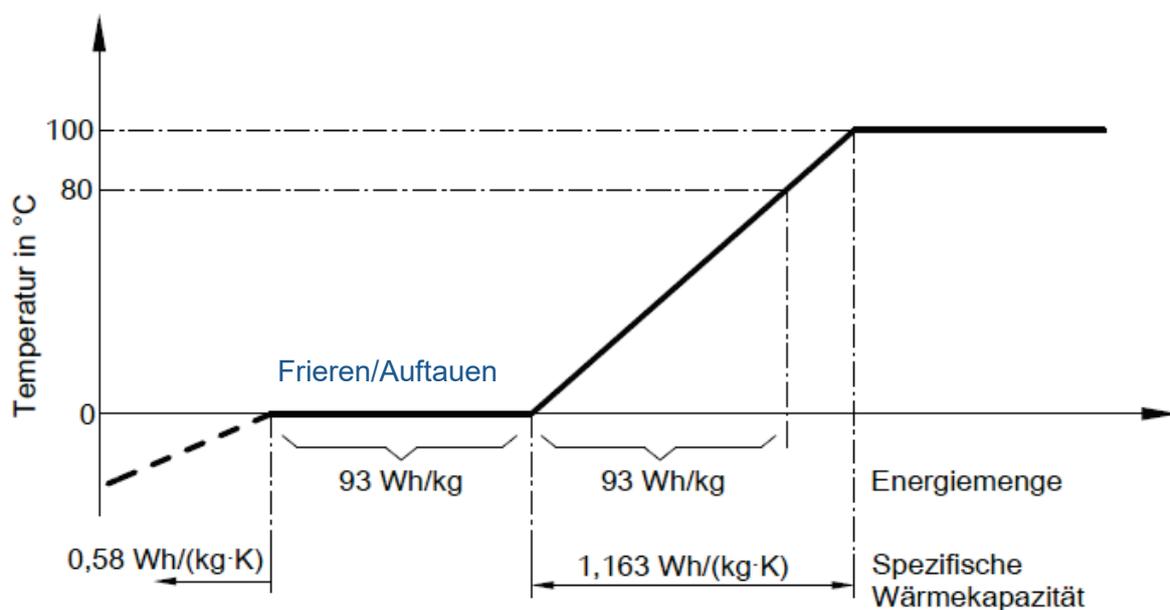


Abbildung 60: Phasenwechsel im Eisspeicher - Arbeitsbereich eines Eisspeichers in einer Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlage, ©Viessmann³⁶

Weiters kommen Eisspeicher auch als sensible Wärmespeicher in Temperaturbereichen über 0 °C zum Einsatz, wobei der Speicher weiter durch Regenerationsprozesse (siehe 0) bis zu einem vom Wärmepumpensystem nutzbaren Temperaturmaximum, typischerweise 25°C, aufgeheizt wird.³⁷ Die gewonnene Energiemenge von 0 °C bis 25 °C entspricht dabei nur ca. einem Drittel der Energiemenge, welche beim Phasenübergang als Kristallisationsenergie frei wird (vgl. dazu Kap. 2.7.1.2).

Eisspeicher zählen wie Erdspeicher, Warm-/Kaltwasserspeicher zu den thermischen Speichern, wobei diese jedoch im Gegenzug ohne Wärmedämmung des Wassertanks ausgeführt werden, um die passive Regeneration durch den umgebenden Erdkörper zu nutzen (vgl. Kap. 0). Im Gegensatz zum Erdspeicher, wo im Vergleich große Wärmemengen eingespeichert werden können und die Langzeitspeicherung über mehrere Monate im Fokus

³⁵Medianwert aus www.produktdatenbank-get.at, abgerufen am 19.07.2017 bzw.

https://www.energieaktiv.at/download/index/mediafile/583/richtlinien_w_rmpumpen_30_11_2016.pdf

³⁶ Viessmann Werke GmbH & Co KG 82014)

³⁷ Bundesamt für Energie Schweiz (2014)

liegt, handelt es sich beim Eisspeichern eher um Kurzzeitspeicher (wenige Stunden bis Wochen). Dabei wird im Bedarfsfall die beim Phasenwechsel gewonnene Kristallisationswärme sofort für unterschiedliche Prozesse genutzt. Bei der Auslegung zur Gebäudeheizung/-kühlung über eine definierte Periode (Heiz- bzw. Kühlperiode) ist jedenfalls die Speichergröße, aus welcher die Speicherkapazität resultiert, dementsprechend zu dimensionieren.



Abbildung 61: links - Eisspeicher Neustudenpark, Amriswil Einbau, rechts - Detailaufnahme Innen mit Wärmetauscherrohren³⁸

Je nach Wärme-/Kältebedarf werden Eisspeicher entweder als Komplettsystem oder individuell geplantes System dimensioniert. Bei dem derzeit in der Schweiz³⁹ größten Eisspeicher von ca. 1000 m³ Fassungsvermögen (siehe Abbildung 61), welcher als Wärme- und Kältequelle für fünf mehrgeschossige Gebäude mit insgesamt 67 Wohneinheiten fungiert, entschied man sich für einen großen Speicher anstelle von mehreren kleinen Einheiten. Der Eisspeicher ist 3,3 m hoch und hat eine Grundfläche von 19 x 22 m und wurde unter der Geländeoberkante zwischen zwei der Wohnbauten situiert. Die Eisspeicherregeneration erfolgt über, auf den Gebäudedächern errichtete, Solar-Luft-Absorber. Im Vorfeld wurden unterschiedliche Eisspeichervarianten simuliert, um die vielversprechendste Variante herauszufiltern.

Bei dem im Zuge des Projekts InnoGOK verwendeten Eisspeicher-System Vitofriocal handelt es sich um einen Eisspeicher mit spiralförmig angeordneten Wärmetauscherrohren der Firma Viessmann in Kombination mit einer Wärmepumpe und einer im Erdreich situierten Zisterne aus Beton (siehe Abbildung 59). Der Außendurchmesser des Speichers beträgt 2,7 m und die Höhe mit Schachtabdeckung 3,375 m. Die Regeneration erfolgt über einen Solar-Luftabsorber mit einer Wärmetauscheroberfläche von 9,1 m².

³⁸ <http://www.myneustudenpark.ch> [abgerufen 18.07.2017]

³⁹ Jürg Wellstein, HK-Gebäudetechnik: Neustudenpark Amriswil TG: Wohnüberbauung mit großem Eisspeicher und Wärmepumpen, 04/2016

2.7.1.2 Speicherkapazität eines Eisspeichers

Auf Basis der Stoffkenngrößen kann die Speicherkapazität näherungsweise abgeschätzt werden, ohne weiter auf die Verluste an das angrenzende Erdreich bzw. an die Außenluft einzugehen.

Die Speicherdichte bzw. Speicherkapazität kann dabei anhand folgender Kenngrößen ermittelt werden.

- c ...Schmelzwärme von Wasser in [KJ/kg]
- ρ ...Rohdichte des Speichermediums in [kg/m³]
- V ...Volumen des mit Rohrleitungen versehenen Eisspeichers in [m³]

Die Eisspeicherkapazität ergibt sich aus der Schmelzwärme von Wasser mit 332 KJ/kg und der Dichte von Eis mit 916 kg/m³.⁴⁰

Formel 9: Berechnung der theoretischen Speicherdichte eines Eisspeichers beim Phasenwechsel

$$\text{Speicherdichte } q_{\text{theor}} = \rho \cdot c = \frac{916 \times 332}{3600} = 84,4 \text{ kWh/m}^3$$

Da für die Anordnung der Wärmetauscherrohre, um ein vollständiges durchfrieren im Speicher zu vermeiden, jedoch Platz verloren geht, werden in der Praxis nur Werte zwischen $q = 40 \dots 60 \text{ kWh/m}^3$ erreicht.⁴¹

Da es sich um einen Latentspeicher handelt, steht diese Speicherdichte mit der konstanten Schmelztemperatur von 0 °C zur Verfügung. Durch die Aufschmelzung des Eisvolumens und der Wassererwärmung steht zusätzlich Speicherkapazität zu Verfügung, analog eines Kaltwasserspeichers ohne Eisbildung (sensibler Speicher).

Kaltwasserspeicher kommen meist als Spitzenlastspeicher für einen kurzen Zeitraum (wenige Stunden) zum Einsatz. Die Speicherkapazität bzw. nutzbare Energiemenge richtet sich dabei nach dem Temperaturniveau (z.B. 6-12 °C) im Speicher bzw. der Temperaturdifferenz Δt zwischen Vor- und Rücklauf.

Dabei ergibt sich aus der spezifischen Wärmekapazität des Wassers mit $c = 4,18 \text{ KJ/kgK}$, der Speichergröße 1 m³ ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) und der Temperaturdifferenz Δt eine Speicherdichte von

Formel 10: Berechnung der Speicherdichte eines Kaltwasserspeichers in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

$$\text{Speicherdichte } q = \rho \cdot c \cdot \Delta t = \frac{1000 \times 4,18 \times 1}{3600} = 1,16 \text{ kWh/m}^3\text{K}$$

⁴⁰ Umrechnung 1kWh = 3600J

⁴¹ Recknagel/Sprenger/Schramek (2013/14)

Durch den Einsatz von Sole statt Wasser kann der Gefrierpunkt auf ein niedrigeres Temperaturniveau verschoben und somit die nutzbare Temperaturdifferenz vergrößert werden. Dennoch liegt im direkten Vergleich zu Eisspeichern eine eher geringe Speicherkapazität vor (vgl. dazu Speicherdichte Eisspeicher q_{theor} , ca. 80-fach höher).

2.7.1.3 Phasenverschiebung Eisspeicher (Be- und Entladung)

Die Be- und Entladung eines Eisspeichers erfolgt über Rohrregister/-leitungen, welche als Wärmetauscherfläche innerhalb eines Fluids, meist Wasser, fungieren. Die Rohrleitungen sind dabei mit einem frostsicheren Wasser-Glykol-Gemisch befüllt. Mittels Wärmepumpe wird dem Wasser im Speicher Wärme entzogen bis es auf $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgekühlt ist und zu gefrieren beginnt. Beim Frieren wird latente Wärme frei, wobei die Eisspeichertemperatur nicht weiter sinkt. Infolgedessen wird die Eisschicht an der Rohrleitungsoberfläche dicker, was wiederum den Wärmeübergang negativ beeinflusst und den COP der Wärmepumpe sinken lässt, bis keine Energie mehr entzogen werden kann. Da zwar bei weiterem Energieentzug die Wärmeträgertemperatur (Soletemperatur) unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ absinken muss, bleibt die Eisspeichertemperatur konstant. Daraus resultiert eine größere Temperaturdifferenz zwischen Rücklauftemperatur und Heizwasservorlauftemperatur und führt am Betriebspunkt zu einer Verringerung des COP. Die nachfolgende Abbildung 62 zeigt auf, in welcher Abhängigkeit vom Material des Wärmetauschers und Dicke der Eisschicht der Wärmedurchgangskoeffizient abnimmt.

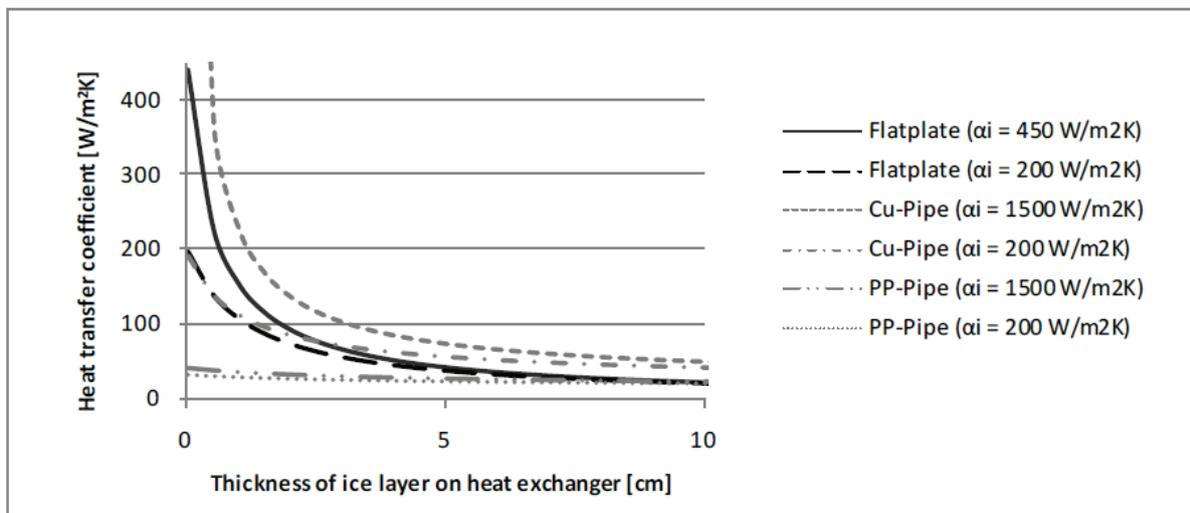


Abbildung 62: Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit der Dicke der Eisschicht des Wärmetauschermaterials und dem konvektivem Wärmeübergangskoeffizienten⁴²

Polyethylenrohre haben im Vergleich zu Kupferrohren bzw. Plattenwärmetauschern einen hohen Wärmeübergangswiderstand zwischen Fluid und Wasser. Durch Erhöhung der vorhandenen Wärmetauscherfläche und damit geringerer Dicke des Eismantels an den Wärmetauscherrohren, lässt sich dieser Nachteil minimieren.

⁴² Bundesamt für Energie Schweiz (2014)

Die zur Be- und Entladung erforderlichen Rohrleitungen sind in ausreichendem Abstand zur Betonaußenschale und zueinander anzuordnen. Zum einen, um durch die Volumenzunahme bei Eisbildung keine Beschädigung am Betonmantel zu bewirken, zum anderen um eine gleichmäßige Eisbildung an den Wärmetauscherflächen zu erzielen, da bei zu rascher Durchfrierung/Eisbildung der Wärmeübergangswiderstand ansteigt.

Eisspeicher Regeneration (Beladung)

Die Beladung des Eisspeichers geschieht in erster Linie durch zwei Prozesse:

- Aktive Beladung/Regeneration durch Wärmeenergie aus Solarthermie/Solar-Luftabsorber/Abwärmeprozesse
- Passive Beladung/Regeneration durch Wärmeaustausch mit dem angrenzenden Erdreich

Die aktive Beladung (Auftauprozess) des Eisspeichers geschieht während der Sommermonate durch Solarthermie bzw. Solar-Luftabsorber, wobei diese auch während der kalten Jahreszeit in geringerem Umfang genutzt werden können, solange jedenfalls die Kollektorrücklauftemperatur über der des Eisspeichers liegt. Bei Solar-Luftabsorbern handelt es sich im Gegensatz zu herkömmlichen solegefüllten Solarkollektoren um unverglaste, selektiv beschichtete Kollektoren. Diese bieten den Vorteil, dass Luft aufgrund der ca. 4-fach geringeren spezifischen Wärmekapazität im Vergleich zu Wasser, schon geringere Wärmeeinträge durch Solarstrahlung aufnehmen zu können und deshalb reaktionsschneller sind als Wasserkollektoren. Obwohl solegefüllte, verglaste Kollektoren einen höheren Wirkungsgrad erzielen, können die im Prinzip technisch einfacheren Solar-Luft-Kollektoren, aufgrund des dennoch guten Wirkungsgrades (vgl. Abbildung 63)⁴³ und des niedrigen im Eisspeicher angestrebten Temperaturniveaus zum Einsatz gebracht werden. Zusätzlich kann bei unverglasten Kollektoren auch die Umgebungswärme konvektiv und bei Kollektortemperaturen unter der Außenlufttemperatur die Kondensation auf der Oberfläche (während der Nachstunden) als Kondensationswärme genutzt werden.

⁴³ Bundesamt für Energie Schweiz (2014)

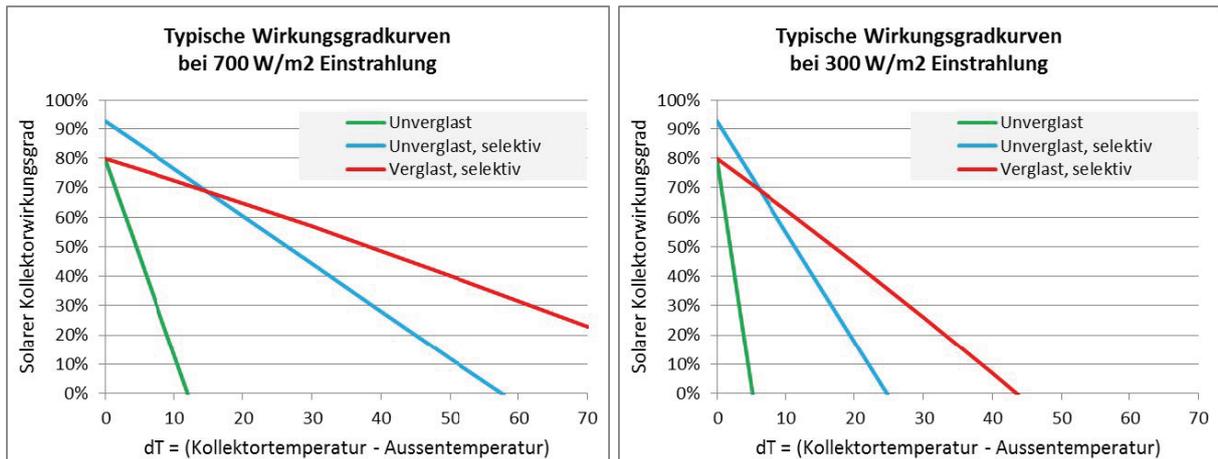


Abbildung 63: typische Wirkungsgradkurven von Solarkollektoren bei 700 und 300 W/m² solarer Einstrahlung⁴³

Weiters kann auch Abwärme aus der Klimatisierung von Gebäuden zur Regeneration des Speichers dienen.

Im Falle der passiven Regeneration erfolgt dieser Prozess laufend über das ganze Jahr, solange die angrenzende Erdreichtemperatur, aufgrund von passivem Wärmeentzug durch den Speicher, nicht unterhalb von 0 °C zu liegen kommt. Die Bodenbeschaffenheit hat dabei aufgrund unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit (siehe Tabelle 4) des umliegenden Erdreichs einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe des passiven Energieeintrags in den Speicher. Ersichtlich wird anhand Tabelle 4, dass die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Feuchtegehalt zunimmt (vgl. dazu Sand trocken und Sand wassergesättigt). Der daraus resultierende passive Wärmeeintrag in den Erdspeicher ist dadurch größer, aufgrund der höheren spezifischen Wärmekapazität, als bei Böden mit geringerer Wassersättigung.

Tabelle 4: thermische Eigenschaften von Bodensubstraten (verändert nach VDI 4640)

Lockergesteine	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit (typischer Rechenwert) [W/mK]	Vol. Wärmekapazität [MJ/m ³ K]
Kies, trocken	0,4 - 0,5	0,4	1,4 - 1,6
Kies, wassergesättigt	Ca. 1,8	1,8	ca. 2,4
Moräne	1,0 - 2,5	2,0	1,5 - 2,5
Sand, trocken	0,3 - 0,8	0,4	1,3 - 1,6
Sand, wassergesättigt	1,7 - 5,0	2,4	2,2 - 2,9
Ton/Schluff, trocken	0,4 - 1,0	0,5	1,5 - 1,6
Ton/Schluff, wassergesättigt	0,9 - 2,3	1,7	1,6 - 3,4
Torf	0,2 - 0,7	0,4	0,5 - 3,8

Ziel der Varianten ist es, möglichst lange Wärmeenergie aus dem Eisspeicher zu entziehen, um den Betrieb möglichst lange aufrecht zu erhalten und den COP der Wärmepumpe während der Heizperiode hoch zu halten. Vor allem bei großen Eisspeichern, wie dem zuvor genannten in Amriswil, ist es notwendig, während der Sommermonate den Eisspeicher vollständig zu regenerieren, um in der nächsten Heizperiode die benötigten Energiemengen wieder bereitzustellen.

Eisspeicher Wärmentzug (Entladung)

Die Entladephase beginnt im Regelfall mit Eintreten der Heizsaison und erfolgt in umgekehrter Richtung zur Regeneration des Speichersystems. Im Idealfall ist nach den Sommermonaten der Eisspeicher gänzlich eisfrei, um so das Potential bestmöglich für den Wärmeentzug zu nutzen.

Grundsätzlich gilt es, die Entladezyklen in der Heizsaison zu optimieren, um ein geregeltes, homogenes Einfrieren der Rohoberflächen zu gewährleisten. Das zu rasche Durchfrieren würde, wie schon in Kapitel 2.7.1.3 erwähnt, den Wärmeübergangswiderstand erhöhen bzw. den COP der Wärmepumpe verschlechtern. Daraus resultiert ein gesteigerter Strombedarf für die Bereitstellung von Wärmeenergie. Durch eine optimierte Regelung, angepasst an den Jahresverlauf der Außentemperatur, kann der Wärmeentzug weitestgehend optimiert werden.

2.7.2 Erdspeicher

2.7.2.1 Stand der Technik Erdspeicher

Erdspeicher zählen wie Eisspeicher zu den thermischen Speichern und bieten die Möglichkeit Wärmemengen aus verschiedensten (Abwärme-)Quellen zwischen zu speichern (multivalenter Speicher). Die Einbringung dieser, meist im Betrachtungszeitpunkt überschüssigen Wärmemengen, erfolgt zum Zweck der Nutzung zu einem späteren Zeitpunkt. In Abhängigkeit der Speichergröße und des darin vorwiegend angestrebten Temperaturniveaus (10 bis 60 °C)⁴⁴ kann die Zeitspanne zwischen Beladung (Erwärmung) und Entladung (Abkühlung) sehr unterschiedlich ausfallen.

Bei Erdspeichern steht in erster Linie die saisonale Langzeitspeicherung (mehrere Wochen bis Monate) von thermischer Energie im Vordergrund, im Gegensatz zur Kurzzeitspeicherung (Stunden bis Tage). Mit größer werdender Zeitspanne nimmt das ursprünglich eingebrachte und in der Regel über der Erdoberflächentemperatur liegende Temperaturniveau bei ungünstigem Oberflächen-Volumen-Verhältnis deutlich ab (= Speicherverluste), wie das auch bei herkömmlichen Wasserspeichern der Fall ist. Die Be- und Entladeprinzipien via Wärmetauschereinrichtung sind jedoch grundsätzlich identisch. Auch eine Schichtung bzw. unterschiedliche Temperaturniveaus sind bei entsprechender Speicheranordnung und hydraulischen Verschaltung möglich.

⁴⁴ Abschlussbericht der Speicherinitiative – Startphase. Klima- und Energiefonds. Wien (2016).

Große Erdsondenfelder zur Speicherung von Wärme, meist in Verbindung mit Wärmepumpen und/oder Sonnenkollektoren, sind in Pilotprojekten bereits umgesetzt und vermessen worden. Die Speicherkapazität liegt bei 10 bis 20 MWh bei 100 Metern Tiefe und 10 Grad Temperaturdifferenz von Ein- und Ausspeisung. Erdsondenfelder speichern Temperaturen von 10 bis 60° C, bei einer Selbstentladung von unter 10 % pro Woche. Die Investitionskosten liegen unter 1.300 €/m³ Speichervolumen. Bei dieser Speichertechnologie wird mit einer hohen Lebensdauer von bis zu 50 Jahren gerechnet.

Neben Erdspeicher gibt es noch andere saisonale Wärmespeicher auf thermischer Basis wie Aquifer- oder Behälterwärmespeicher⁴⁵, die hier jedoch nicht Betrachtung finden. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Wärmespeichertechnologien samt Bewertung wichtiger Kenngrößen. Erdsondenspeicher weisen eine verhältnismäßig lange Speicherdauer bei zwar niedrigen spezifischen Kapazitäten auf, die jedoch durch weitere Sonden meist einfach kompensiert werden können.

Tabelle 5: Bewertung der unterschiedlichen Wärmespeichertechnologien durch die IEA/ OECD-Expertengruppe „Thermal Energy Storage“⁴⁶

	Kapazität [kWh/t]	Effizienz [%]	Speicher- dauer	Wärmekosten [€/MWh]
Heißwasser-Speicher	20 - 80	50 - 90	Tag - Jahr	8 - 10
Kaltwasser-Speicher	10 - 20	70 - 90	Stunde - Woche	8 - 10
Aquifer-Wärmespeicher	5 - 10	50 - 90	Monate	5 - 60
Erdsonden-Wärmespeicher	5 - 30	50 - 90	Monate	10 - 140
Phasenwechsel-Materialien	50 - 150	75 - 90	Stunde - Woche	1.000 - 5.000
Eis-Speicher	100	80 - 90	Stunde - Woche	500 - 1.500
Thermochemischer Wärmespeicher	120 - 150	75 - 100	Stunde - Tag	800 - 1.400

⁴⁵ <http://www.saisonalspeicher.de/Speichertypen/Übersicht/tabid/107/Default.aspx>

⁴⁶ IEA/ OECD Expertengruppe „Thermal Energy Storage“ (2006) mit Ergänzungen durch Solites (2012)

Die Einbringung eines bestimmten Temperaturniveaus erfolgt durch Rohrleitungen, die bei Frostgefährdung mit Sole (z.B. Wasser-Glykol-Mischung) gefüllt sind. Die Lage und Ausrichtung der Rohre geht dabei einher mit der Art des Erdspeichers. Folgende Bauweisen sind hauptsächlich zu unterscheiden:

- Flach-/Aushub-/Erdbeckenspeicher: Erdspeicher als quaderförmiges Volumen, horizontale Ausdehnung meist größer als vertikale, Aushub und Wiederverfüllung erforderlich (Rohrachsen primär horizontal)
- Sondenfeld: Erdspeicher mittels (Tiefen-)Sonden erschlossen, je nach Tiefe und Anzahl der erforderlichen Bohrungen flächenhafte Ausdehnung oder zylindrisch/quaderförmig in die Tiefe (Rohrachsen primär vertikal)

Je nach Größenordnung werden die Erdspeicher entweder unter Gebäuden, Bauwerken im Allgemeinen sowie direkt unter technischen Anlagen im Zuge der Fundierungsarbeiten oder auch unmittelbar daneben situiert. Bei Sonden wird zur Verbesserung der Wärmeleitung zwischen Sondenrohroberfläche und Erdreich der verbleibende Bohrlochquerschnitt mit einer zementären Masse (Zement-Bentonit-Suspension) vergossen.

Erdspeicher sind, im Gegensatz zu Warm- und Kaltwasserspeichern (nicht latente Speicher), i.d.R. offene Speicher, d.h. sie sind nicht allseitig von Wärmedämmung mit entsprechender Dicke und einer wasserdichten Ebene umgeben. Bei Sondenfeldern ist dieser Umstand offensichtlich, bei Flach- oder Aushubspeichern gibt es diese technischen Maßnahmen grundsätzlich. Je nach Speicherbauweise – schlank/flächig bis gedungen – und Auflasthöhe kommen geschäumte Wärmedämmstoffe in Plattenform (z.B. XPS) oder als Granulat (z.B. Glasschaumschotter) zur Anwendung. Beiden gemein ist die mehr oder weniger nicht vorhandene Wasseraufnahmefähigkeit, damit es zu keiner Verminderung der Dämmeigenschaft kommt.

Bei Bau eines Aushubspeichers im Grundwasser wäre zusätzlich eine hydraulische Abdichtung in Form einer Folie unumgänglich, um anteilige Speicherverluste aufgrund Durchströmung zu vermeiden. Dieselben Maßnahmen können zur Erzielung einer höheren spezifischen Wärmespeicherkapazität eines Erdspeichers gefordert sein, wenn die Speichermasse zusätzlich mit Wasser angereichert werden soll (siehe Konzept Erdbecken-Saisonspeicher Wohnsiedlung Heumatt, Zürich, Abbildung 64).

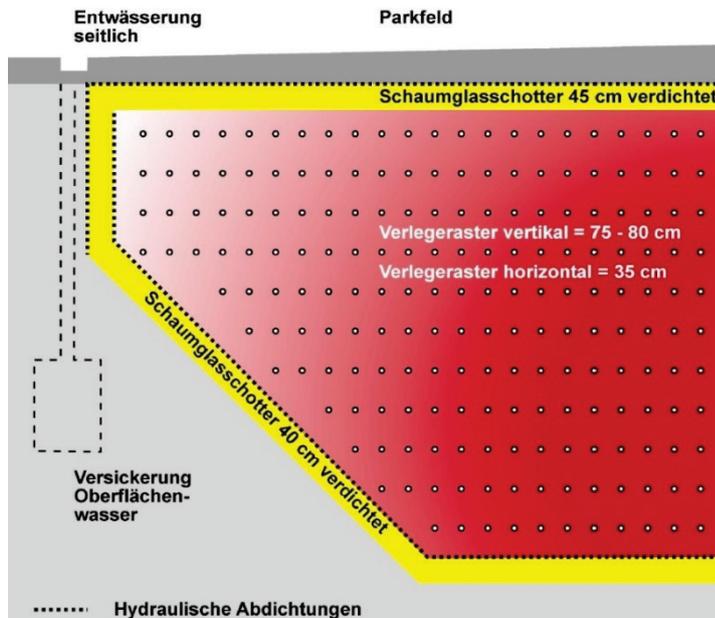


Abbildung 64: Detailschnitt Erdspeicherkonzept Wohnsiedlung Heumatt (Zürich), ©Lemon Consult GmbH, Zürich⁴⁷

Andererseits bringt ein offener Speicher auch folgenden Vorteil mit sich: Durch die thermische Kopplung via Wärmeleitung an das nicht direkt aktivierte Erdreich kann theoretisch der zur Verfügung stehende Halbraum unter der Geländeoberkante dazu genutzt werden, um Wärmemengen einzuspeichern. Prinzip bedingt können daher zwar Angaben zum direkt mit Rohrleitungen durchdrungenen Volumen gemacht werden, zur Gesamtspeichergröße jedoch nicht. Diese hängt aufgrund des offenen, trägen und instationären Systems von zahlreichen, teilweise variablen Faktoren ab:

- Be- und Entladezyklen über die Betriebsdauer
- Zeitspanne zwischen den Zyklen
- Boden- und Verfüllmaterial
- Grundwasserverhältnisse
- Niederschlagsereignisse
- ...

Der Faktoren Zeit und Temperaturdifferenz nehmen bei diesen instationären Vorgängen entscheidenden Rollen ein: Der Wärmetransport im Erdspeicher und in weiterer Folge im angrenzenden Erdkörper basiert auf physikalischen Größen wie z.B. der Wärme-/Temperaturleitfähigkeit der eingesetzten Materialien und Gesetzmäßigkeiten. Eine wesentliche ist der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik, der u.a. besagt, dass Wärme in Richtung kältere Bereiche strömt.⁴⁸ Je größer die Temperaturdifferenz zwischen zwei Medien

⁴⁷ Lemon Consult GmbH, Solaranlage mit Saisonspeicher Wohnsiedlung Heumatt – Zürich Seebach, Konzept und Pflichtenheft Technik aus Schlussbericht Solare Wärmeversorgung mit saisonalem Speicher für die Wohnsiedlung Heumatt, Zürich Seebach (2003), Zürcher Hochschule Winterthur (2003)

⁴⁸ Baehr/Kabelac (2016)

(Fluid/Erdspeicher oder Erdspeicher/Umgebung), umso größer ist auch der sich einstellende Wärmestrom dazwischen.

Besondere Beachtung gilt in dieser Richtung den offenen Erdspeichersystemen, die durch Grundwasserströmungen, die die Speicher mit Temperaturen von ca. 12 °C⁴⁹ in bestimmten Tiefen beaufschlagen, oder durch Niederschläge entladen (abgekühlt) bzw. regeneriert werden könnten. In den meisten Fällen ist dies jedoch ein nicht erwünschter Einfluss, da er nicht präzise vorhersehbar ist.

Bei geschlossenen Flachspeichern mit einigen Metern Tiefe wäre eine allseitige Wärmedämmung im Zuge des Aushubs und des lageweisen Einbaus der Rohrleitungsebenen zwar denkbar. Zumeist wird jedoch nur eine horizontale Dämmlage oberflächennah inkl. eines umlaufenden vertikalen Perimeterdämmstreifens zur Minderung des Einflusses der jahreszeitlichen Temperatureinflüsse und Niederschläge ausgeführt, siehe Abbildung 65. Diese Art der Dämmebenenführung wird auch dann umgesetzt, wenn unmittelbar ein Gebäude darüber errichtet wird.

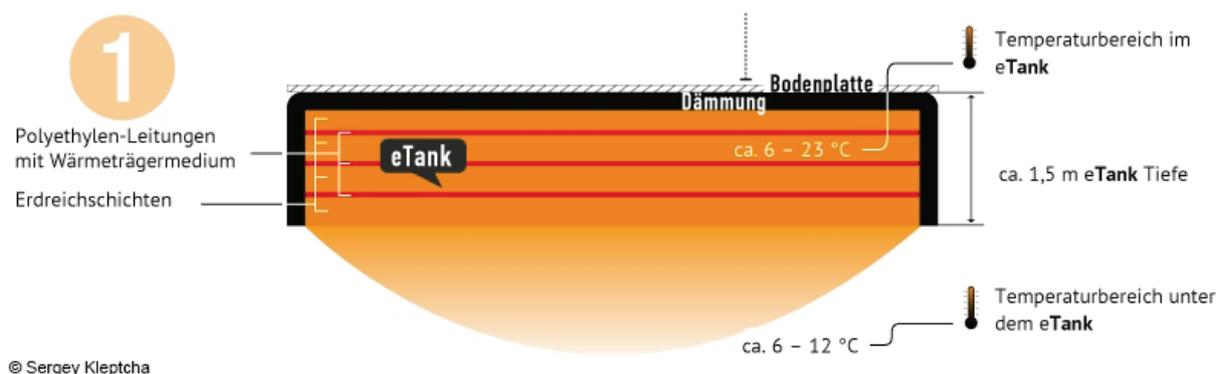


Abbildung 65: patentiertes eTank-System, deematrix Energiesysteme GmbH⁵⁰ (© Sergey Kleptcha)

2.7.2.2 Speicherkapazität eines Erdspeichers

Ausgehend von den Stoffkenngrößen kann die Speicherkapazität eines Erdspeichers analog eines Wasserspeichers ungefähr abgeschätzt werden, die als grober Richtwert herangezogen werden kann. Eine analytische Berechnung ist aufgrund instationärer Vorgänge mit dem gekoppelten Erdreich und dem wesentlichen Faktor Zeit nicht möglich. Auch geht die Betriebsweise eines Erdspeichers in die Ermittlung dessen Speicherkapazität mit ein und ist letztendlich eine Frage, bis zu welchem Ausdehnungshorizont eine Temperaturänderung im Erdreich durch den Betrieb des Erdspeichers erreicht wird. Eine thermisch dynamische Simulation über mehrere Jahre ist dazu erforderlich.

⁴⁹ Schartner/Kralik (2011)

⁵⁰ <http://www.etank.de/etank-funktion/etank-funktion-schema> [abgerufen am 03.07.2017]

Zur groben Abschätzung jedoch können folgende Größen herangezogen werden:

c_p spezifische Wärmekapazität des Speichermaterials (Erdreich/Verfüllmaterial) in [J/kgK]

ρ Rohdichte des Speichermaterials in [kg/m³]

V Volumen des unmittelbar mit Rohrleitungen durchzogenen Erdspeichers in [m³]

ΔT exergetisch nutzbare Temperaturdifferenz

Die Energiemenge Q in [J], die im Zuge einer definierten Temperaturerhöhung speicherbar wäre, ergibt sich wie folgt:

Formel 11: speicherbare Energiemenge eines Erdspeichers

$$Q = m * c_p * \Delta T = \rho * V * c_p * \Delta T$$

Das Volumen und die Temperaturerhöhung sind dabei jene zwei Größen, die bei der Dimensionierung eines Erdspeichers einigermaßen variabel gestaltbar sind in der Praxis. Da man i.d.R. nicht die Wahl hat, den Speicher gänzlich in ein anderes geologisches Gebiet unabhängig vom Ort des tatsächlichen Energiebedarfs zu situieren, sind die spezifischen Materialparameter vorgegeben. Bei Böden mit hohem Feuchteanteil (Wasser: $c_p \sim 4200$ J/kgK) erhöht sich die spezifische Wärmespeicherkapazität deutlich (siehe Ton, Schlack oder Schlamm, vgl. Tabelle 6).

In der Praxis sind Speicherkapazitäten um 2 bis 2,5 MJ/m³K (entspricht 0,56 bis 0,69 kWh/m³K) üblich, je nachdem ob es sich um Flachspeicher oder Tiefsondenfelder mit und ohne Bodenfeuchtigkeit handelt. Geologische Untersuchungen bzw. Gutachten unterstützen in der Beurteilung der Tauglichkeit und Speicherkapazität der vorhandenen Ressource Boden.

Um den Kapazitätsvergleich mit Wasserspeichern herzustellen, kann als grobe Näherung angegeben werden: 1 m³ Erdreich entspricht $\sim 0,5$ bis $0,6$ m³ Wasser (Wasseräquivalenz)

Tabelle 6: Auszug aus Wärmeschutztechnische Bemessungswerte für Baustoffe, die gewöhnlich bei Gebäuden zur Anwendung kommen (ÖNORM EN ISO 10456:2010)

Stoffgruppe oder Anwendung	Rohdichte ρ kg/m ³	Bemessungs- wärmeleitfähig- keit λ W/(m · K)	Spezifische Wärme- speicher- kapazität c_p J/(kg · K)
Erdreich			
Ton, Schlack oder Schlamm	1200–1800	1,5	1670–2500
Sand und Kies	1700–2200	2,0	910–1180
Gestein			
Kristalliner Naturstein	2800	3,5	1000
Sediment-Naturstein	2600	2,3	1000
leichter Sediment-Naturstein	1500	0,85	1000
poröses Gestein, z. B. Lava	1600	0,55	1000
Basalt	2700–3000	3,5	1000
Gneis	2400–2700	3,5	1000
Granit	2500–2700	2,8	1000
Marmor	2800	3,5	1000
Schiefer	2000–2800	2,2	1000
Kalkstein, extra weich	1600	0,85	1000
Kalkstein, weich	1800	1,1	1000
Kalkstein, mittelhart	2000	1,4	1000
Kalkstein, hart	2200	1,7	1000
Kalkstein, extra hart	2600	2,3	1000
Sandstein (Quarzit)	2600	2,3	1000
Naturbims	400	0,12	1000
Kunststein	1750	1,3	1000

Hohe Beladungstemperaturen im Vergleich zur Umgebung (Luft oder angrenzendes Bodenvolumen) zur Erzielung einer hohen Speicherkapazität resultieren jedoch in höhere Wärmeverluste pro Zeiteinheit. Andererseits sind die zur Verfügung stehenden Grundstücksflächen und damit auch das unmittelbar aktivierbare Erdkörpervolumen bei Flachspeichern oftmals begrenzt, weshalb sich Erdwärmesondenspeicher bei großer erforderlicher Speicherkapazität verbreitet haben. Gleichzeitig wird dadurch das Oberflächen-Volumen-Verhältnis i.d.R. günstiger und orientiert sich im besten Fall an jenem einer Kugel, da diese das optimalste Oberflächen-Volumen-Verhältnis aufweist (möglichst kleine Oberfläche bei möglichst großem Volumen).

Die nachfolgende Abbildung 66 verdeutlicht die volumenbezogenen Wärmeverluste von saisonalen zylindrischen Speichern mit einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 1 über 6 Monate. Werte >1 bedeuten, dass der Wärmeverlust größer als die maximal im Speicher speicherbare Menge ist. Daraus ergeben sich bei moderaten Dämmstärken erst ab ca.

1.000 m³ Speichervolumen saisonal sinnvolle Speicher. Bei Sondenfeldern ohne seitliche Wärmedämmung fällt die Abhängigkeit der Wärmeverluste von der Speichergröße noch deutlicher aus.⁵¹

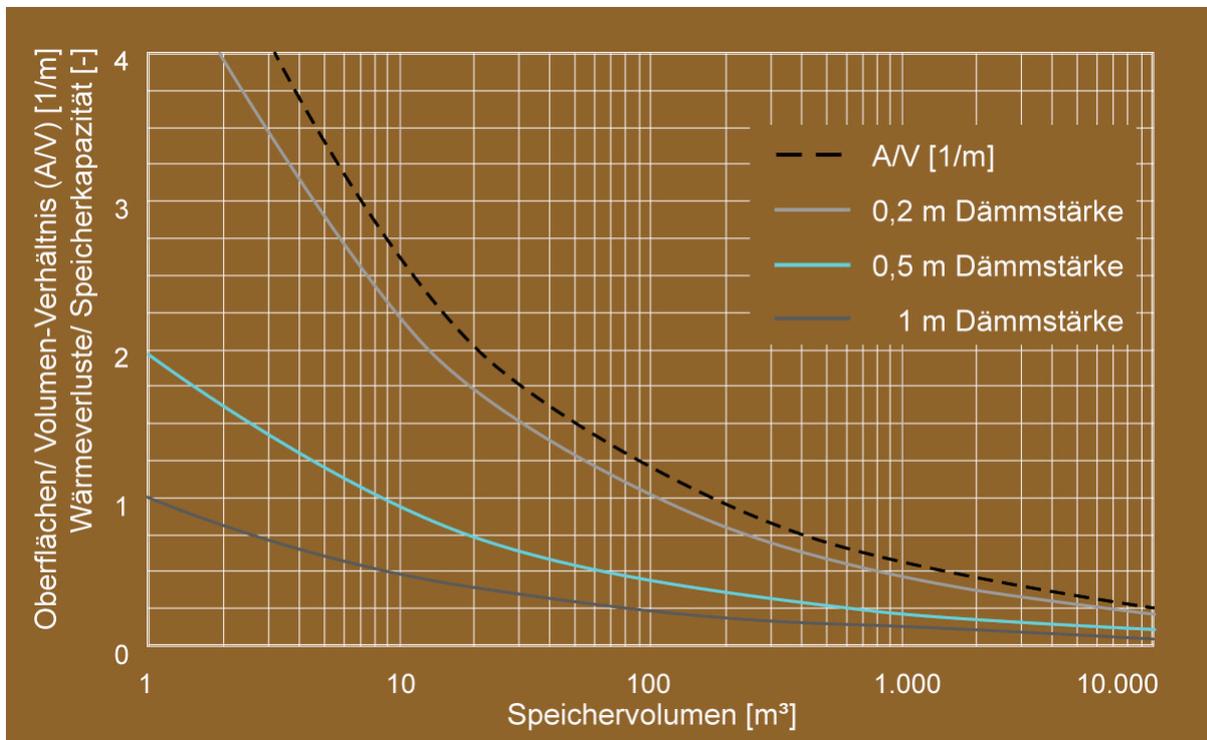


Abbildung 66: volumenbezogene Wärmeverluste⁵²

Der Borehole Thermal Energy Storage (BTES) Bohrlochspeicher der Drake Landing Solar Community mit 144 Sonden à 35 m umfasst ein Erdspeichervolumen von ca. 34.000 m³, welcher 2007 in Betrieb genommen wurde. Die Sonden sind dabei derart angeordnet, sodass sich im Grundriss annähernd eine Kreisfläche bildet. Hohe Temperaturen werden durch eine entsprechende hydraulische Verschaltung zuerst in den Kern des Speichers geladen (Abbildung 67). In Richtung Außenluft ist der Erdspeicher mit einer 20 cm dicken Wärmedämmung aus XPS gedämmt, um die Wärmeverluste möglichst zu reduzieren.

Der Speicher erreichte im vierten Betriebsjahr Kerntemperaturen um die 80 °C im Sommer (Vgl. Abbildung 70).⁵³

⁵¹

<http://www.saisonalspeicher.de/Planung/TechnischePlanungshinweise/AVVerh%c3%a4ltnis/tabid/334/Default.aspx> [abgerufen am 24.03.2016]

⁵²

<http://www.saisonalspeicher.de/Planung/TechnischePlanungshinweise/AVVerh%c3%a4ltnis/tabid/334/Default.aspx> [abgerufen am 24.03.2016]

⁵³ https://www.dlsc.ca/reports/bjul15/ISES_SWC_2011_final.pdf [abgerufen am 22.03.2017]

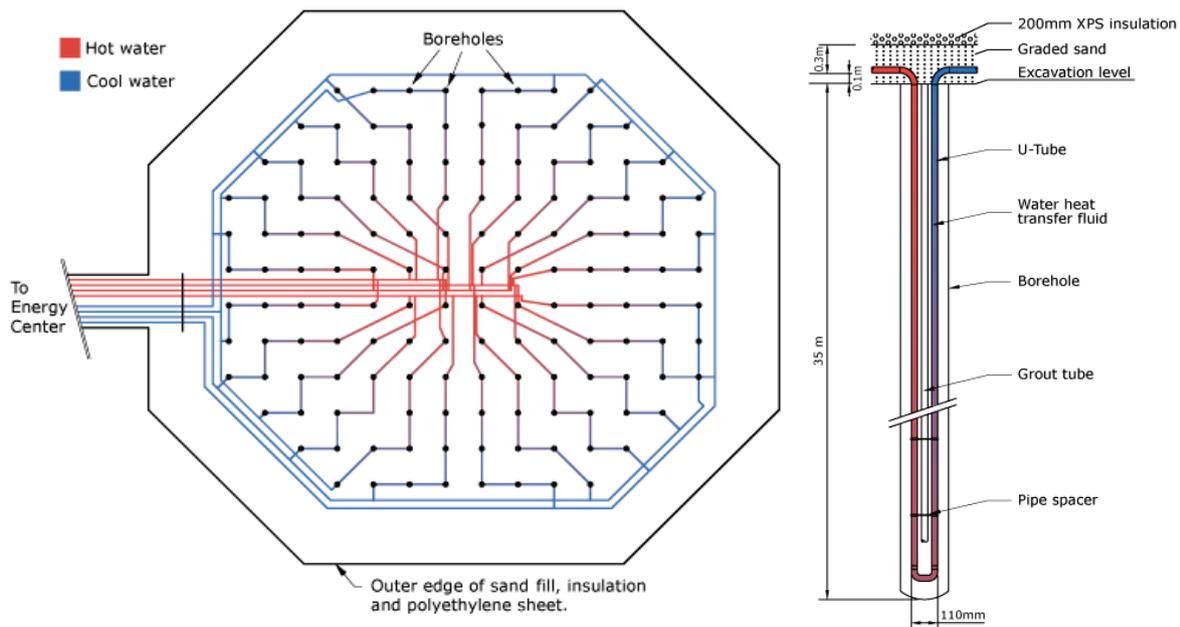


Abbildung 67: Draufsicht auf das Sondenfeld und Schnitt durch eine Sonde des BTES Erdspeichers⁵⁴

Da Erdspeicher, wie in 2.7.2.1 beschrieben, meist offene Systeme im Sinne der Kopplung an die unmittelbare Umgebung sind, hängt die Speicherkapazität auch von der Be- und Entladephase selbst ab: Wird z.B. während der Beladezeiträume mehr Wärmeenergie in den Erdspeicher eingebracht und in Folge während der Entladungen weniger Energie benötigt, erweitert sich die Zone mit wärmeren Temperaturen weiter über das direkt aktivierte Volumen hinaus aus. Die nachstehende Abbildung 68 skizziert die fortschreitende, über den ca. 5.000 m³ großen Erdspeicher hinausgehende, Erwärmung in den ersten Betriebsjahren (ausgeführt als Flachspeicher unter einem Betriebsgebäude). Die Beladung bzw. Regeneration erfolgt mittels Solarthermie.



Abbildung 68: schematische Darstellung der Erweiterung eines ca. 5.000 m³ Erdspeichers (Flachspeicher) unter einer Bodenplatte eines Betriebsgebäudes nach Inbetriebnahme⁵⁵

⁵⁴ <https://www.dlsc.ca/borehole.htm> [abgerufen am 22.03.2017]

⁵⁵ <http://www.ecoprojekt.at/trotec-fertigstellung-des-nullenergiehauses> [abgerufen am 04.07.2017]

Bereits Ende der 1980er Jahre wurden Erdspeicherkonzepte entwickelt, um daran gekoppelte Fahrbahnen mittels Bauteilaktivierung eis- bzw. schneefrei zu halten. Neben Japan, den USA und den Niederlanden wurde in Dürren in der Schweiz nach dem SERSO-System (Sonnen-Energie-Rückgewinnung aus Straßen-Oberflächen) die erste Pilotanlage errichtet, eine Autobahnbrücke, die ab 1994 eisfrei gehalten wird. Der Erdspeicher, im konkreten Fall ein Felspeicher mit 91 Sonden von je 65 m Länge, fasst ein Volumen von ca. 55.000 m³, das über die Sommermonate mittels 1.300 m² Fahrbahnkollektoren erwärmt und im Winter zur Eisfreihaltung des Autobahnbrückenabschnitts verwendet wird. Dabei werden Speichertemperaturen von knapp 20 °C erreicht und durchschnittlich pro Sommer ca. 140 MWh (entspricht ca. 108 kWh/m² Fahrbahnfläche) an Wärme eingelagert, wovon ca. ein Drittel als Verlust wieder verloren geht.⁵⁶

2.7.2.3 Phasenverschiebung Erdspeichers (Be- und Entladung)

Erdspeicher werden ähnlich über Rohrregister/-leitungen wie herkömmliche, indirekt betriebene Wasserspeicher (Wasser wird nicht direkt entnommen), be- und entladen. Meist befindet sich jedoch eine Sole in den Leitungen, um vor Frostgefahr zu schützen. Der Rohrmantel dient dabei als Wärmetauscher zwischen dem Fluid in den Leitungen und dem Erdreich/Verfüllmaterial. In der Regel sind die Rohre aus Kunststoff wie Polyethylen (PE) oder bei höheren Temperaturansprüchen deutlich > 25 °C aus vernetztem Polyethylen (PE-X) hergestellt, die durch höhere Fluidtemperaturen an Festigkeit verlieren. PE-X Rohre können im Gegensatz zu PE-Rohren nicht mehr geschweißt werden, was ggf. die Verbindungsarbeiten beeinflusst. Beim Betrieb eines Erdspeichers mit höheren Temperaturen, z.B. im Fall der Einspeisung von solarthermischen Erträgen, ist daher entweder darauf Rücksicht zu nehmen oder auf Rohre aus PE-RT (höhere Temperaturstabilität) oder metallische Rohrmaterialien zurückzugreifen.

Die erforderlichen Rohrleitungen zur Be- und meist auch Entladung durchdringen im Fall eines Flachspeichers das Speichervolumen in regelmäßigen horizontalen und vertikalen Abständen. Um einen möglichst hohlraumfreien physischen Kontakt zwischen Rohrmantel und Speichermasse herzustellen, werden die horizontalen Rohrlagen oftmals in Sand gebettet, auf der das geeignete Aushubmaterial eingebaut und verdichtet wird. Bei Erdsondenfeldern werden die Bohrlöcher mit einem Mörtel ausgegossen, um so den Kontakt zur Bohrlochwand herzustellen. Je höher die Wärmeleitfähigkeit dieser Vergussmasse, umso besser der Wärmeaustausch mit dem umgebenden Erdkörper.

Aufgrund der unterschiedlichen Wärme- und infolge Temperaturleitfähigkeiten von Bodenschichten (siehe Tabelle 6) ist es wesentlich, wie und wo Erdspeicher ausgeführt werden, wenn nicht nur das direkt aktivierte Erdreichvolumen in das Anlagenkonzept einfließen soll oder eine passive Regeneration unter gewissen Umständen unbedingt erforderlich wird.

⁵⁶ http://www.geoversi.nrw.de/Studie_Stand_16_06_2005.pdf [abgerufen am 04.07.2017]

Eine Ausnahme bilden Aushubspeicher, die allseits mit einer hydraulischen und wärmetechnischen Abdichtung versehen sind, wo theoretisch auch das Speichermaterial vom Aushubmaterial verschieden sein kann.

Beladung

Grundsätzlich stehen einem Erdspeicher zwei Beladungsmöglichkeiten zur Verfügung, wobei diese auch parallel erfolgen können:

- (meist) zyklische Beladung/aktive Regeneration mit Wärmeenergie aus diversen Abwärmeprozessen und/oder Solarthermie
- passive Regeneration durch Kopplung mit dem angrenzenden Erdreich (seitlich und unterhalb des Erdspeichers)

Im zweiten Fall erfolgt der Prozess laufend, sofern die Erdspeichertemperatur unterhalb der typischen Temperatur des angrenzenden Erdkörpers von 8-12 °C zu liegen kommt. Das kann z.B. dann der Fall sein, wenn sich ein Speicher am Ende einer langen Entladephase befindet. Sind jedoch auch weite, nicht aktivierte Bereiche durch fehlende oder unzureichende aktive Regeneration des Erdspeichers unter diesen Temperaturbereich abgekühlt, reicht die passive Regeneration bis zur nächsten (Heiz-)Saison alleine aufgrund der thermischen Trägheit und geringer Temperaturdifferenzen in den meisten Fällen nicht mehr aus, um den Speicher auf diese Art und Weise wieder vollständig auf dieses Temperaturniveau zu heben. Die Regeneration mit entsprechend hohen Vorlauftemperaturen wird unumgänglich.

Je höher letztendlich die Speichertemperaturen sind, umso größer ist das gesamte Anwendungspotential bzw. die exergetisch nutzbare Energiemenge, weshalb eine aktive Regeneration allgemein empfohlen wird, auch wenn damit in manchen Fällen nur das direkt aktivierte Erdspeichervolumen einen Temperaturhub erfährt. Primäres Ziel dabei ist, den Erdspeicher dabei soweit zu beladen, dass in der jeweils darauffolgenden Saison die geplanten bzw. benötigten Energiemengen wieder zur Verfügung stehen. Bei entsprechend großen Erdspeichern kann es mitunter einige Jahre dauern, bis die Solltemperatur am Ende einer Beladungssaison erreicht wird. Dies war auch z.B. beim Bohrlochspeicher der Drake Landing Solar Community (siehe Kap. 2.7.2.2) erst nach 3 bis 4 Jahren der Fall, obwohl im vierten Untersuchungszeitraum 2010-2011 die höchste Wärmemenge entnommen wurde (siehe Abbildung 69 und Abbildung 70).

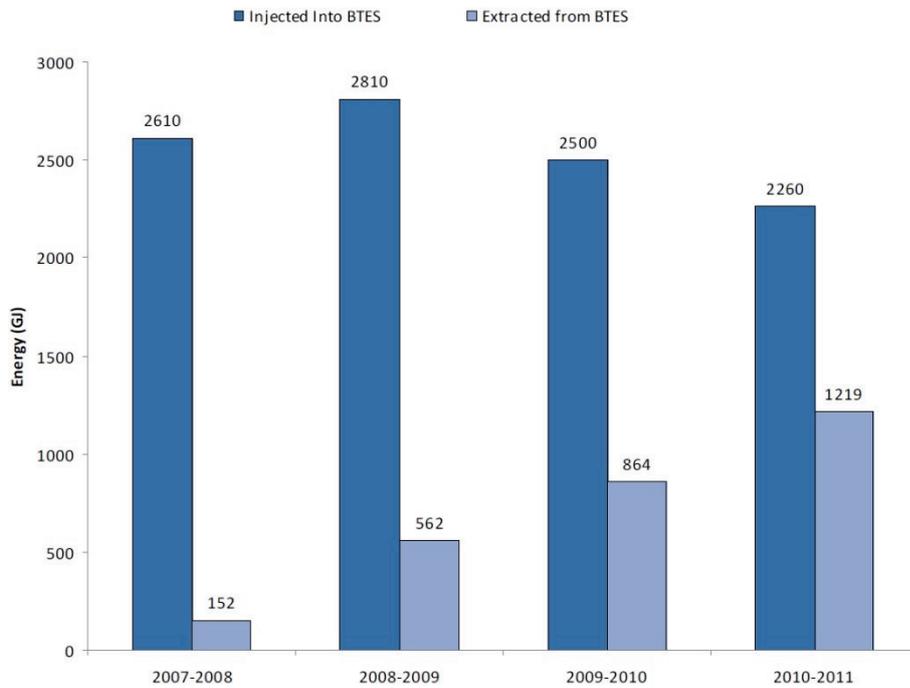


Abbildung 69: eingespeicherte und entzogene Wärmemengen des BTES Bohrlochspeichers der Drake Landing Solar Community im Untersuchungszeitraum 2007 – 2011⁵⁷

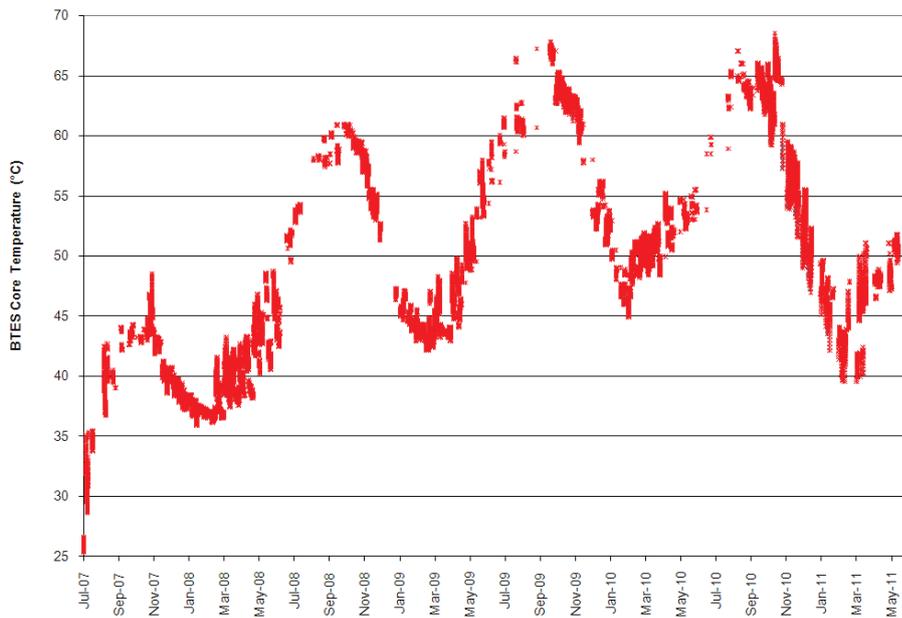


Abbildung 70: Kerntemperaturverlauf des BTES Bohrlochspeichers der Drake Landing Solar Community im Untersuchungszeitraum 2007 - 2011⁵⁸

⁵⁷ https://www.dlsc.ca/reports/bjul15/ISES_SWC_2011_final.pdf [abgerufen am 04.07.2017]

⁵⁸ https://www.dlsc.ca/reports/bjul15/ISES_SWC_2011_final.pdf [abgerufen am 04.07.2017]

Die Beladung von Sondenfeldern erfolgt dabei grundsätzlich von innen nach außen mittels entsprechender hydraulischer Verschaltung, um eine horizontale Schichtung zu erzwingen. Dadurch sind die Randzonen kälter und die Wärmeverluste in das umgebende, nicht aktivierte Erdreich können minimiert werden.

Entladung

Die Entladung erfolgt über dieselben Rohrleitungen zu einem anderen Zeitpunkt, da in den seltensten Fällen zwei hydraulisch getrennte Be- und Entladungskreise vorhanden sind, um einen Parallelbetrieb zu ermöglichen. Bei Wasser- bzw. Erdbeckenwasserspeichern mit angestrebter vertikaler Temperaturschichtung wird diese Betriebsweise i.d.R. durch unterschiedlich tiefe Belade- und Entnahmestellen erreicht, wobei hier das Speichermedium direkt getauscht und die Schichtung dabei aufrecht bleibt. Der eigentliche Wärmetauscher sitzt dort nicht im Speicher selbst.

Bei Sondenfeldern erfolgt die Entladung grundsätzlich in umgekehrter Richtung als die Beladung: von außen nach innen. Erst wenn die Rücklauftemperaturen aus dem äußeren Speicherbereich zu niedrig werden, wird weiter nach innen bis zum Kern entladen.

Die Entladephase kann, muss jedoch nicht den vollen zeitlichen Umfang einer Saison einnehmen, abhängig vom Betriebs- und Anlagenkonzept. In Kombination mit Wärmepumpen kann die Entladung des Erdspeichers auf ein tieferes Temperaturniveau erfolgen, wobei Rücklauftemperaturen (aus dem Erdspeicher) deutlich unter Null Grad Celsius längerfristig zu vermeiden sind. Einerseits könnten dadurch irreparable Schäden an der Hinterfüllung bei Erdsonden sowie Frosthebungen/-senkungen bei Flachspeichern auftreten und andererseits würde die Effizienz der Wärmepumpe sinken.

Nachfolgende Abbildung 71 verdeutlicht die Wichtigkeit der Regeneration anhand dreier Erdsonden. Der innenliegenden Sonde steht nur ein sehr geringer Kontaktbereich (unten) mit nicht unmittelbar aktivierten Erdteilen zur Verfügung, sodass eine passive völlige Regeneration nur bei Entfall darauffolgender Entladungsphasen denkbar wäre.

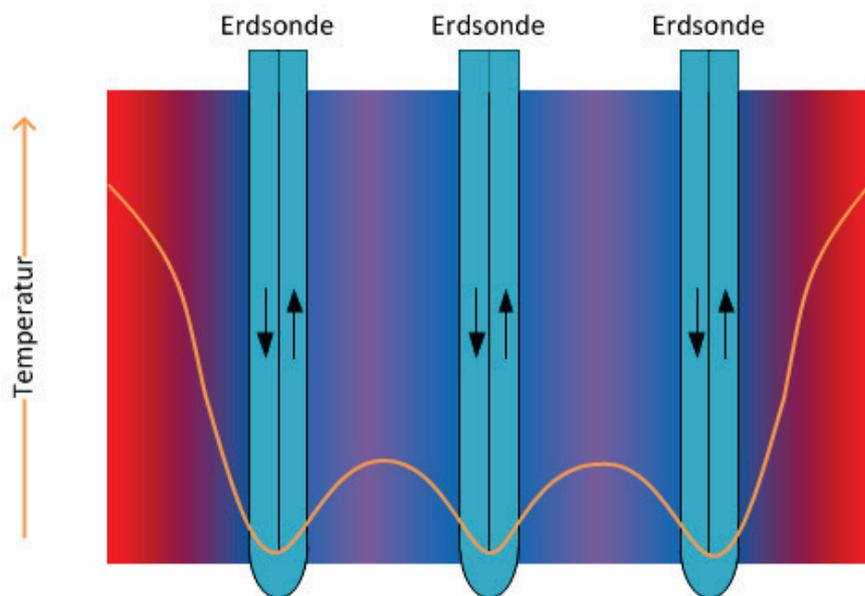


Abbildung 71: Temperaturkurve Sondenfeld bei Entladung⁵⁹

Einer Einzelsonde wie z.B. im Fall eines Einfamilienhauses steht eine sehr große Kontaktfläche zur Verfügung, wo je nach Dimensionierung der Sonde eine aktive Regeneration unterbleiben kann. Derartige Einzelsonden bilden für sich genommen jedoch keine saisonale Speicherung, da das Oberflächen-Volumen-Verhältnis sehr ungünstig dafür liegt (Vgl. Abbildung 66).

Eine aktive Regeneration ist jedoch bei größeren Erdspeichern jedenfalls nach Ende einer Entladesaison unumgänglich, da bereits eine vollständige passive Regeneration auf ca. 10 °C innerhalb einer Saison nicht möglich ist. Zahlreiche gebaute Beispiele weisen daher großflächige thermische Solaranlagenfelder auf, die mit Erdspeichern kombiniert werden.

Speicherkapazität C_p versus Leistung P

Speicher werden durch verschiedene wärmetechnische Kenngrößen charakterisiert, wobei die Gesamtspeicherkapazität, die nutzbare Speicherkapazität (bis zum Erreichen einer bestimmten nutzbaren Rücklauftemperatur beim Entladen) und die mittlere sowie kurzzeitige Entnahmelleistung neben den Bereitstellungsverlusten die wesentlichsten wärmetechnischen Kenngrößen darstellen. Die Speicherkapazität und deren Abhängigkeiten sowie die Bereitstellungs-/Speicherverluste wurden eingehend in Kap. 2.7.2.2 erläutert. In diesem Abschnitt wird auf die Leistung von Erdspeichern näher eingegangen, da diese nicht unmittelbar von obigen Faktoren abhängen. Einfluss darauf nehmen v.a. Betriebsdauer (pro Jahr), Temperaturspreizung zwischen Fluid und Speicher sowie der Wärmetauschprozess unter den Materialien.

⁵⁹ www.erdsondenoptimierung.ch [abgerufen am 20.02.2017]

In der VDI Richtlinie 4640 Blatt 2⁶⁰, die in der ÖNORM EN 15450 zitiert sind, werden für Sonden und Flachkollektoren folgende Anhaltswerte angegeben, die in Mitteleuropa aufgrund der vorherrschenden Erdreichtemperaturen in Kombination mit üblichen Vorlauftemperaturen von Wärmepumpensysteme angesetzt werden können. Dabei werden zwei Lastfälle mit entsprechender Jahresbetriebsstundenzahl angegeben. Eine, wenn auch anteilige, aktive Regenerationsphase ist bei den angegebenen Leistungen nicht Voraussetzung.

Tabelle 7: Flächenspezifische Entzugsleistungen für Flachkollektoren nach VDI 4640

Eigenschaften des Erdreichs	Spezifische Wärmeentzugsleistungen [W/m ²]	
	bei 1800 h/a	bei 2400 h/a
Trockener nichtbindiger Boden	10	8
Feuchter bindiger Boden	20-30	16-24
Wassergesättigter Sand oder Kies	40	32

Wärmepumpen zur Temperaturerhöhung

Elektrisch betriebene Wärmepumpen werden hinsichtlich ihrer Effizienz bei bestimmten Prüfpunkten geprüft, z.B. B0/W35 bei Sole-Wasser-Wärmepumpen, die in Verbindung mit Erdspeichersystemen häufig Anwendung finden, wenn Temperaturen deutlich über jenen ca. durchschnittlich 10 °C des Erdreichs benötigt werden. B0 (B...Brine...engl. für Sole) bedeutet dabei Null Grad Rücklauftemperatur aus dem Erdreich (= Soleeintrittstemperatur) und Anhebung mittels Wärmepumpe auf 35 °C Wassertemperatur. Bei konstant gehaltenen Prüfbedingungen kann ein Coefficient of Performance (COP) angegeben werden, der das Verhältnis elektrische Energiezufuhr zu umgewandelter thermischer Energie unter Zufuhr von Umgebungswärme angibt. Der COP bei typischen Sole-Wasser-Wärmepumpen liegt im Bereich von 4 bis 5. Erdspeicher weisen nach Regenerationsphasen üblicherweise höhere Temperaturen als 0°C auf, wodurch auch der COP deutlich angehoben wird und damit Werte über 6 erzielt werden können.

⁶⁰ VDI 4640 Blatt 2 (2001)

Tabelle 8: Längenspezifische Entzugsleistungen für Sonden für verschiedene Bodenarten in Mitteleuropa

Bodenart	spez. Entzugsleistung [W/m]		spez. Entzugsenergie [kWh/m·a]
	bei 1800 h/a	bei 2400 h/a	
Allgemeine Richtwerte:			
Mangelhafter Untergrund (trockenes Sediment) mit $\lambda < 1,5 \text{ W/mK}$	25	20	
Normaler Untergrund und wassergesättigtes Sediment $1,5 < \lambda < 3,0 \text{ W/mK}$	60	50	80*
Festes Gestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit $\lambda > 3,0 \text{ W/mK}$	84	70	
Einzelne Bodenarten:			
Trockener Kies oder Sand	< 25	< 20	
Wassergesättigter Kies oder Sand	65 - 80	55 - 65	
Kies oder Sand und starken Grundwasserstrom	80 - 100	80 - 100	
Feuchter Lehm	35 - 50	30 - 40	
Massiver Kalkstein	55 - 70	45 - 60	
Sandstein	65 - 80	55 - 65	
Kieseliges Magmatit (Granit)	65 - 85	55 - 70	
Basisches Magmatit (Basalt)	40 - 65	35 - 55	
Diorit	70 - 85	60 - 70	

(Werte aus VDI 4640-2001, Bezeichnungen aus ÖNORM EN 15450-2008, gilt für max. 5 Bohrlöcher)

*...exemplarischer, praxistauglicher Richtwert für normalen Untergrund

Für längere Betriebsdauern ist auch die jährlich extrahierte, spezifische Energiemenge in kWh/m²a bzw. kWh/m miteinzubeziehen, da es sonst mitunter langfristig zu Unterfrierungen kommen kann, wenn im Vergleich zur Regenerationswärme eine zu große Wärmemenge entnommen worden ist.⁶¹

Tabelle 7 und Tabelle 8 gelten grundsätzlich für maximal fünf Sonden bzw. für einen ungedeckten/ungedämmten Flachkollektor in 0,8 bis 2 m Tiefe, weshalb hierbei einerseits aufgrund des geringen aktivierten Volumens und andererseits der nicht zwingend aktiven Regeneration noch nicht von einem saisonalen Erdspeicher gesprochen werden kann. Wird nun das aktivierte Volumen entsprechend vergrößert und vor allem gleichzeitig eine Temperaturerhöhung durch aktive Beladung herbeigeführt, wird neben der Speicherkapazität C_p die thermische Gesamtleistung P des Erdspeichers wesentlich erhöht. Die spezifische Leistung in Watt pro Laufmeter Rohr ist, wie auch in Tabelle 8 ersichtlich, zeitabhängig. Durch eine deutliche Verkürzung der Betriebsdauern auf ca. 500 bis 600 h je Entladesaison konnten in umgesetzten Projekten wesentlich höhere spezifische Entzugsleistungen von 95 W/m oder mehr ohne Grundwassereinfluss gemessen werden. Die in einem konkreten Beispiel

⁶¹ ÖNORM EN 15450 (2008)

vorhandenen vier Sonden werden im Sommer mittels Fahrbahnkollektoren regeneriert.⁶² Höhere Leistungen sind in Kombination mit Solarthermiekollektoren aufgrund des höheren Temperaturniveaus zu erreichen.

Die Speicherkapazität, Energiemengen in der Be- und Entladesaison sowie die maximal benötigte Leistung definieren die Einsatzgebiete und -grenzen eines Erdspeichers. Aufgrund der instationären Wärmestromvorgänge ist eine thermische Anlagensimulation über mehrere Jahre erforderlich, um die thermische Trägheit im Erdreich abbilden zu können.

2.7.3 Vergleich Eis- und Erdspeicher

Die beiden Speicherkonzepte werden vor allem durch Kenngrößen wie Temperaturbereich des Wärmeentzugs/Regeneration, phasenverschobene Nutzung, Dauer- und Spitzenleistung charakterisiert. Erdspeicher können im direkten Vergleich mit Eisspeichern Wärmemengen über mehrere Monate einspeichern, um diese saisonal phasenverschoben (Sommer-Winter) zu nutzen. Eisspeicher hingegen entziehen dem Wärmeträgermedium am Phasenwechsel Energie, um diese unmittelbar zu nutzen. Die phasenverschobene Nutzung beträgt deshalb nur wenige Tage.

Die Dauer- sowie Spitzenleistung des Eisspeichers stehen in starker Abhängigkeit der Betriebsweise und der Eisschichtdicke an den Wärmetauscherflächen, wohingegen die Phasenverschiebung sowie Leistung eines Erdspeichers von dessen Beladungstemperaturniveau und den Verlusten in das umliegende Erdreich abhängig ist.

Anhand Tabelle 9 werden zusammenfassend Merkmale und wichtige Kenngrößen der Speicherkonzepte gegenübergestellt.

⁶² Würtele et.al. (2005)

Tabelle 9: Vergleich Merkmale und Kenngrößen Erd- und Eisspeicher

	Erdspeicher	Quelle	Eisspeicher	Quelle
Speicherkapazität	abhängig vom Speichermaterial und Bodenfeuchtigkeit: 0,5 bis 0,7 kWh/m³K	Kap. 2.7.1.2	84,4 kWh/m³ beim Phasenwechsel (theoretisch), Praxiswerte zw. 40-60 kWh/m³	Kap. 2.7.2.2
Temperaturbereich	in der Regel über dem Gefrierpunkt von Wasser: 0 bis 80 °C	Kap. 2.7.2.3	Latentwärmenutzung am Phasenwechsel -> daher um die 0°C	Kap. 2.7.2.2
Dauerleistung	abhängig von den Betriebsstunden, 8 - 40 W/m² (Flachspeicher), 25 - 84 W/m (Sondenfeld)	Kap. 2.7.2.3 Tabelle 7	u.a. abhängig von der Dicke der gebildeten Eisschicht und Wärmetauscherfläche im Eisspeicher	Kap. 2.7.1.3 Abbildung 62
Spitzenleistung	abhängig von den Betriebsstunden, vom Temperaturniveau nach Beladungssaison (abhängig von zeitlicher Bewirtschaftung des Speichers) deutlich über der Dauerleistung	Kap. 2.7.2.3	entspricht ca. der Dauerleistung am Phasenwechsel	Kap. 2.7.2.2
Phasenverschiebung	mehrere Wochen bis Monate (saisonal) je nach Volumen-Oberflächen-Verhältnis und grundsätzlicher Speichergröße (-kapazität)	Kap. 2.7.2.3	Stunden bis Wochen abhängig von der Betriebsweise	Kap. 2.7.1.3
Anwendung	Energiequelle bzw. Kühltasche (Heiz- bzw. Kühlbetrieb)	Kap. 2.7.2.1	Energiequelle bzw. Kühltasche (Heiz- bzw. Kühlbetrieb)	Kap. 2.7.1.1
Energieentzug	durch alleinigen Umwälzpumpe(n)betrieb bei niedrigen Temperaturanforderungen oder im free cooling Betrieb, sonst in Kombination mit Wärmepumpen	Kap. 2.7.2.3	durch alleinigen Umwälzpumpe(n)betrieb im free cooling Betrieb (allgemein: niedrige Temperaturniveaus) oder in Kombination mit Kältemaschinen als Wärmesenke, sonst in Kombination mit Wärmepumpen für höhere Temperaturniveaus	Kap. 2.7.1.3
Regeneration	aktiv durch Solarthermie, Abwärmeprozesse, etc. / passiv durch Umgebungswärme	Kap. 2.7.2.3	aktiv durch Solarthermie- und Solar-/Luftkollektoren, Abwärmeprozesse / passiv durch Erdwärme	Kap. 2.7.1.3
Kosten	0,01 - 0,14 €/kWh (Erdsondenspeicher)	Kap. 2.7.2.1, Tabelle 5	0,5 - 1,5 €/kWh	Kap. 2.7.2.1, Tabelle 5
Errichtung	je nach Tiefe und Grundwasservorkommen wasserrechtliche Genehmigung erforderlich		keine wasserrechtliche Genehmigung nötig, im Erdreich situiert ohne zusätzliche Wärmedämmung	Kap. 2.7.1.1

2.8 Möglichkeiten der Anwendung

2.8.1 Möglichkeiten der direkten Nutzung

2.8.1.1 Allgemeines

Folgende direkte Nutzungsszenarien sind auf Basis der vorhandenen Ergebnisse zielführend und vielversprechend:

- Wärmeentzug der versiegelten Flächen zur Minimierung von Hitzeinseln
- Schaffung von Grünflächen zur Minimierung von Hitzeinseln
- Direkte Nutzung zur Wärmebereitstellung für Heizung und Warmwasser, ggf. in Kombination mit Wärmepumpen
- Regeneration von Erdkollektoren/-speichern, Tiefensondenfeldern

Nicht zielführend ist hingegen die direkte Nutzung zur solaren Kühlung, da die minimalen Temperaturen zum Betrieb einer Absorptionskältemaschine bei ca. 75°C liegen und auch an sehr heißen Tagen Kerntemperaturen der versiegelten Flächen von max. 50°C erreicht werden.

2.8.1.2 Wärmeentzug der versiegelten Flächen zur Minimierung von Hitzeinseln

Städtische Hitzeinseln (Urban Heat Island) werden über den Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland definiert. Je nach Ausstattung, Versiegelungsgrad, vorhandener Vegetation und Wasserflächen können Temperaturunterschiede im 2-stelligen Bereich auftreten.⁶³ Bis zur Mitte des Jahrhunderts ist in städtischen Gebieten mit einer Verdoppelung der Tropennächte mit Nachttemperaturen über 20°C zu rechnen.⁶⁴

Hohe Temperaturen durch derartige mikroklimatische Situationen beeinflussen die Gesundheit und den Komfort der Stadtbewohner unmittelbar.

Der thermische Komfort einer Person im Freiraum basiert auf der Gleichung der menschlichen Wärmebilanz, wo alle Klimabedingungen, die auf den Menschen einwirken, beschrieben werden. Fanger (1970) beschreibt die thermische Behaglichkeit als Balance der aufgenommenen und abgegebenen Energie. Abbildung 72 verdeutlicht diese Wärmebilanz.

⁶³ Brandenburg et.al. (2015)

⁶⁴ Kromb-Kolb et.al (2015)

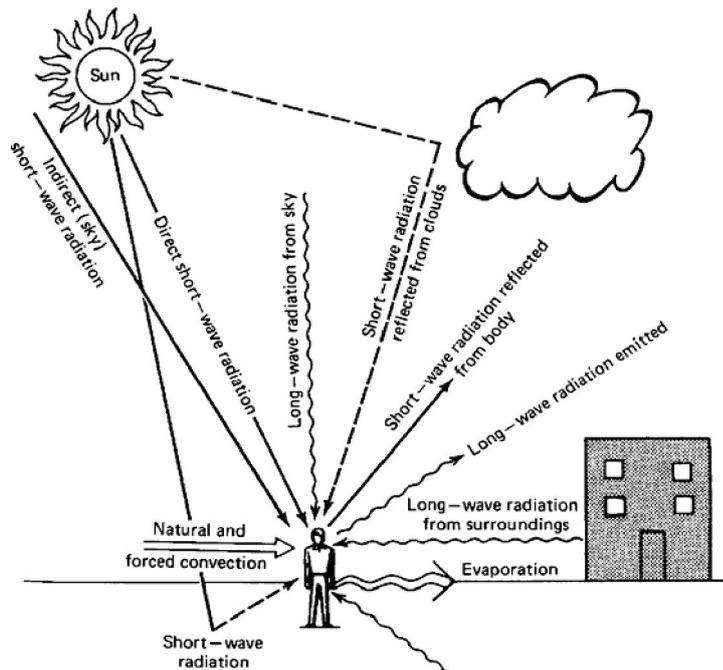


Abbildung 72: Wärmebilanz einer Person im Außenraum⁶⁵

Durch Ali Toudert (2005) wurde festgestellt, dass der Komfort einer stehenden Person im städtischen Raum wie z.B. in Straßenschluchten maßgeblich von der Strahlungswärme von den bestrahlten Umgebungsflächen abhängt, während der Wärmegewinn aus der direkten Sonnenstrahlung, ebenso wie die Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit von zweitrangiger Bedeutung sind. In der Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen der vom Körper aufgenommenen Energie zu der abgestrahlten langwelligen Wärmeenergie des Bodens bzw. einer naheliegenden Wand messtechnisch ermittelt (Abbildung 73).

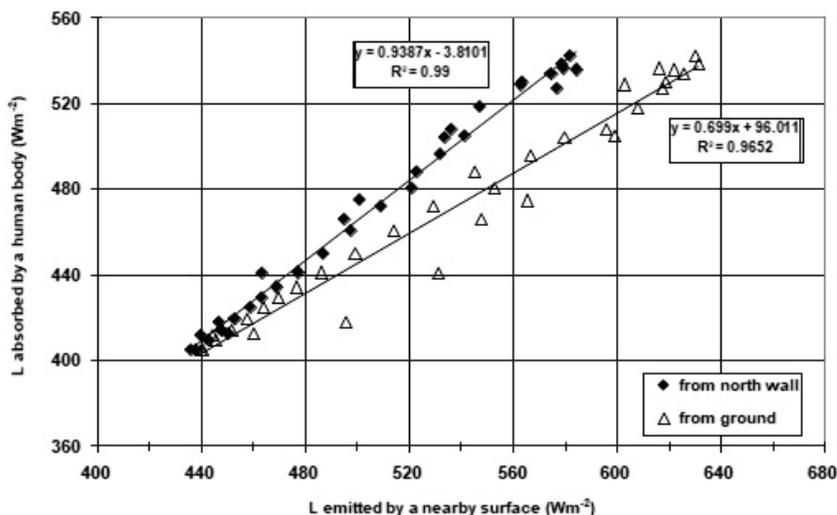


Abbildung 73: Verhältnis der vom Boden bzw. einer nahen Wand abgestrahlten Energie zu der vom Körper absorbierten langwelligen Strahlungsenergie aus Ali Toudert (2005), S.153

⁶⁵ Houghton (1985) aus Ali Toudert (2005), S.43

Um die Wirkung des Wärmeentzuges auf den thermischen Komfort einer Person zu bewerten, wird die langwellige Abstrahlung der im Projekt vorhandenen Asphalt- und Betonoberfläche rechnerisch mit und ohne Wärmeentzug zu einem strahlungsintensiven Zeitpunkt (Globalstrahlung = 900 W/m², $\Theta_e = 30^\circ\text{C}$) gemäß dem Rechenmodell lt. Kap. 2.5 ermittelt und gemäß Abbildung 73 mit der vom Körper aufgenommenen Energie in Verbindung gebracht:

Tabelle 10: Auswirkung eines Wärmeentzuges auf die vom Körper absorbierte Energie

Berechnung d. temp. Und Abstrahlung*	Oberflächentemperatur		langwellige Abstrahlung		vom Körper absorbiert	
	$\Theta_{s(\text{Asphalt})}$	$\Theta_{s(\text{Beton})}$	$Q_{\text{Lab}(\text{Asphalt})}$	$Q_{\text{Lab}(\text{Beton})}$	auf Asphalt	auf Beton
ohne Wärmeentzug	54,1 °C	51,5 °C	618 W/m ²	599 W/m ²	528 W/m ²	515 W/m ²
mit Wärmeentzug**	39,1 °C	41,4 °C	512 W/m ²	527 W/m ²	454 W/m ²	465 W/m ²
				Differenz:	-74 W/m²	-50 W/m²

* Windgeschwindigkeit = 5 km/h

** Vorlauftemperatur = 12,5°C

Wie in Tabelle 10 verdeutlicht wird, kann die vom Körper absorbierte Energie durch einen Wärmeentzug deutlich reduziert werden. Die verminderte absorbierte Wärmemenge von 75W/m² (im Fall des Asphalts) entspricht bei Berücksichtigung einer durchschnittlichen Oberfläche des Menschen von 1,73 m² in etwa 130 W, was dem zusätzlichen Energieumsatz des Körpers beim Tennisspielen entspricht (im Vergleich zum Stehen).⁶⁶

Zur Verdeutlichung auf die Auswirkung der operativen Temperatur wird diese nachfolgend auf Basis der Strahlungstemperatur berechnet.

Da die Strahlungstemperatur bei wolkenlosem Himmel maßgeblich von der Sonnenstrahlung abhängt, erfolgt die Berechnung vereinfacht zu einem Zeitpunkt mit hoher Bewölkung (wo die Strahlungstemperatur des Himmels in etwa der Lufttemperatur entspricht). Betrachtet wird ein 10 m breiter Ost-West ausgerichteter Straßenzug mit 4-stöckiger Bebauung (16 m Höhe).⁶⁷ Die Strahlungstemperatur wird vereinfacht als gewichtetes Mittel der Oberflächentemperaturen berechnet. Die Oberflächentemperaturen der horizontalen befestigten Fläche wird entsprechend den Berechnungen aus Tabelle 10 für Asphalt entnommen. Die Oberflächentemperaturen der Fassaden werden gemäß den Berechnungen von Kreč (2008)⁶⁸ bei ähnlichen Witterungsbedingungen wie im vorliegenden Fall angenommen. Bei der Berechnung der operativen Temperatur muss auch die Windgeschwindigkeit mitberücksichtigt werden, zur Berechnung erfolgt der Ansatz gemäß CIBSE Guide A (2015):

Formel 12: Berechnung der operativen Temperatur in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit sowie der Strahlungs- und Außenlufttemperatur

$$T_{op} = \frac{T_a \sqrt{(10v)} + T_r}{1 + \sqrt{(10v)}}$$

⁶⁶ Grundumsatz in Abhängigkeit des Aktivitätsgrades gemäß ASHRAE Standard 55

⁶⁷ Geometrie analog Kreč (2008)

⁶⁸ Berechnungen auf Basis der Strahlungslufttemperatur, Tabelle 3: Randbedingungen für die Berechnung des langwelligen Strahlungsaustausches.

- T_{op} ... operative Temperatur in [K]
- T_a .. Außenlufttemperatur in [K]
- v ... Windgeschwindigkeit (Annahme 5 km/h) in [m/s]
- T_r ... Strahlungstemperatur in [K]

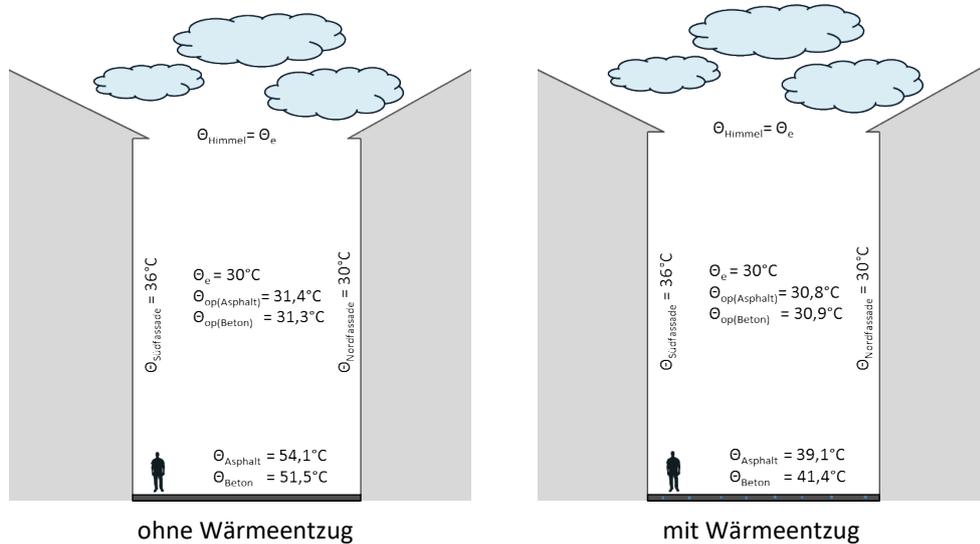


Abbildung 74: vereinfachte Berechnung der operativen Temperatur mit und ohne Wärmeentzug der Straße

Wie aus obiger Abbildung ersichtlich wird, kann die operative Temperatur im Mittel durch den Wärmeentzug der Straße um ca. 0,5 K gesenkt werden. Da die operative Temperatur in der Nähe von wärmeabgebenden Flächen größer ist als in der Mitte des „Raumes“, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt 1 m über der Straßenoberfläche wesentlich höher ist. Im bodennahen Bereich konnte beispielsweise durch Berechnungen von Kreč (2008) mittels Falschfarbenbilder eine Reduzierung der empfundenen Temperatur von 1,5 K (bei einem Oberflächentemperaturunterschied von 6,8 K)⁶⁹ festgestellt werden.

Die in Tabelle 10 aufgelisteten Werte entsprechen einer Fläche bei voller Besonnung. Im Vergleich dazu wird nachfolgend eine beschattete Fläche auf Ihre Auswirkung auf den Energiehaushalt des Menschen betrachtet, wobei durch die Beschattung eine maximale Oberflächentemperaturabsenkung von 10°C (vgl. Messungen aus Kap. 2.3.2) angenommen wird.

⁶⁹ verglichen wurde der Einfluss unterschiedlicher Straßenoberflächen auf die empfundene Temperatur, im konkreten Fall eine helle Betonoberfläche ($\alpha=10\%$) mit einer dunklen Asphaltoberfläche ($\alpha=30\%$).

Tabelle 11: Auswirkung einer Beschattung auf die vom Körper absorbierte Energie

Berechnung d. temp. und Abstrahlung*	Oberflächentemperatur		langwellige Abstrahlung		vom Körper absorbiert	
	$\Theta_{s(\text{Asphalt})}$	$\Theta_{s(\text{Beton})}$	$Q_{\text{Lab}(\text{Asphalt})}$	$Q_{\text{Lab}(\text{Beton})}$	auf Asphalt	auf Beton
ohne Beschattung	54,1 °C	51,5 °C	618 W/m ²	599 W/m ²	528 W/m ²	515 W/m ²
mit Beschattung	44,1 °C	41,5 °C	546 W/m ²	528 W/m ²	478 W/m ²	465 W/m ²
				Differenz:	-50 W/m²	-50 W/m²

* Windgeschwindigkeit = 5 km/h

** Vorlauftemperatur = 12,5°C

Wie aus Tabelle 11 ersichtlich wird, kann durch Minimierung der Strahlungstemperatur die vom Körper absorbierte langwellige Strahlungsenergie um ca. 50 W/m², also um insgesamt 86,5 W für eine Person reduziert werden. Das entspricht der zusätzlichen Wärmeproduktion bei schnellem Gehen (im Vergleich zum Stehen).

Auf Basis dieser Überlegungen ist das Potential zur Reduktion von Hitzeinseln durch einen Wärmeentzug befestigter Flächen als durchaus hoch einzustufen und liegt auch höher als das Potential der Abkühlung durch eine Beschattung der Flächen. Wobei hier angemerkt werden muss, dass Beschattungen durch Vegetation wie z.B. Bäume anders zu bewerten sind, da diese aufgrund Ihrer Verdunstungseigenschaften auch zusätzliche Kühleffekte schaffen (vgl. Kap. 2.8.1.3).

2.8.1.3 Schaffung von Grünflächen zur Minimierung von Hitzeinseln

Wie in Kap. 2.3 messtechnisch erfasst wurde, ist die Strahlungstemperatur einer Grünfläche wesentlich geringer als die Strahlungstemperatur befestigter Flächen, was sich auf eine Minimierung der operativen Temperatur über diesen Flächen auswirkt.

Neben der geringeren Strahlungstemperatur sind auch andere Faktoren einer Grünfläche positiv in Bezug auf den Wärmehaushalt einer Stadt zu bewerten.

Einerseits können Grünflächen im Gegensatz zu versiegelten Flächen Feuchtigkeit aufnehmen, womit ein wesentlich größerer Teil der absorbierten Strahlung über Transpirations- und Evaporationsprozesse in die natürliche Kühlung der Umgebung eingebunden wird.

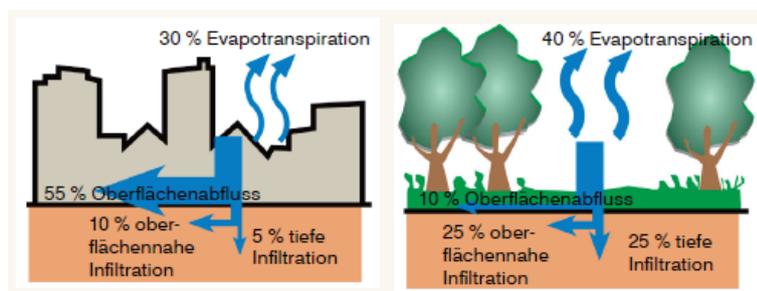


Abbildung 75: Vergleich der Evaporation in städtischen und ländlichen Gebieten⁷⁰

⁷⁰ Brandenburg et.al. (2015)

Andererseits führen Bäume und Sträucher zu einer Beschattung der versiegelten Flächen, was, wie in Kap. 2.8.1.2 erläutert, zu einer wesentlichen Erhöhung des thermischen Komforts führt.

Diesbezüglich muss auch der Einfluss von Fassaden auf das Mikroklima mitberücksichtigt werden. Sonnenausgerichtete Fassaden heizen sich je nach Albedo ebenso auf wie horizontale Flächen und verstärken damit den Hitzeinseleffekt. Fassadenbegrünungen können hier ebenso Abhilfe schaffen wie eine sommerliche Beschattung der Fassadenflächen durch z.B. Laubbäume.

2.8.1.4 Direkte Nutzung zur Wärmebereitstellung

Bei großer vorhandener Wärmestrahlung auf die versiegelte Fläche, v.a. im Sommer, sind entsprechende hohe Rücklauftemperaturen (siehe nachfolgende Abbildung 76) und damit entsprechende Wärmeleistungen (Abbildung 43) bzw. Energiemengen (Abbildung 44) zu erwarten. In Abhängigkeit der Rücklauftemperaturen aus den versiegelten Flächen ergeben sich unterschiedliche Anwendungspotentiale zur direkten Nutzung, d.h. ohne Phasenverschiebung.

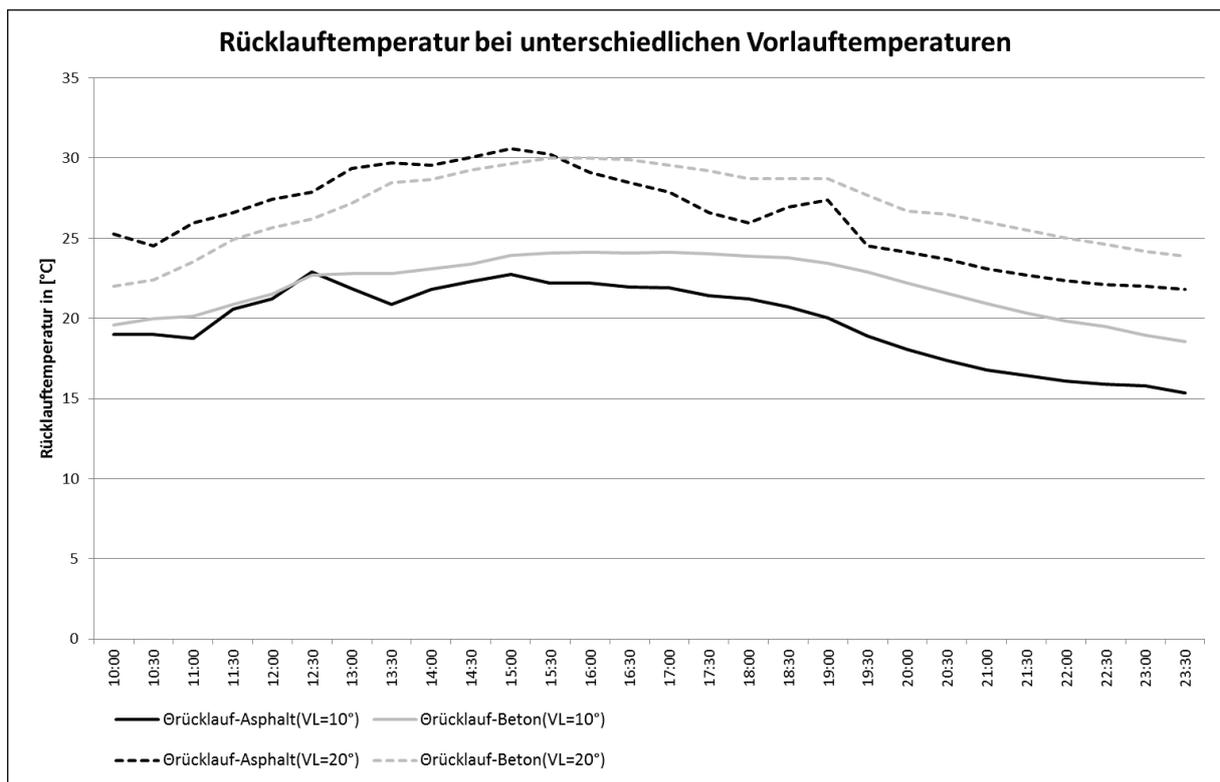


Abbildung 76: Rücklauftemperaturverlauf Asphalt und Beton bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen, gemessen am 17.08.2017

Dazu ist eine möglichst zeitgleiche wie auch örtlich naheliegende Abnahmemöglichkeit bzw. Verwendung erforderlich, um weitere Verluste z.B. durch Pufferung und lange Verteil- und Sammelleitungen zu minimieren.

Folgende Anwendungsfälle können aufgezeigt werden:

- Unterstützung der Warmwassererzeugung im Sommer
- Unterstützung der Heizwärmeerzeugung in der Übergangszeit
- Beheizung von Pools, Schwimmbädern u.dgl

Unterstützung der Warmwassererzeugung im Sommer

Beginnend in den Nachmittagsstunden sind Rücklauftemperaturen zwischen 20 und 30 °C bei unverschatteten Absorberflächen zu erreichen, die mittels Wärmepumpe weiter angehoben werden können. Dabei ist zu beachten, dass je nach Wärmepumpenfabrikat die obere Einsatzgrenztemperatur (max. zulässige Quelltemperatur) nicht überschritten werden darf, damit ein Betrieb überhaupt ermöglicht wird (abhängig vom Kältemittel und Komponenten in der Wärmepumpe). Bei herkömmlichen Sole-Wasser-Wärmepumpen für den Wohnbau liegt diese Grenze oftmals bei max. 25 °C, einige Hersteller lassen auch etwas höhere Temperaturen zu. Dezidierte Brauchwasserwärmepumpen hingegen erlauben i.d.R. auch 35 °C.

Wesentlicher Vorteil dieser Art der Warmwassererzeugung ist der damit zu erreichende COP bzw. SCOP⁷¹ der Wärmepumpe, da die Quellen- bzw. Absorbertemperatur um ca. 10 °C und mehr über jener von Tiefensonden und Flachkollektoren liegt. Damit ist eine sehr effiziente Warmwassererzeugung möglich, die gleichzeitig die Oberflächentemperatur der Absorber absenkt und damit einen Beitrag zur Reduktion von Hitzeinseln leistet.

Anzumerken an dieser Stelle ist der zeitlich eingeschränkte Betrieb bei entsprechend vorhandenem Solarstrahlungsangebot sowie je nach unmittelbar am Ort des Absorbers benötigte Wärmemenge: In urbanen Gebieten ist die Bevölkerungsdichte u.a. aufgrund höherer Gebäude ebenso höher, dem gegenüberstehen steht jedoch eine eingeschränkte versiegelte Fläche in unmittelbarer Nähe der Gebäude. D.h unabhängig von der Geschoßanzahl ergibt sich eine gleichbleibend große Bodenfläche, die als Absorberfläche (Platz, Straße) konzipiert werden kann, wodurch nicht alle Warmwasserverbraucher mit diesem Konzept versorgt werden könnten. Ebenso zu berücksichtigen ist, dass bei einer Beschattung der Fläche bzw. bei einem hohen Bewölkungsgrad entsprechend niedrigere Temperaturniveaus zu Stande kommen.

Unterstützung der Heizwärmeerzeugung in der Übergangszeit

Das Konzept ist analog der oben beschriebenen Warmwassererzeugung mit dem Unterschied, dass grundsätzlich niedrigere Temperaturniveaus erforderlich sind und der Heizwärmebedarf zu Zeiten niedriger Solarstrahlungsangebote bei gleichzeitig niedrigen Außentemperaturen auftritt. Eine direkte Heizungsunterstützung in Kombination mit Wärmepumpen ist zwar denkbar, jedoch aus folgenden Gründen in der Praxis nur eingeschränkt möglich:

- Durch einen eventuell vorhandenen Warmwasserbetrieb im Sommer stehen am Beginn der Heizperiode etwas niedrigere Absorber- und Untergrundtemperaturen zur Verfügung als ohne Sommerbetrieb. Der Sommer dient bei Sole-Wärmepumpenkonzepten klassischerweise der ggf. aktiven Regeneration der Quelle (Erdreich).

⁷¹ Seasonal Coefficient of Performance

- Durch Leistungsspitzen des Absorbers am Nachmittag eignet sich dieser Tagesabschnitt eher zur effizienten Wärmebereitstellung als die kälteren Nachtstunden. Die höhere Heizlast in (Wohn-)Gebäuden tritt jedoch in der Nacht und v.a. in den frühen Morgenstunden gegen vier bis sechs Uhr auf, weshalb hier eine Phasenverschiebung unweigerlich auftritt. Diese Thematik wird im nachfolgenden Kap. 2.8.2 behandelt, an dieser Stelle sei jedoch so viel erwähnt, dass entsprechend thermisch trägere Gebäude mit dieser ca. halbtägigen Phasenverschiebung insofern gut zurechtkommen, da eine kurze Heizungsunterbrechung die Innenraumtemperaturen geringer absinken lässt.

Beheizung von Pools, Schwimmbädern u.dgl.

Je tiefer das benötigte Temperaturniveau ist, umso eher können thermisch aktivierte, versiegelte Flächen einen Beitrag zur Wärmebereitstellung beitragen. Anwendungsfälle mit derartigen Anforderungen sind Pools, Schwimmbäder u.dgl., die einen praxistauglichen Temperaturbereich zwischen ca. 20 und 30 °C haben. Hierzu ist im Prinzip lediglich eine Umwälzpumpe und ggf. ein Wärmetauscher als hydraulische Trennung zwischen Absorberkreislauf und Beckenwasser erforderlich. Im Gegensatz zur oben angeführten Heizwärmeerzeugung fällt der Bedarf mit dem hohen Solarstrahlungsangebot im Sommer zusammen. Ein herkömmlicher Schwimmbadabsorber (siehe Kap.2.7.2) arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip. Vorteil: Bereits eine geringe Temperaturspreizung zwischen Beckenwasser und Absorberfluid ist ausreichend für eine effiziente Erwärmung von Pool bzw. Schwimmbecken. Außerdem kann bei vorsorglicher Entleerung des Absorberkreislaufes im Winter dieser ohne Frostschutzmittel gefüllt sein im Gegensatz zu obigen Anwendungen, wo auch ein Winterbetrieb möglich ist.

2.8.2 Möglichkeiten der phasenverschobenen Nutzung

2.8.2.1 Allgemeines

Folgende phasenverschobene Nutzungsszenarien sind auf Basis der vorhandenen Ergebnisse zielführend und vielversprechend

- Eisfreihaltung der befestigten Flächen
- Heizwärme- und Warmwasserwärmebereitstellung von Gebäuden

2.8.2.2 Eisfreihaltung der befestigten Flächen

Die phasenverschobene Nutzung für die Eisfreihaltung besteht aus folgenden Komponenten

1. Sommerbetrieb: Nutzung der befestigten Flächen als Solarkollektor
2. Zwischenspeicherung der gewonnenen Wärmemenge in einem Speicher
3. Winterbetrieb: Nutzung der gespeicherten Wärmemenge zur Eisfreihaltung der befestigten Flächen und damit Regeneration des Speichers

Zur Dimensionierung des Speichers müssen zuerst die Rahmenbedingungen des Sommer- und Winterbetriebes bekannt sein:

zu 1) Sommerbetrieb: Nutzung der Straße als Solarkollektor

Für die Sommermonate wird der mögliche Wärmeentzug mit Hilfe von halbsynthetischen Klimadaten⁷² auf Basis des Rechenmodells aus Kap. 2.5 berechnet.⁷³

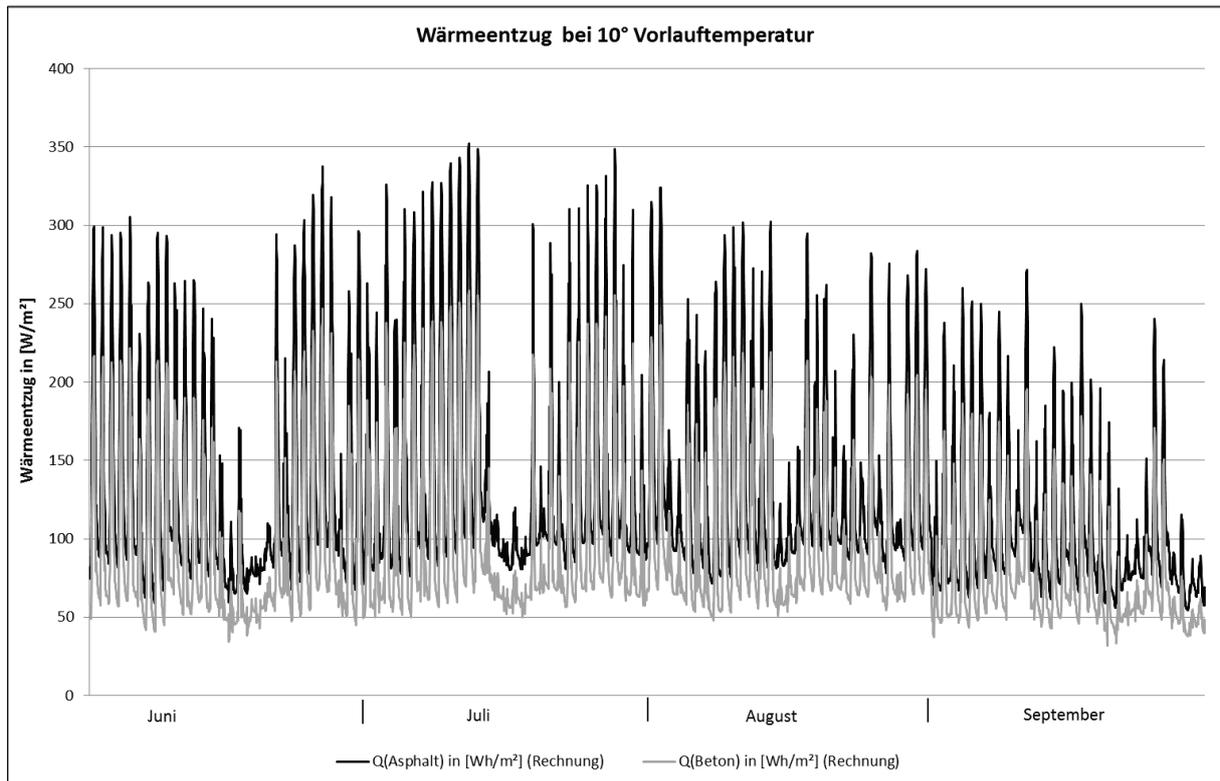


Abbildung 77: berechneter Wärmeentzug der vorhandenen Aufbauten gemäß Rechenmodell aus Kap. 2.5 bei einer Vorlauftemperatur von 10°C

Zwischen Juni und August kann bei einer Vorlauftemperatur von 10°C bei der vorliegenden Asphaltfläche ca. 100 kWh/m² im Monat entzogen werden, während der Beton um ca. 30% geringere spezifische Entzugsmengen im Umfang von ca. 70 kWh/m² und Monat aufweist. Im September nimmt die Entzugsleistung beider Flächen um bereits 30% gegenüber dem Hochsommer ab.

⁷² Halbsynthetischer Klimadatensatz für den Zeitraum von 1980 bis 2010, berechnet und zur Verfügung gestellt durch Dr. Klaus Kreč

⁷³ Bei einer Windgeschwindigkeit von 10,6 km/h was einen mittleren Wärmeübergangskoeffizienten von 12 W/m²K ergibt (vereinfachte Annahme lt. Wistuba et.al. (2001)).

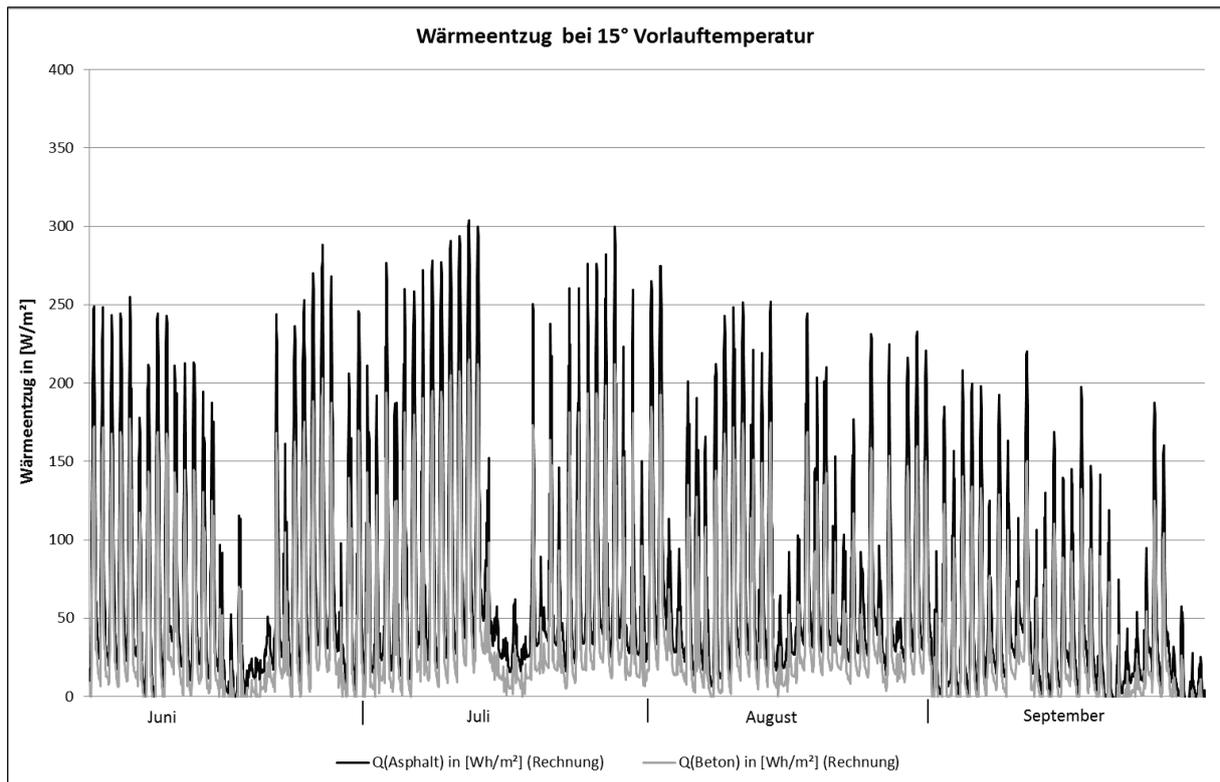


Abbildung 78: berechneter Wärmeentzug der vorhandenen Aufbauten gemäß Rechenmodell aus Kap. 2.5 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C

Bei einer Vorlauftemperatur von 15°C nimmt der monatliche Wärmeentzug gegenüber dem Wärmeentzug bei 10° Vorlauftemperatur um ca. 50% ab. Im September kann nur mehr die Hälfte der im Hochsommer entzogenen Wärmemenge entnommen werden.

Zusammenfassend beträgt der sommerliche Wärmeentzug zwischen Juni und September je nach Vorlauftemperatur ca. zwischen 200 und 380 kWh/m² für den Asphalt bzw. zwischen 120 und 260 kWh/m²a und für den Beton (jeweils unter Berücksichtigung der vorhandenen Gegebenheiten der Aufbauten – wie Dicke und Rohrabstand).

Tabelle 12: monatlicher Wärmeentzug in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur

monatlicher Wärmeentzug für den Monat:	Vorlauftemperatur = 10°C		Vorlauftemperatur = 12,5°C		Vorlauftemperatur = 15°C	
	Asphalt	Beton	Asphalt	Beton	Asphalt	Beton
Juni	96 kWh/m ²	67 kWh/m ²	75 kWh/m ²	49 kWh/m ²	53 kWh/m ²	31 kWh/m ²
Juli	106 kWh/m ²	74 kWh/m ²	84 kWh/m ²	56 kWh/m ²	62 kWh/m ²	38 kWh/m ²
August	101 kWh/m ²	70 kWh/m ²	78 kWh/m ²	52 kWh/m ²	56 kWh/m ²	33 kWh/m ²
September	75 kWh/m ²	52 kWh/m ²	53 kWh/m ²	34 kWh/m ²	31 kWh/m ²	16 kWh/m ²
sommerlicher Jahresertrag	378 kWh/m²a	263 kWh/m²a	290 kWh/m²a	191 kWh/m²a	202 kWh/m²a	118 kWh/m²a

Die berechneten Werte stimmen gut mit den Literaturangaben überein, wo beispielsweise für das Road Energy System© in den Niederlanden jährliche Entzugsmengen von 250 kWh/m²a für Asphaltflächen angegeben werden.⁷⁴ Wobei hier angemerkt werden muss, dass die Vorlauftemperaturen sowie die Durchflussmengen dieses Systems nicht bekannt sind.

⁷⁴ Sullivan et al.

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird eine sommerliche Entzugsleistung von 300 kWh/m²a angenommen, dies entspricht in etwa der Entzugsleistung der Asphaltfläche bei 12,5°C⁷⁵ Vorlauftemperatur.

Als theoretische maximale Entzugsleistung wird die Entzugsleistung des Asphalts bei einer Solarstrahlung von 1000 W/m², einer Windgeschwindigkeit von 0,5 km/h (Windstille) und einer Außenlufttemperatur von 30-35°C bei einer Vorlauftemperatur von 12,5°C lt. Rechenmodell aus Kap. 2.5 mit 400 W/m² angenommen. Praktisch werden sich maximale Entzugsleistungen von 300 W/m² (s. Messergebnisse Kap. 2.4.1) ergeben.

zu 3) Winterbetrieb: Eisfreihaltung

In Österreich werden jährlich ca. 92.000 Tonnen Streusalz zur Eis- und Schneefreihaltung von Autobahnen und Schnellstraßen verbraucht, dabei sind kommunale Winterdienste und Bundesstraßen noch nicht berücksichtigt⁷⁶. Neben den ökologischen Auswirkungen auf die Böden und die Vegetation durch Versäuerung gelangen durch die Entwässerung der Straßen Streusalze in Kläranlagen, wo diese weder abgeschieden noch abgebaut werden können. Die Streusalze verursachen zudem in einem nicht unerheblichen Umfang Schäden an Bauwerken und an der Straße selbst.

Projekte zur Eisfreihaltung von Straßen wurden sowohl in den USA, Japan als auch Europa umfangreich dokumentiert (vgl. Kap. 1.2.1). Die erforderlichen Energiemengen und Wärmeleistungen variieren jedoch teilweise aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen (Klimabedingungen, Straßenaufbau, Verwendungszweck, etc.) stark weshalb eine pauschale Aussage auf Basis der vorhandenen Projekte nicht getroffen werden kann.

Zur Abschätzung der notwendigen jährlichen Energiemenge sowie der maximalen Wärmeleistung für die Eis- und Schneefreihaltung für das vorhandene Projekt wird deshalb das aufgestellte und validierte Modell aus Kap. 2.5.2 herangezogen.

Zur Abschätzung der notwendigen jährlichen Energiemenge werden dabei folgende Randbedingungen angenommen:

- Temperierung der Straße ab einer Außenlufttemperatur von 4°C
- Konstante Temperierung des Belages mit 4°C bei Unterschreitung der Außenlufttemperatur von 4°C
- Durchschnittliche Luftgeschwindigkeit von 10,8 km/h (Mittelwert zwischen mäßigem und starkem Wind)
- Globalstrahlung = 0

⁷⁵ Die mittlere Temperatur des Wiener Grundwassers beträgt 12,7°C (aus: Schartner/Kralik (2011)).

⁷⁶ https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20130103_OTS0034/asfinag-optimierter-salzverbrauch-durch-high-tech-bild [abgerufen am 28.07.2017]

Während im Sommer die Oberflächentemperatur der Straße hauptsächlich von der Strahlungsbilanz beeinflusst wird, wird in den Wintermonaten die Energiebilanz maßgeblich von dem fühlbaren Wärmestrom bestimmt, während sich der Bodenwärmestrom und die Strahlung einigermaßen ausgleichen.

Unter Annahme der oben genannten Randbedingungen kann deshalb folgende vereinfachte Gleichung für die zur Eisfreihaltung notwendige Energiemenge für den Winter aufgestellt werden:

Formel 13: vereinfachte Berechnung der Energiemenge zur Eisfreihaltung

$$\dot{Q} = \alpha_K * \sum_{t=1}^n (T_L - T_O)_n * \Delta t_n = 7 * \sqrt{v} * \sum_{t=1}^n (T_L - T_O)_n * \Delta t_n = 12 \frac{W}{m^2 K} * \sum_{t=1}^n (T_L - T_O)_n * \Delta t_n$$

n = Anzahl der Stunden im Jahr unter 4°C

Für die Temperaturdifferenz $T_L - T_O$ wurde für Wien (innere Stadt) an den Tagen unter 4°C die gewichtete mittlere Außenlufttemperatur⁷⁷ multipliziert mit der Zeit, um somit die Heizgradstunden für die Beheizung der Straßenoberfläche zu erhalten. Insgesamt ergeben sich dabei 6491 Kh.

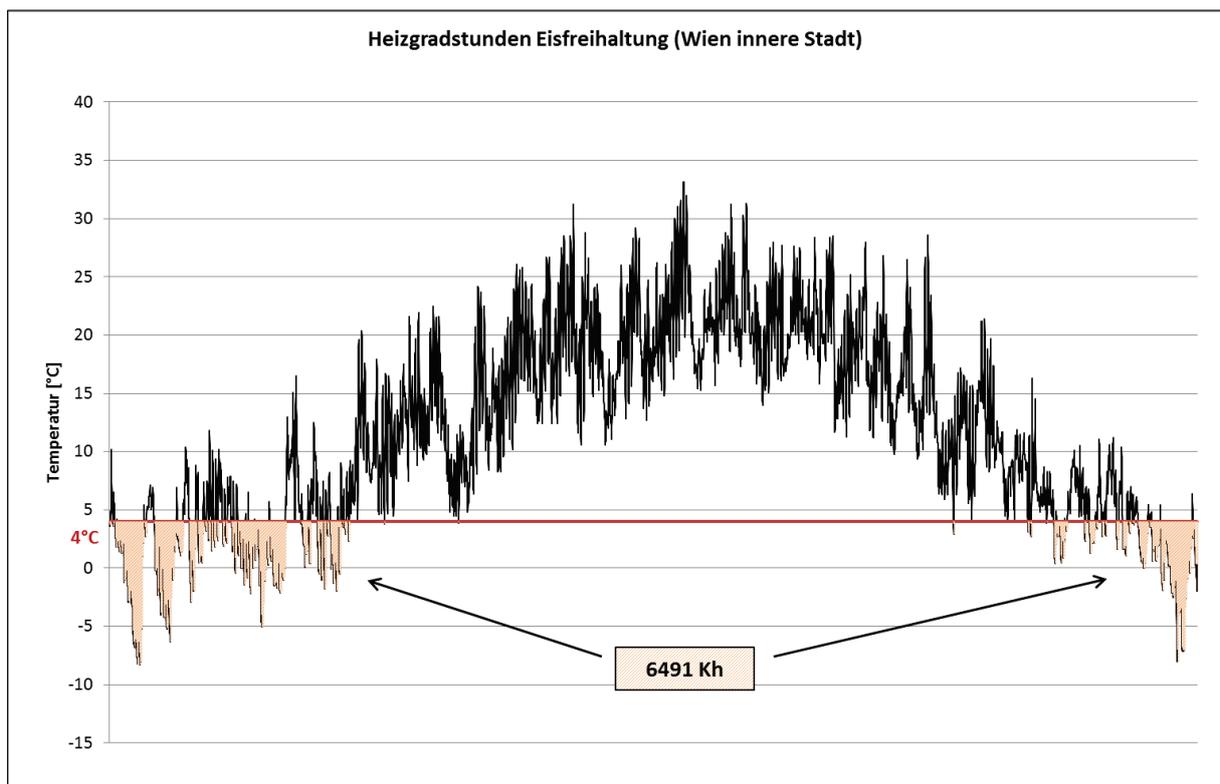


Abbildung 79: Berechnung der Heizgradstunden für Wien-Innere Stadt

⁷⁷ Halbsynthetischer Klimadatensatz für den Zeitraum von 1980 bis 2010, berechnet und zur Verfügung gestellt durch Dr. Klaus Kreč

Multipliziert man die ermittelten Heizgradstunden für die Eisfreihaltung mit dem Faktor für den Wärmeübergang so erhält man eine Energiemenge von $6491 \text{ [Kh]} \cdot 12 \text{ [W/m}^2\text{K]} = 78 \text{ kWh/m}^2$ für die jährliche Eisfreihaltung.

Dieser Wert passt gut mit vorhandenen Literaturdaten überein, wo z.B. beim Projekt SERSO für die Eis- und Schneefreihaltung ein Energieumsatz zwischen 50 und 96 kWh/m^2 pro Jahr gebraucht wurde (Messwerte von 1994-2000).⁷⁸ Bei japanischen Projekten wurden bei jährlichen Schneefallhöhen zwischen $2,4 \text{ m}$ und 8 m in Ninhoe 92 kWh/m^2 und in Aomori 55 kWh/m^2 für die Eis- und Schneefreihaltung benötigt.⁷⁹

Zur Berechnung der maximalen Wärmeleistung werden entsprechend des Modells in Kap. 2.5.2 folgende konservative Randbedingungen angesetzt:

- Globalstrahlung = 0
- Lufttemperatur = $-8,3$ ⁸⁰
- Oberflächentemperaturen Asphalt und Beton = 4°C
- Erdreichtemperatur in 25-50 cm Tiefe = 0°C
- Windgeschwindigkeit = 25 km/h (Sturm)

Ohne Schneefall ergeben sich damit bereits maximale Wärmeleistungen von ca. 350 W/m^2 . Bei entsprechend höheren Außentemperaturen (-2°C) und nur starkem Wind (13 km/h) ergeben sich Leistungen von ca. 200 W/m^2

Summe aller Energieübergänge an der Oberfläche							
$Q_{\text{net}} = Q + B + H + V = 0$							
Q_k	kurzwellige Strahlungsbilanz	0,00	0,00	W/m^2	Globalstrahlung	0	$0,00 \text{ W/m}^2$
Q_l	langwellige Strahlungsbilanz	-104,61	-104,61	W/m^2	Lufttemperatur	-8,3	$264,85 \text{ K}$
B	Bodenwärmestrom	-33,59	-26,37	W/m^2	Oberflächentemperatur Asphalt	4	$277,15 \text{ K}$
H	fühlbarer Wärmestrom	-226,89	-226,89	W/m^2	Oberflächentemperatur Beton	4	$277,15 \text{ K}$
V	latenter Wärmestrom	0,00	0,00		Erdreichtemperatur-20	0	$273,15 \text{ K}$
Q_{net}		-365,09	-357,87		Windgeschwindigkeit	25	$6,94 \text{ m/s}$

Summe aller Energieübergänge an der Oberfläche							
$Q_{\text{net}} = Q + B + H + V = 0$							
Q_k	kurzwellige Strahlungsbilanz	0,00	0,00	W/m^2	Globalstrahlung	0	$0,00 \text{ W/m}^2$
Q_l	langwellige Strahlungsbilanz	-83,59	-83,59	W/m^2	Lufttemperatur	-2	$271,15 \text{ K}$
B	Bodenwärmestrom	-33,59	-26,37	W/m^2	Oberflächentemperatur Asphalt	4	$277,15 \text{ K}$
H	fühlbarer Wärmestrom	-79,81	-79,81	W/m^2	Oberflächentemperatur Beton	4	$277,15 \text{ K}$
V	latenter Wärmestrom	0,00	0,00		Erdreichtemperatur-20	0	$273,15 \text{ K}$
Q_{net}		-196,99	-189,77		Windgeschwindigkeit	13	$3,61 \text{ m/s}$

Abbildung 80: Berechnung der maximalen zu bereitstellenden Wärmeleistungen für die Eisfreihaltung mit unterschiedlichen Randbedingungen

⁷⁸ Vgl. Meschter (1999)

⁷⁹ Vgl. Würtele (2005)

⁸⁰ Minimale Lufttemperatur aus dem halbsynthetischen Klimadatensatz für den Zeitraum von 1980 bis 2010, berechnet und zur Verfügung gestellt durch Dr. Klaus Kreč

Im Fall eines Regen- oder Schneefalls treten jedoch völlig andere Leistungsspitzen auf, da hier auch die Erwärmungstemperatur des Wassers sowie die Schmelztemperatur hinzugerechnet werden muss. Rein rechnerisch müssen bei einem starken Schneefall Werte von ca. 500 W/m² für die Schneefreihaltung hinzugerechnet werden.⁸¹

Insgesamt ergeben sich damit Leistungsspitzen von über 700 W/m² wenn schlechte Bedingungen herrschen (starker Schneefall, Sturm, extrem niedrige Temperaturen).

Gemessene Werte von umgesetzten Projekten zeigen zwar auch einen signifikanten Anteil zur Schneefreihaltung, Leistungsspitzen von über 700 W/m² werden jedoch nur in sehr schneereichen Regionen z.B. in den USA gemessen. Im Durchschnitt werden Leistungsspitzen von max. 200-300 W/m² zur Eis- und Schneefreihaltung für europäische Projekte dokumentiert.⁸²

zu 2) Einspeicherung

Aufgrund der Phasenverschiebung zwischen Energiegewinnung im Sommer und Wärmebedarf im Winter ist es sinnvoll, saisonale Speicherkonzepte in das Anlagenkonzept einzubinden. Dazu eignen sich Erdspeicher in Form von Flach- oder Tiefspeichern (Sondenfelder), siehe Kap. 2.7.2. Da es sich hierbei in der Regel um offene Systeme handelt, ist mit ständigen Wärmeverlusten in das umliegende, nicht aktivierte Erdreich v.a. im Sommer zu rechnen, wenn die Wärme aus der versiegelten Fläche abgezogen und über Rohre an das Speichermaterial übergeben wird. Ist das unmittelbar aktivierbare Erdspeichervolumen zu klein dimensioniert, kann die Wärme nicht entsprechend abgeführt werden. Im Winter stünde daher weniger Wärmeenergie der Eisfreihaltung zur Verfügung.

Aus diesem Grund sind folgende Randbedingungen anzustellen, um eine sinnvolle Speichergröße abschätzen zu können:

- Größe der eisfrei zu haltenden Fläche
- umsetzbare Bauweise des Speichers (Sondenfeld oder Flachspeicher) aufgrund baulicher Randbedingungen (Situierung) inkl. Form des Speichers
- Form des Speichers (kugelförmig, flach mit unterschiedlich großen Ausdehnungen in alle Richtungen -> Oberflächen-Volumen-Verhältnis)
- notwendige Betriebszeit bzw. Spitzen- und Dauerlast im Winter
- Möglichkeit der Wärmedämmung an der Geländeoberkante bzw. Perimeterdämmung umlaufend

Ausgehend von einer im Sommer anfallenden Wärmemenge von ca. 250 kWh/m² Absorberfläche (siehe obenstehend: oberer Wert für Beton und unterer für Asphalt) hängt die Speichergröße maßgeblich von den tolerierbaren Verlusten ab. Da erst ab einer gewissen Größenordnung eines Erdspeichers von saisonalen Speichern ausgegangen werden kann, ergibt sich sozusagen im Umkehrschluss eine Art Mindestfläche, die eisfrei gehalten werden

⁸¹ Vgl. Kaller (2007), S.20-29

⁸² Vgl. Würtele (2005), Kaller (2007)

kann. Ab ca. 100 m³ Speichervolumen ergibt sich ein Verhältnis von Speicherkapazität zu Wärmeverlust von 1:1 bei moderaten Dämmstärken von 0,2 m bei zylindrischen Formen (Abbildung 66). Ab ca. 1.000 m³ wird dieses Verhältnis mit ca. 2:1 günstiger und die benötigten Wärmemengen zur aktiven Regeneration des Speichers im Sommer werden geringer.

Folgendes Beispiel soll die Größenordnungen veranschaulichen:

Annahme: Eisfreihaltung eines 100 m langen Straßenabschnitts mit 2 Fahrstreifen à 2,5 m Breite (500 m²).

Benötigte Wärmemenge in der Wintersaison zur Eisfreihaltung: ca. 80 kWh/m² -> 40.000 kWh. Diese Menge ließe sich bei Annahme von $c_p = 0,6 \text{ kWh/m}^3\text{K}$ des Erdspeichers bei einem ΔT von 10 K in ca. 6.700 m³ speichern. Aufgrund der Wärmeverluste und einem angestrebten Kapazitäts-Verlust-Verhältnis von 0,25⁸³ – gültig für zylindrische Speicher mit moderater Wärmedämmung – werden ca. 9.000 m³ erforderlich, die ca. 54.000 kWh Speicherkapazität bei gleicher Temperaturdifferenz aufweisen.

Bei einem Einspeisepotential im Sommer von 250 kWh/m² Absorberfläche wären demnach 216 m² als „Fahrbahnkollektor“ ausreichend, jedoch ist im Winter die gesamte Fläche eisfrei zu halten.

Bei Verkleinerung des Speichers wird das Oberflächen-Volumen-Verhältnis zunehmend ungünstiger, weshalb dieser Abschätzungsvorgang iterativ vorgenommen werden muss. Da sämtliche Annahmen sehr starke Schwankungsbreiten aufweisen, liegt man mit dieser Größenordnung auf der sicheren Seite.

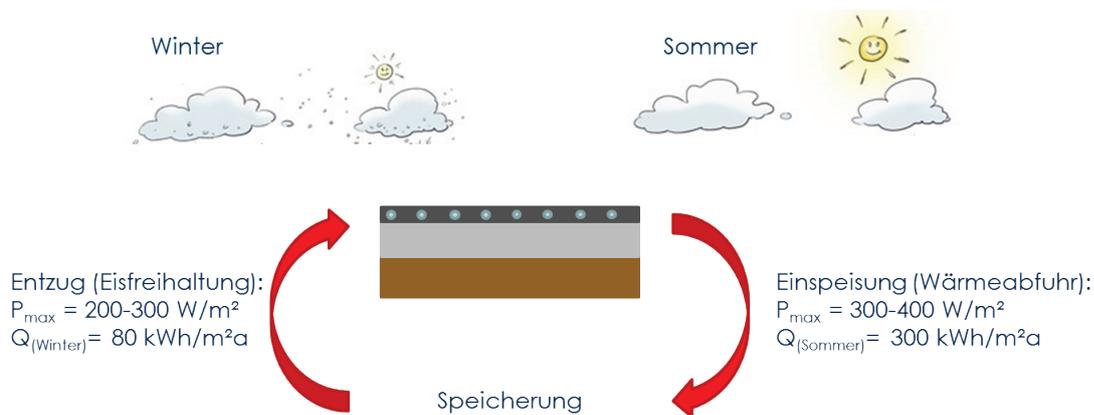


Abbildung 81: phasenverschobene Nutzung der im Sommer entzogenen Energie zur Eisfreihaltung

2.8.2.3 Heizwärme- und Warmwasserwärmebereitstellung von Gebäuden

Heizungs- und Warmwasseranwendungen benötigen in der Regel einen Temperaturbereich von 25 bis 65 °C. Stehen diese nicht unmittelbar über einen längeren Zeitraum von z.B. mehreren Stunden zur Verfügung, wie hier im Fall von Fahrbahnflächen im Sommer, ist die Temperaturdifferenz durch ein Zusatzheizsystem zur Verfügung zu stellen. Dabei kann die

⁸³ Vgl. Abbildung 66: Volumenbezogene Wärmeverluste, Kap.2.7.2.2

Zeitspanne zwischen Wärmeerzeugung und -bedarf unterschiedlich lange sein, je nachdem welches Gebäudekonzept zugrunde liegt. Thermisch trägere Gebäude reagieren bei Heizungsunterbrechungen mit weniger großen Innentemperaturabsenkungen als Leichtbauweisen bzw. Bestandsbauten mit unsanierter thermischer Gebäudehülle. Nachfolgend sollen zwei Konzepte mit unterschiedlich großer Phasenverschiebung näher betrachtet werden.

Große Phasenverschiebung (saisonal)

Bei einer Phasenverschiebung in der Größenordnung von ca. einem halben Jahr sind demnach saisonale Speicher erforderlich, um die gewonnenen Wärmemengen im Sommer für die Heizperiode zur Verfügung zu stellen. Bekannte Beispiele wie z.B. Sonnenhäuser⁸⁴ bedienen sich großer, gedämmter zylindrischer Wasserspeicher mit Größen über 10 m³, die mittels Solarkollektoren am Gebäude erwärmt werden.

Im konkreten Fall von Fahrbahnkollektoren steht ein Wärmepotential im Sommer zur Verfügung, das ebenfalls im Winter genutzt werden kann, sofern ein entsprechender Saisonspeicher zur Verfügung steht. Aufgrund des deutlich niedrigeren Temperaturniveaus im Vergleich zur klassischen Solarthermie kann hier das Konzept mit einem Erdspeicher in Kombination mit dem Nachheizsystem Erdwärmepumpe angewandt werden.

Zur Heiz- und Warmwasserwärmebereitstellung in Kombination mit Wärmepumpen sind möglichst hohe Quellentemperaturen v.a. im Winter anzustreben, wenn neben benötigtem Brauchwarmwasser auch die Heizwärme parallel bereitgestellt werden muss. Jedes Grad höhere Quellentemperatur erhöht den COP einer Wärmepumpe, weshalb eine Regeneration der Quelle Sinn macht. Aktivierte, horizontale versiegelte Flächen können insofern gut genutzt werden, indem durch aktive Regeneration des Erdreichs im Sommer für den Heizfall höhere Quellentemperaturen vorhanden sind. Gleichzeitig kann damit die Oberflächentemperatur der Fahrbahnabsorber abgesenkt werden, wodurch wie im Fall der direkten Nutzung in Kap. 2.8.1.4 städtischen Hitzeinseln entgegengewirkt werden kann.

Für die Heizwärme- und Warmwasserbereitstellung von Gebäuden wird angenommen, dass jeder Straßenabschnitt mit einem Erdspeicher des nebenstehenden Gebäudes in Verbindung steht. Hierbei kann es sich sowohl um Flachspeicher als auch um Tiefensondenfelder handeln. Da bei angestrebter saisonaler Phasenverschiebung eine gewisse Speichergrößenordnung (> 1.000 m³) erforderlich ist, ist eine Kopplung solcher Straßenabschnitte mit wenigen Wohneinheiten ökonomisch nicht sinnvoll. Ein- und Mehrfamilienhäuser würden einen unverhältnismäßig großen Speicher benötigen im Vergleich zu üblich benötigten wenigen Tiefensonden bzw. Erdkollektorflächen, um das sommerliche – durch aktive Regeneration – Temperaturniveau bis zum Ende einer Heizperiode nutzen zu können. Kleine Speicher um die 100 m³ für z.B. ein bis zwei Wohneinheiten hingegen sind mit Ihren verhältnismäßig großen

⁸⁴ www.sonnenhaus.co.at [abgerufen am 01.02.2017]

Verlusten ebenso unwirtschaftlich, was im Zuge eines Passivhauses mit Erdspeicher und solarthermischer Regeneration zeigte.⁸⁵

Kleine Phasenverschiebung (Stunden)

Die Phasenverschiebung kann jedoch, wie im obigen Kap. 2.8.1.4 bereits kurz erwähnt, auch derart kurz sein, dass zwischen Regeneration und Wärmebedarf wenige Stunden auftreten. Hier kann die Speicherkapazität von Saisonspeichern nicht sinnvoll zur Anwendung kommen, sondern vielmehr jene von vorhandenen Teilen im Gebäude wie z.B. klassische Wasserspeicher oder Massivbauteile wie Betondecken. Speziell in den Übergangszeiten kann mit Temperaturniveaus gerechnet werden, die sowohl zur Heizungsunterstützung (eher bei Wohngebäuden) als auch zur Kühlung (eher Nicht-Wohngebäude) verwendet werden können.

Liegen die Rücklauftemperaturen aus dem Absorber im letzteren Fall tiefer als ca. 20 °C, kann damit mittels Bauteilaktivierung direkt gekühlt werden. Eine Entladung der Betondecken mittels Bauteilaktivierung erfolgt primär in den Nachtstunden, wenn die Außentemperaturen entsprechend niedriger sind und die terrestrische Abstrahlung vorteilhaft ist. Aufgrund der Speichermasse Beton werden unter Tags niedrige Deckenoberflächentemperaturen „vorrätig“ gehalten, bis nachts erneut eine Kühlung einsetzen kann. Stehen einem Gebäude großzügige versiegelte Flächen zur Verfügung, kann auch ein Kaltwasserspeicher damit bedient werden, der höhere Kühllasten kompensiert. In der Übergangszeit werden somit die Absorberflächen im Außenraum als Wärmetauscher mit der Umwelt eingesetzt, die eine geringfügige Erwärmung erfahren.

Liegen die Rücklauftemperaturen höher als z.B. jene eines in das Konzept eingebundenen Sondenfeldes oder Erdkollektors, wäre damit ein bivalenter Betrieb der Wärmepumpe möglich (je nach Quellentemperatur wird auf die entsprechende Quelle umgeschaltet).

Die Speicherkapazität von Betonbauteilen ist hinlänglich bekannt, jedoch ist eine Anlagensimulation zwingend erforderlich, da zahlreiche haustechnische Komponenten sowie unterschiedliche Wetterbedingungen einen aufrechten Betrieb garantieren müssen. Die Dimensionierung der entsprechenden Absorberflächen hängt unmittelbar mit einem ggf. geforderten solaren Deckungsgrad zusammen, wie er bei beispielsweise bei Sonnenhäusern im Fokus steht.

⁸⁵Sören et.al. (2011)

3 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend können folgende Erkenntnisse aus dem Projekt gezogen werden:

- Befestigte Flächen weisen ein signifikantes Potential als solarthermischer Kollektor auf, dessen bereitgestellte Energiemengen weiterverwendet werden können. Bei der gegebenen Asphaltfläche konnten maximale Entzugsleistungen von 300 W/m^2 gemessen werden, die Betonfläche erzielt Werte bis 200 W/m^2 .⁸⁶
- Die entziehbaren Wärmemengen von ca. 250 kWh/m^2 in den Sommermonaten können in Erdspeicher ab einer Größenordnung von ca. 1.000 m^3 mit vertretbaren Verlusten gepuffert und phasenverschoben wieder genutzt werden.
- Bei unmittelbarer zeitgleicher Nutzung kann das Rücklauf temperaturniveau in Kombination mit einer Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung im Sommer genutzt werden, wodurch der SCOP im Vergleich zu herkömmlichen Sole-Wasser-Systemen ohne aktive Regeneration des Erdreichs erhöht wird.
- In den Übergangszeiten können die Absorber als Wärmetauscher v.a. nachts für free cooling Anwendungen (z.B. in Verbindung mit Bauteilaktivierung) genutzt werden, sofern die Reduktion der Oberflächentemperatur nicht im Fokus steht.
- Die Wärmeabstrahlung befestigter Flächen beeinflusst das Behaglichkeitsempfinden maßgeblich. Eine Reduktion dieser Abstrahlung durch die Reduktion der Oberflächentemperaturen mittels Wärmeentzug führt zu einer Reduzierung der empfundenen Temperatur und damit zu einer Erhöhung der Behaglichkeit.
- Durch die wesentlich geringere Oberflächentemperatur von Grünflächen im Vergleich zu versiegelten Flächen sowie deren Vermögen, durch Verdunstung eine gewisse Kühlleistung bereitzustellen, können Grünflächen wesentlich zur Verbesserung der Behaglichkeit in Städten beitragen.
- Durch Beschattungsmaßnahmen von befestigten Straßenflächen (z.B. durch Gebäude, architektonische Überhänge, Bäume, Überdachungen, etc.) ergeben sich signifikant niedrigere Oberflächentemperaturen, womit die Behaglichkeit einfacher aufrechterhalten werden kann. Der Effekt reiner Beschattungsmaßnahmen (ohne darüber liegender Evapotranspiration von Vegetation) ist allerdings weniger effektiv als ein Wärmeentzug der befestigten Fläche. Beschattungsmaßnahmen durch vegetative Systeme (z.B. Bäume) sind aufgrund der Verdunstungsprozesse positiver zu bewerten.

Die Projektergebnisse sind sowohl für Straßen- und Stadtplaner sowie Straßenbauunternehmen und Material- bzw. Komponentenhersteller (Asphalt, Beton,

⁸⁶ Rohrabstand Asphalt = 15cm, Beton = 28cm. Dicke Asphalt = 8 cm, Beton = 18cm

Rohrregister, Speichersysteme, Wärmepumpen etc.) als auch für Straßen- und Wegeerhalter interessant. Diesbezüglich wurden bereits erste Gespräche mit Straßeneigentümern und -erhaltern durchgeführt, in denen sich gezeigt hat, dass diese v.a. an der phasenverschobenen Nutzung zur Eisfreihaltung interessiert sind. Die Absenkung der sommerlichen Oberflächentemperatur ist dabei aus Sicht der Straßenerhalter weniger in Bezug auf die Hitzeinselthematik sondern mehr in Hinblick auf die Spurrillenbildung als vielversprechend bewertet worden.

Das Sondierungsprojekt konnte sowohl das Potential zur Reduzierung von städtischen Hitzeinseln als auch das Potential zur Wärme Gewinnung und -nutzung aufzeigen. In einem nächsten Schritt sollen die Projektergebnisse gemeinsam mit Projektpartnern aus der Politik und Wirtschaft anhand eines Folgeprojektes weiterverfolgt und in einem Demonstrationsvorhaben umgesetzt werden.

4 Ausblick und Empfehlungen

Durch die signifikante Reduktion der Oberflächentemperaturen der thermisch aktivierten versiegelten Flächen, als auch durch die dadurch merkliche Beeinflussung der Wärmeabstrahlungsleistung auf die Energiebilanzgleichung, konnte die Verbesserung der thermischen Behaglichkeit für im Umfeld befindliche Personen und damit auch das Potential zur Reduktion städtischer Hitzeinseln aufgezeigt werden. Die kritische Größe zur Beurteilung des thermischen Komforts im Außenbereich ist die mittlere Strahlungstemperatur⁸⁷, deren Berechnung sich im Außenbereich als äußerst komplex gestaltet, insbesondere wenn es sich um komplizierte Stadt- und Platzstrukturen und wechselnde Solarstrahlungsverhältnisse handelt. Für eine detaillierte Beurteilung der operativen Temperatur müssen deshalb in einem nächsten Schritt verschiedene Stadtgeometrien bei unterschiedlichen Klimarandbedingungen betrachtet werden. Unklar ist, inwieweit ein großflächiger Wärmeentzug dem Hitzeinseleffekt bzw. der Strahlungstemperatur zahlenmäßig entgegenwirken kann. Eine detaillierte Simulation einer Stadt bzw. eines Stadtquartiers ist auch hier als weiterführende Forschungsarbeit notwendig.

Durch die Messergebnisse konnte jedenfalls aufgezeigt werden, dass die resultierenden Oberflächentemperaturen nicht nur durch die Klimarandbedingungen wie Solarstrahlung, Temperatur und Windgeschwindigkeit, sondern auch durch die Wärmetransportmechanismen mit dem Erdreich sowie der Wärmespeicherung des Erdreiches und der versiegelten Fläche selbst bestimmt werden. Insofern zeigt eine, wie in diesem Sondierungsprojekt durchgeführte, stationäre Betrachtung nur Potentiale und Richtungen auf. Beispielsweise variiert die hier aufgestellte Kollektorgleichung stark mit den Randbedingungen, hier muss v.a. der Einfluss der Erdreichankoppelung auch zeitabhängig betrachtet werden, wodurch diese Vorgänge stark instationär ablaufen und damit eine Simulation im Zeitschrittverfahren unumgänglich wird. Vor allem der erhöhte Wärmefluss zwischen dem Straßenrandbereich und der angrenzenden Umgebung muss in der Praxis im Gegensatz zu den Testflächen in die Betrachtung miteinbezogen werden.⁸⁸

Gleichzeitig zeigt sich, dass die hier vorhandene Asphaltfläche zwar effizienter zum Wärmeentzug geeignet ist als die Betonfläche, allerdings ist der Bauteilaufbau samt Rohrregister jeweils unterschiedlich. Schlüsse auf den besseren Wärmeentzug durch die engere Rohrverlegung im Asphalt sowie durch die geringere Dicke der Asphaltsschicht lassen sich aus den Ergebnissen nur zum Teil ableiten, weshalb eine detaillierte Betrachtung des Einflusses dieser Rahmenbedingungen in einem nächsten Schritt unbedingt notwendig ist.

Für die Umsetzung in einem realen Umfeld müssen auch zahlreiche praktische Überlegungen angestellt werden. Beispielsweise sind Fragen bezüglich der Sanierbarkeit, der Auswechselbarkeit sowie der Flexibilität gegenüber Einbauten offen.

⁸⁷ Ali Toudert (2005)

⁸⁸ Vgl. Kreč (2008)

Nicht zuletzt bleibt auch die Frage nach der jeweils wirtschaftlich sinnvollsten Methode je Anwendungsfall ungeklärt. In der hier vorliegenden Arbeit konnten zwar technisch mögliche Anwendungspotentiale aufgezeigt werden, in einem nächsten Schritt müssen diese detailliert auf ihre ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit lebenszyklisch betrachtet werden. Dabei spielt nicht nur der genaue Einsatzort mit seinen vorgegebenen Umweltrandbedingungen eine Rolle, auch muss eine geeignete Regelstrategie für das jeweilige zur Anwendung kommende Nutzungskonzept entwickelt werden.

Erst wenn die oben genannten Fragestellungen beantwortet sind, kann die Umsetzung in einem realen Umfeld erfolgen.

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsgelände HTL Krems (links: ARBÖ, Bildmitte: Versuchsflächen, vorne Beton hinten Asphalt)

Abbildung 2: Versuchsgelände HTL Krems (vorne: Kunstrasenfläche, hinten: Versuchskubus mit Pufferspeicher, Wärmepumpe, E-Verteilung und EDV-Ausstattung)

Abbildung 3: Wärmeleistung unterschiedlicher Oberflächen (Beton, Asphalt und Kunstrasen) aus den Ergebnissen des Vorprojektes

Abbildung 4: Kerntemperaturen der Versuchsflächen aus den Ergebnissen des Vorprojektes

Abbildung 5: Entzugsleistung Asphalt in Abhängigkeit der Kern- und Vorlauftemperaturen sowie der daraus resultierenden Temperaturspreizung aus den Ergebnissen des Vorprojektes

Abbildung 6: Entzugsleistung Beton in Abhängigkeit der Kern- und Vorlauftemperaturen (Vorprojekt)

Abbildung 7: Entzugsleistung Kunstrasen in Abhängigkeit der Kern- und Vorlauftemperaturen (Vorprojekt)

Abbildung 8: Lageplan Versuchsanlage, M 1:500

Abbildung 9: Ansicht der Versuchsanlage aus Richtung Nordwest

Abbildung 10: Ansicht der Versuchsanlage aus Richtung Südost

Abbildung 11: Aufbau Versuchsflächen (Schnitt)

Abbildung 12: Mess-, Steuer-, Regel- und Leittechnik in der Schnauer-Garage

Abbildung 13: Hydraulikschema des vorhandenen Versuchsaufbaus

Abbildung 14: Anordnung der Messsensoren über der Versuchsfläche

Abbildung 15: Beschreibung der Mess-Sensorik

Abbildung 16: Wetterstation Versuchsanlage

Abbildung 17: Vollbesonnung der einzelnen Flächen (ohne Werbetafel)

Abbildung 18: Beschattung der Asphaltfläche durch Partyzelt - Ansicht Südost (15. Mai, 8:30).

Abbildung 19: Beschattung der Asphaltfläche durch Partyzelt - Ansicht Nordwest (15. Mai, 16:30).

Abbildung 20: Lufttemperatur über den Versuchsflächen bei Szenario 0 (keine Wärmeabfuhr), 27.-29.7.2016

Abbildung 21: Oberflächentemperatur der Versuchsflächen bei Szenario 0 (keine Wärmeabfuhr), 27.-29.7.2016

Abbildung 22: operative Temperatur über den Versuchsflächen bei Szenario 0 (keine Wärmeabfuhr) 27. - 29.7.2016

Abbildung 23: Lufttemperatur über Asphaltflächen bei 20°C Vorlauftemperatur

Abbildung 24: Oberflächentemperatur Asphaltflächen bei 20°C Vorlauftemperatur

Abbildung 25: operative Temperatur über Asphaltflächen bei 20°C Vorlauftemperatur

Abbildung 26: Lufttemperatur über Asphaltflächen bei 15°C Vorlauftemperatur

Abbildung 27: Oberflächentemperatur Asphaltflächen bei 15°C Vorlauftemperatur
Abbildung 28: operative Temperatur über Asphaltflächen bei 15°C Vorlauftemperatur
Abbildung 29: Lufttemperatur über Asphaltflächen bei 10°C Vorlauftemperatur
Abbildung 30: Oberflächentemperatur bei 10°C Vorlauftemperatur
Abbildung 31: operative Temperatur über Asphaltflächen bei 10°C Vorlauftemperatur
Abbildung 32: Lufttemperatur bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen (Asphalt und Beton)
Abbildung 33: Oberflächentemperatur bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen (Asphalt und Beton)
Abbildung 34: operative Temperatur bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen (Asphalt und Beton)
Abbildung 35: Oberflächentemperatur Asphalt mit und ohne Verschattungselement
Abbildung 36: Oberflächentemperatur Beton mit und ohne Verschattungselement
Abbildung 37: Verlauf der Vorlauf- und Kerntemperaturen Asphalt bei unterschiedlichen Szenarien
Abbildung 38: Verlauf der Vorlauf- und Kerntemperaturen Beton bei unterschiedlichen Szenarien
Abbildung 39: Wärmeentzug der Flächen im Vergleich bei 10°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Solarstrahlung
Abbildung 40: Wärmeentzug Asphalt bei 10°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung
Abbildung 41: Wärmeentzug Beton bei 10°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung
Abbildung 42: Wärmeentzug Grasfläche bei 10°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung
Abbildung 43: durchschnittliche Entzugsleistungen der Versuchsflächen zwischen 10:00 und 16:00 bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen
Abbildung 44: entzogene Wärmemenge der Versuchsflächen bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen
Abbildung 45: Abnahme der Entzugsleistung durch Verschattungsmaßnahmen bei 10°C Vorlauftemperatur (Beton)
Abbildung 46: Abnahme der Entzugsleistung durch Verschattungsmaßnahmen bei 20°C Vorlauftemperatur (Beton und Asphalt)
Abbildung 47: Entzugsleistung in Abhängigkeit der Temperaturspreizung zwischen Absorber(Kern)- und Vorlauftemperatur (aus den Messergebnissen bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen)
Abbildung 48: Wärmetransportmechanismen Straße
Abbildung 49: messtechnischer Zusammenhang zwischen der Absorber- und der Oberflächentemperatur
Abbildung 50: Vergleich der gemessenen und berechneten Entzugsleistungen bei 10°C Vorlauftemperatur
Abbildung 51: Vergleich der gemessenen und berechneten Entzugsleistungen bei 15°C Vorlauftemperatur

Abbildung 52: Vergleich der gemessenen und berechneten Oberflächentemperatur bei 10°C Vorlauftemperatur

Abbildung 53: Vergleich der gemessenen und berechneten Oberflächentemperatur bei 15°C Vorlauftemperatur

Abbildung 54: Entzugsleistung und Oberflächentemperatur des Vergleichsszenarios in Abhängigkeit der Klimarandbedingungen

Abbildung 55: Klimarandbedingungen sonniger und bewölkter Tag

Abbildung 56: schematische Darstellung der Energieströme, Wärmequellen und Komponenten einer Eisspeicher-Solar-Wärmepumpen Kombination

Abbildung 57: A - Direktverdampfer mit Kältemittel, B - Lufteinperlung, C - Kühlwasserkreis, ©Siemens AG

Abbildung 58: A - Eisspeicher, B - Ausdehnungsgefäß, C - Umstellventil, ©Siemens AG³³

Abbildung 59: Zisterne Eisspeicher mit spiralförmig angeordneten Wärmetauscherrohren

Abbildung 60: Phasenwechsel im Eisspeicher - Arbeitsbereich eines Eisspeichers in einer Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlage, ©Viessmann

Abbildung 61: links - Eisspeicher Neustudenpark, Amriswil Einbau, rechts - Detailaufnahme Innen mit Wärmetauscherrohren

Abbildung 62: Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit der Dicke der Eisschicht des Wärmetauschermaterials und dem konvektivem Wärmeübergangskoeffizienten

Abbildung 63: typische Wirkungsgradkurven von Solarkollektoren bei 700 und 300 W/m² solarer Einstrahlung⁴³

Abbildung 64: Detailschnitt Erdspeicherkonzept Wohnsiedlung Heumatt (Zürich), ©Lemon Consult GmbH, Zürich

Abbildung 65: patentiertes eTank-System, deematrix Energiesysteme GmbH (© Sergey Kleptcha)

Abbildung 66: volumenbezogene Wärmeverluste

Abbildung 67: Draufsicht auf das Sondenfeld und Schnitt durch eine Sonde des BTES Erdspeichers

Abbildung 68: schematische Darstellung der Erweiterung eines ca. 5.000 m³ Erdspeichers (Flachspeicher) unter einer Bodenplatte eines Betriebsgebäudes nach Inbetriebnahme

Abbildung 69: eingespeicherte und entzogene Wärmemengen des BTES Bohrlochspeichers der Drake Landing Solar Community im Untersuchungszeitraum 2007 – 2011

Abbildung 70: Kerntemperaturverlauf des BTES Bohrlochspeichers der Drake Landing Solar Community im Untersuchungszeitraum 2007 - 2011

Abbildung 71: Temperaturkurve Sondenfeld bei Entladung

Abbildung 72: Wärmebilanz einer Person im Außenraum

Abbildung 73: Verhältnis der vom Boden bzw. einer nahen Wand abgestrahlten Energie zu der vom Körper absorbierten langwelligen Strahlungsenergie aus Ali Toudert (2005), S.153

Abbildung 74: vereinfachte Berechnung der operativen Temperatur mit und ohne Wärmeentzug der Straße

Abbildung 75: Vergleich der Evaporation in städtischen und ländlichen Gebieten

Abbildung 76: Rücklauftemperaturverlauf Asphalt und Beton bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen, gemessen am 17.08.2017

Abbildung 77: berechneter Wärmeentzug der vorhandenen Aufbauten gemäß Rechenmodell aus Kap. 2.5 bei einer Vorlauftemperatur von 10°C

Abbildung 78: berechneter Wärmeentzug der vorhandenen Aufbauten gemäß Rechenmodell aus Kap. 2.5 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C

Abbildung 79: Berechnung der Heizgradstunden für Wien-Innere Stadt

Abbildung 80: Berechnung der maximalen zu bereitstellenden Wärmeleistungen für die Eisfreihaltung mit unterschiedlichen Randbedingungen

Abbildung 81: phasenverschobene Nutzung der im Sommer entzogenen Energie zur Eisfreihaltung

Abbildung 82: Wärmeentzug der Asphalt- und Betonfläche im Vergleich bei 20°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Solarstrahlung

Abbildung 83: Wärmeentzug Asphalt bei 20°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

Abbildung 84: Wärmeentzug Beton bei 20°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

Abbildung 85: Wärmeentzug der Asphalt- und Betonfläche im Vergleich bei Vorlauftemperatur = Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Solarstrahlung

Abbildung 86: Wärmeentzug Asphalt bei Vorlauftemperatur = Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

Abbildung 87: Wärmeentzug Beton bei Vorlauftemperatur = Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lastenheft der künftigen Mess- und Betriebsszenarien

Tabelle 2: Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen auf die Temperatur und die Entzugsleistung der Versuchsflächen

Tabelle 3: Entzugsleistungen und Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit der Klimarandbedingungen

Tabelle 4: thermische Eigenschaften von Bodensubstraten (verändert nach VDI 4640)

Tabelle 5: Bewertung der unterschiedlichen Wärmespeichertechnologien durch die IEA/OECD-Expertengruppe „Thermal Energy Storage“

Tabelle 6: Auszug aus Wärmeschutztechnische Bemessungswerte für Baustoffe, die gewöhnlich bei Gebäuden zur Anwendung kommen (ÖNORM EN ISO 10456:2010)

Tabelle 7: Flächenspezifische Entzugsleistungen für Flachkollektoren nach VDI 4640

Tabelle 8: Längenspezifische Entzugsleistungen für Sonden für verschiedene Bodenarten in Mitteleuropa

Tabelle 9: Vergleich Merkmale und Kenngrößen Erd- und Eisspeicher

Tabelle 10: Auswirkung eines Wärmeentzuges auf die vom Körper absorbierte Energie

Tabelle 11: Auswirkung einer Beschattung auf die vom Körper absorbierte Energie

Tabelle 12: monatlicher Wärmeentzug in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur

5.3 Literaturverzeichnis

Ali Toudert, Fazia: Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg. Nr. 15. 2005.

Arand Wolfgang: Die Dauerhaftigkeit von Asphaltstraßen unter Berücksichtigung des Klimas. In: Straße und Autobahn, Heft 2, Kirschbaum. Köln 1991

ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions of Human Occupancy, 2010.

Baehr H., Kabelac, S.: Thermodynamik – Grundlagen und technische Anwendungen, 16. Auflage. Springer Verlag, Berlin, 2016.

Brandenburg Christiane, Damyanovic Doris, Reinwald Florian, Alex Brigitte, Gantner Birgit, Czachs Christina: In: Magistrat der Stadt Wien, Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22, Urban Heat Islands, Strategieplan Wien, 2015.

Bundesamt für Energie Schweiz: Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren. Bern, 2014.

Fanger, Poul Ole.: Thermal comfort. Danish Technical Press. Copenhagen, 1970.

Friembichler Felix, Handler Simon, Kreč Klaus, Kuster Harald: Energiespeicher Beton, Thermische Bauteilaktivierung. Planungsleitfaden Einfamilien- und Reihenhäuser. Berichte aus der Energie und Umweltforschung. Bmvit (Stadt der Zukunft), 2016.

Häckel Hans: Meteorologie. Verlag Ulmer, 3. Verb. Auflage, Stuttgart 1993.

Hofmann G.: Einführung in die Meteorologie. Wissenschaftliche Mitteilung des Instituts für Meteorologie der Universität München, 1965.

Houghton, J.T.: Handbook of applied Meteorology. John Wiley and Sons. New York, 1985.

Kaller Richard: Wärmestromverhalten von Freiflächenheizungen. Diplomarbeit. Wien, 2007.

Kreč Klaus: Sommerliche Temperaturen von Straßenoberflächen in Abhängigkeit vom Straßenbelag. Forschungsprojekt im Auftrag der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie. Schönberg am Kamp, 2008.

Krispel, Stefan, Peyerl Martin, Weihs Philipp, Maier Gerald: Urban Heat Islands – Reduktion von innerstädtischen Wärmeinseln durch Whitetopping. In: Bauphysik 39. Ernst&Sohn, Wien 2017.

Kromb-Kolb Helga, Formayer Herbert, Clementschitsch Lukas: Auswirkungen des Klimawandels auf Wien unter besonderer Berücksichtigung von Klimaszenarien. Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur. Wien, 2007.

Meschter, Jrüg: SERSO, Sonnenenergie rückgewinnung aus Strassenoberflächen. Messkampagne und Simulation des saisonalen Erdspeichers. Jahresbericht 1999, z.Hd. des Bundesamtes für Energie. CH, 1999.

Morita, K., Tago, M.: Snow-melting on sidewalks with ground-coupled heat pumps in a heavy snowfall city, Proc. World Geothermal Congress, Anatalya Türkei, 2005

Morita, K., Tago, M.: Operational Characteristics of the Gaia Snow-Melting System in Ninohe, Iwate, Japan, Proc. World Geothermal Congress, Kyushu, 2000

Nefzger Helga, Karipot Anandakumar: Einfluß von Strahlung und Mikroklima auf Straßenwetterprognosen. Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 466, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien 1997.

ÖNORM EN 15450: Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen. 2008.

Recknagel Hermann, Sprenger Eberhard, Schramek Rudolf: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 76. Auflage. Oldenburg Industrieverlag, München, 2013/14.

Schartner Christina, Kralik Martin: Trends der Grundwassertemperatur. Untersuchungen von Daten der Überwachung des Gewässerzustandes in Österreich. Umweltbundesamt, Wien, 2011.

Schäfer, Werner (2015): Forschungsbericht 02 - Energiespeicher, HTL Krems, ees energy environmental solutions

Siemens AG-Building (Hrsg.): Kältetechnik. Frankfurt am Main, 2017.

Online verfügbar unter: <https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=A6V10327350>

[abgerufen am 14.07.2017]

Sören Peper, Jürgen Schnieders, Fabian Ochs, Wolfgang Feist:

Messtechnische Untersuchung und wissenschaftliche Auswertung zur saisonalen Wärmespeicherung über Sole-Register unter der Bodenplatte eines Passivhauses mit Dämmschürze, Forschungsinitiative Zukunft Bau, Nr. F2772, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2011.

Sullivan Chris, de Bondt Arian, Jansen rob, Verweijmeren Henk: Innovation in the production and commercial use of energy extracted from asphalt pavements.

Viessmann Werke GmbH & Co KG (Hrsg): Eisspeichersystem für Vitocal Sole/Wasser Wärmepumpen – Planungsanleitung. Allendorf, 2014. Online verfügbar unter:

<http://www.alternative-haustechnik.de/media/pdf/58/cf/fd/pu-viessmann-z012965.pdf>

[abgerufen am 20.03.2017]

Wistuba Michael, Litzka Johann, Blab Ronald: Klimakenngrößen für den Straßenoberbau, Straßenforschung Heft 507, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2001.

VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC): VDI Wärmeatlas, 11., bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.

VDI 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, 2001.

Weijers, E.P., Hensen, A., Erisman, J.W., de Wilde, H.P.J., Cnubben, P.A.J.P.: Het energieke Wegdek - Verkenning van de mogelijkheden tot duurzame energieopwekking langsde snelweg; ECN-Projekt 8-27201. ECN-Report-No. ECN-C—00-118, Energy Research Center of the Netherlands (ECN), Dezember 2000.

Würtele Michael, Sprinke Peter, Eugster Walter: Geothermie sorgt für Verkehrssicherheit. Im Auftrag des Ministeriums für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf 2005.

5.4 Formelzeichen und Abkürzungen

Θ Temperatur in °C (Celsiustemperatur)

Θ_i Innentemperatur in °C (interior)

Θ_e Außentemperatur in °C (exterior)

Θ_o operative Temperatur in °C

Θ_s Oberflächentemperatur in °C (surface)

(Vantage) Wetterdaten, die sich auf den Standort der Wetterstation der Versuchsanlage beziehen (Produkt Vantage Pro2™)

(ZAMG) Wetterdaten, die sich auf die zugekauften Daten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik beziehen (Standort Krems).

6 Anhang

6.1 Anhang A - Entzugsleistungen

Entzugsleistung bei einer Vorlauftemperatur von 20°C

Vergleichbare Ergebnisse bei einer Vorlauftemperatur von 20°C (sonniger, windstiller, regenfreier Tag) konnten nur in einem Zeitraum bereitgestellt werden, wo die Anlage in den frühen Morgenstunden teilweise ausfiel. Aussagekräftige Ergebnisse können an diesem Tag deshalb erst ab 10 Uhr bereitgestellt werden, weshalb sich die nachfolgenden Auswertungen nur auf den Zeitraum zwischen 10 Uhr und 24 Uhr beziehen.

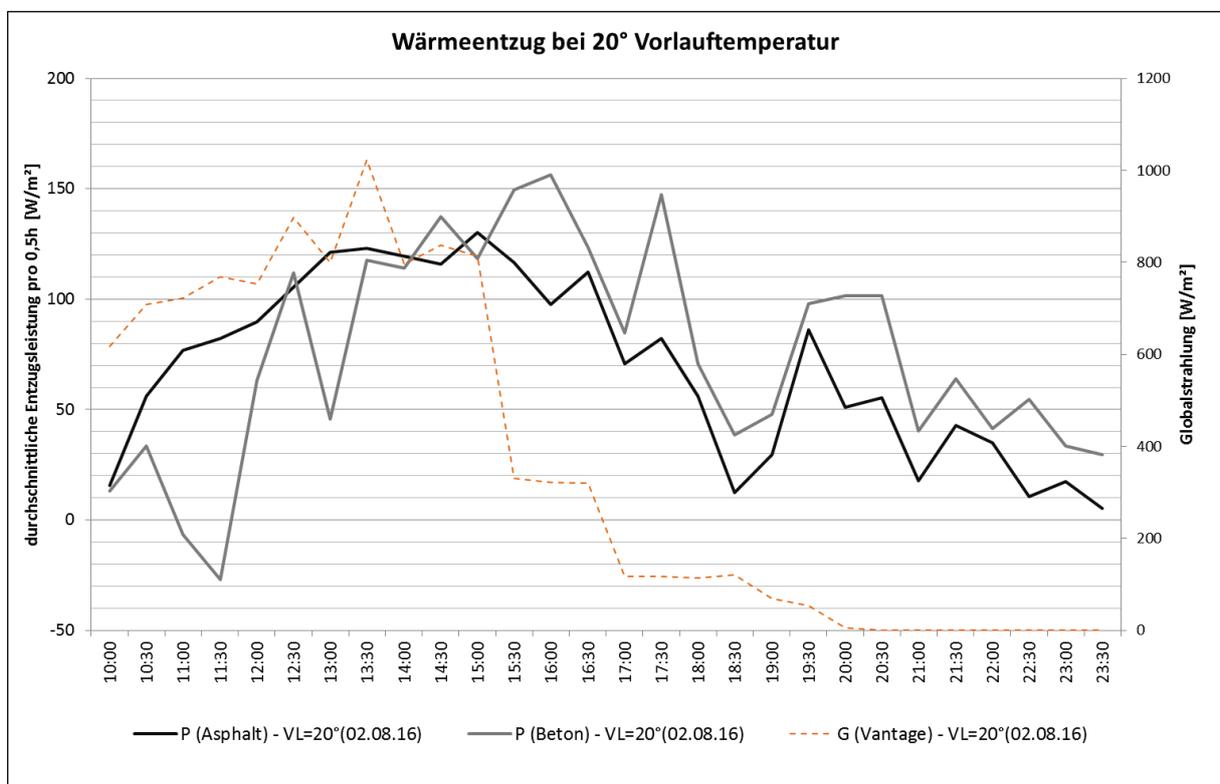


Abbildung 82: Wärmeentzug der Asphalt- und Betonfläche im Vergleich bei 20°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Solarstrahlung

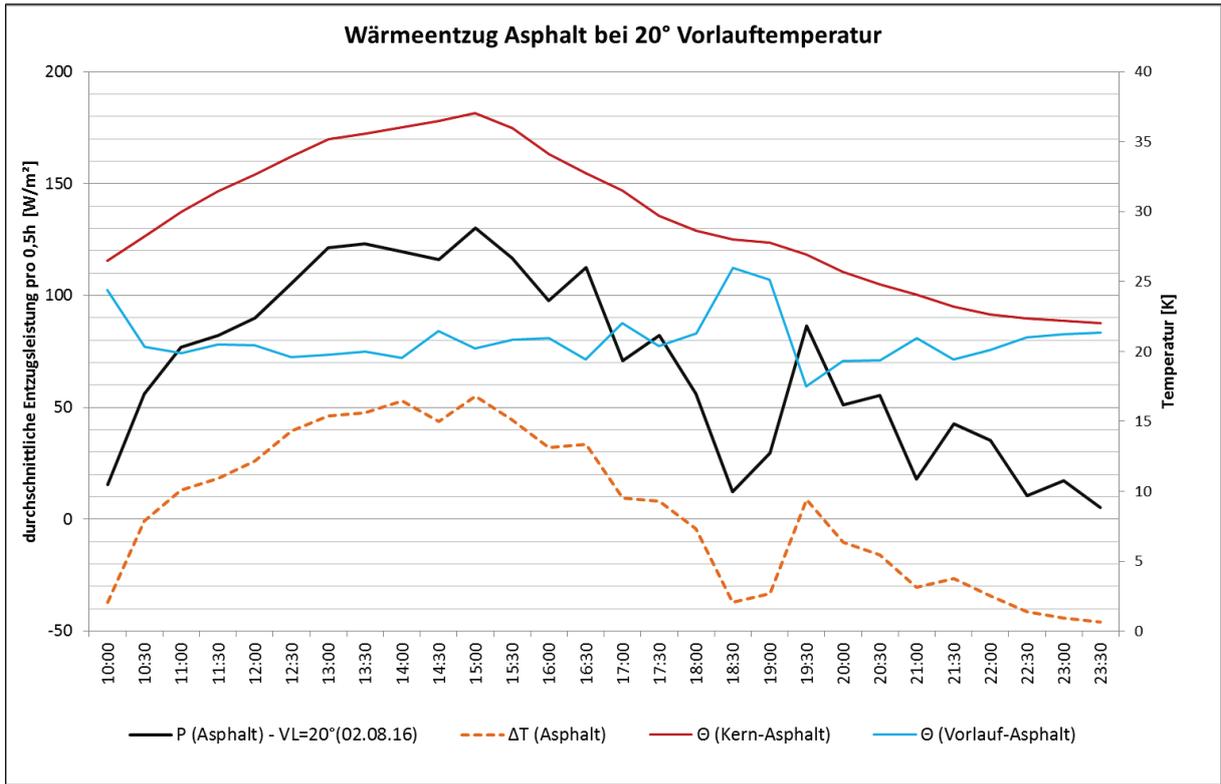


Abbildung 83: Wärmeentzug Asphalt bei 20°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

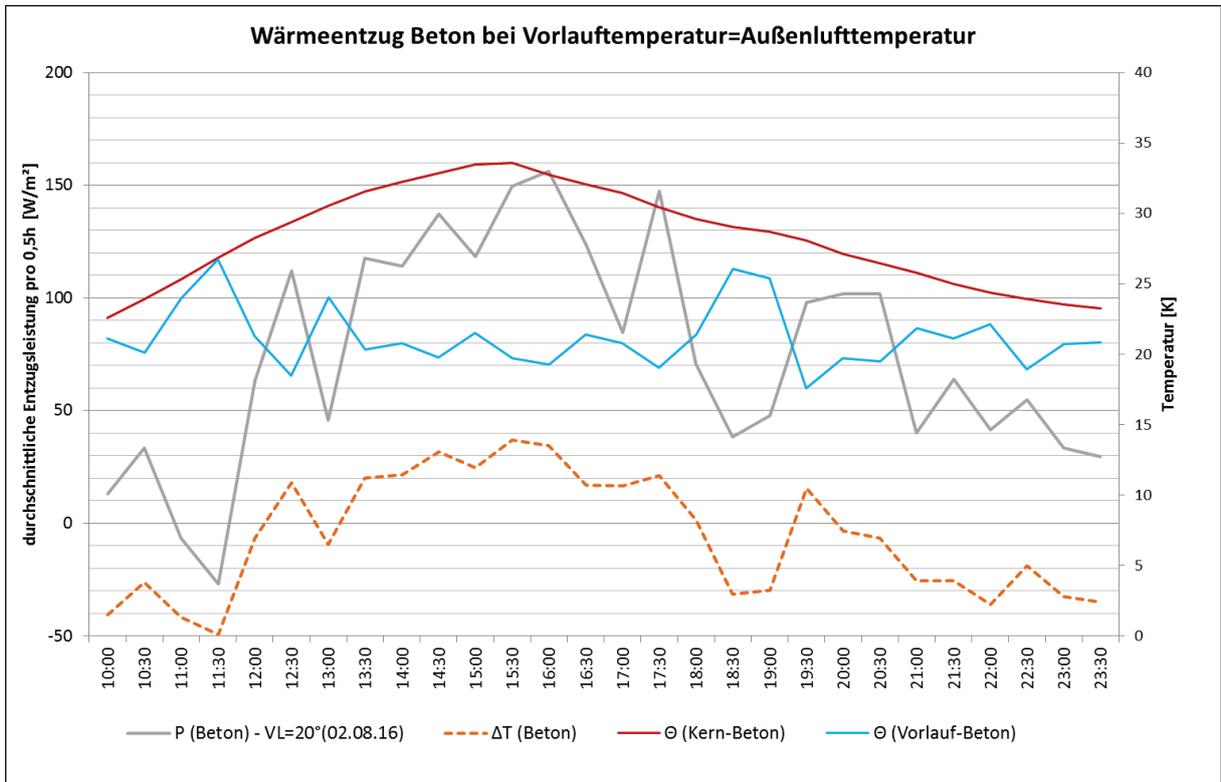


Abbildung 84: Wärmeentzug Beton bei 20°C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

Entzugsleistung bei einer Vorlauftemperatur = Außenlufttemperatur

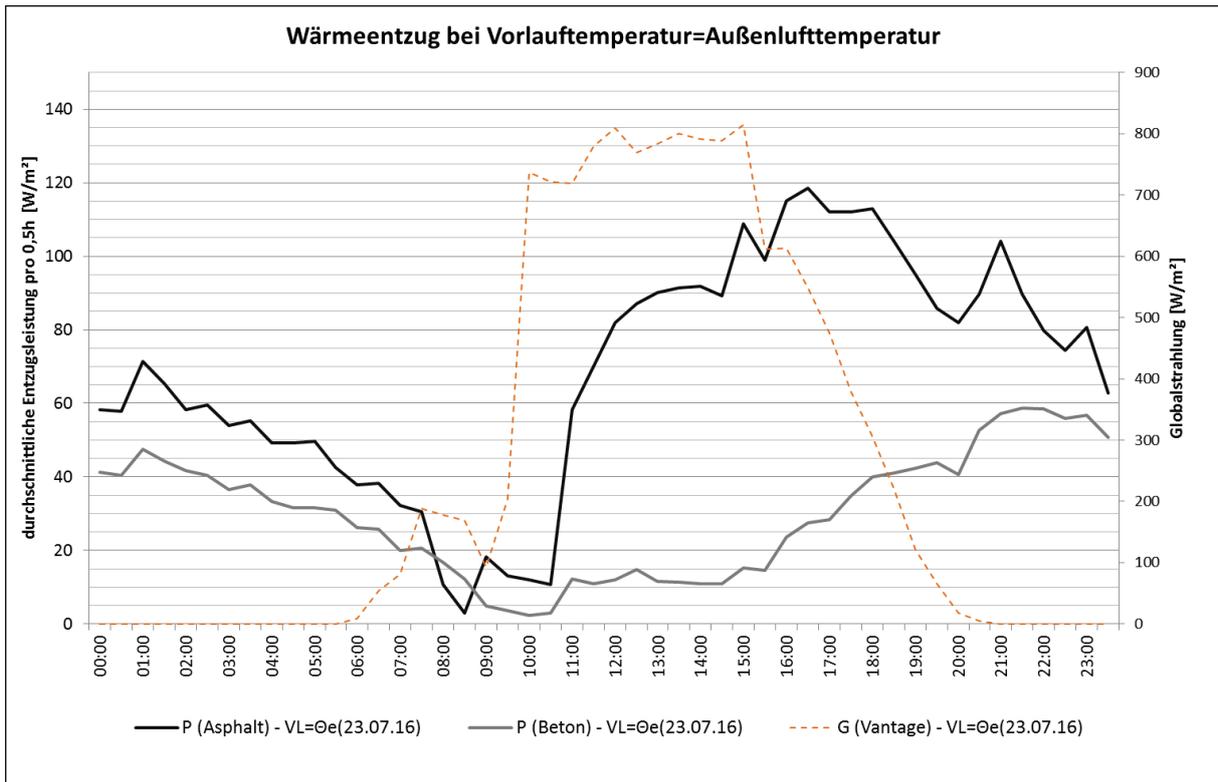


Abbildung 85: Wärmeentzug der Asphalt- und Betonfläche im Vergleich bei Vorlauftemperatur = Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Solarstrahlung

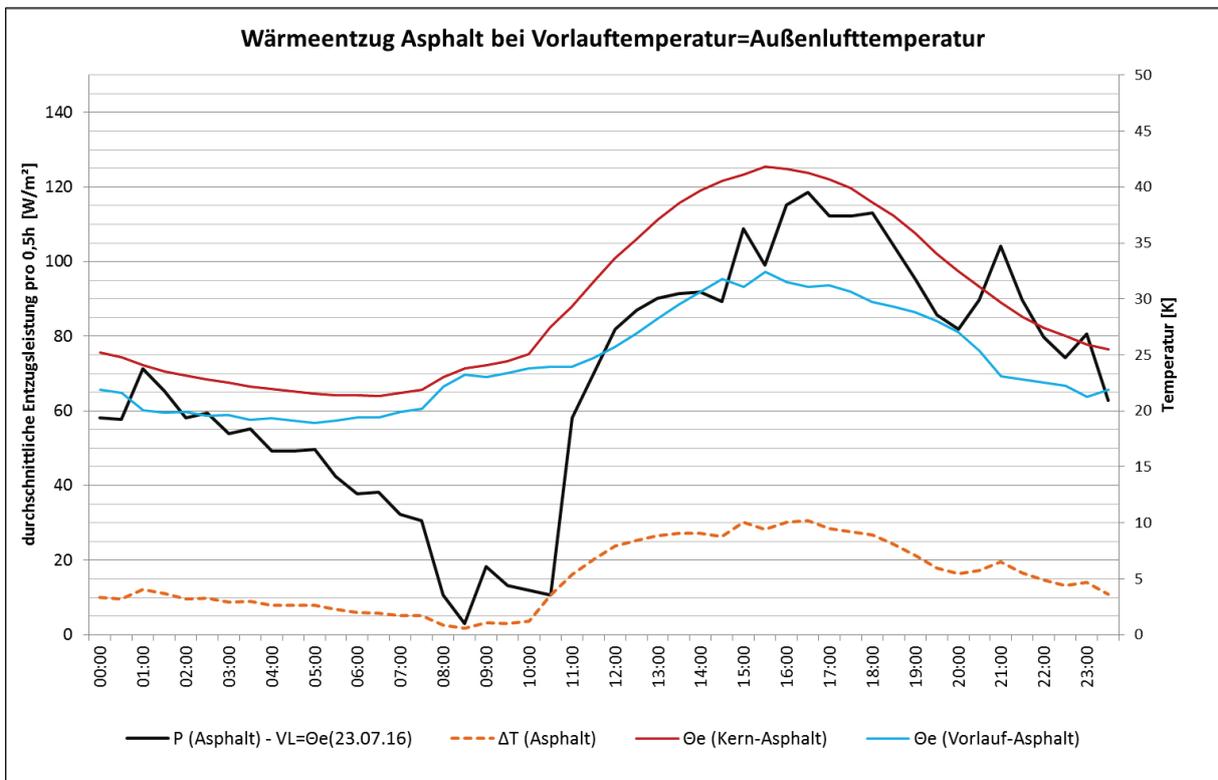


Abbildung 86: Wärmeentzug Asphalt bei Vorlauftemperatur = Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

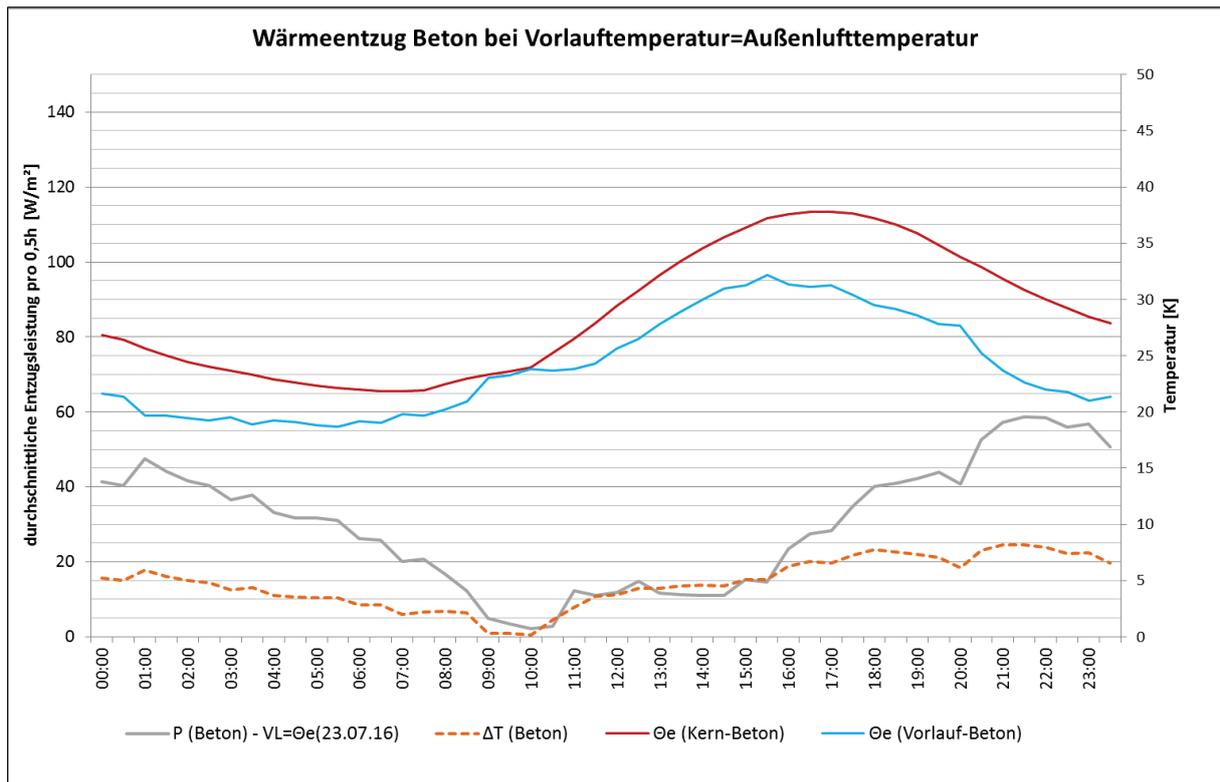


Abbildung 87: Wärmeentzug Beton bei Vorlauftemperatur = Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

Die Entzugsleistungen des Asphalts liegen in ähnlichen Größenordnungen wie die ausgewerteten Entzugsleistungen aus den Ergebnissen des Vorprojektes. Die Entzugsleistungen des Betons sind deutlich höher, wobei dies maßgeblich daran liegt, dass die Temperaturspreizungen wesentlich höher sind, als beim Vorprojekt. Bei den Temperaturspreizungen in der Größenordnung des Vorprojektes (1-2 K) sind ähnlich niedrige Entzugsleistungen erkennbar. Zudem liegen die Kerntemperaturen höher als beim Vorprojekt, was auf höhere solare Einstrahlungen schließen lässt.



Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
[bmvit.gv.at](https://www.bmvit.gv.at)