

Wärmequellen für Wärmepumpen im energetischen und wirtschaftlichen Vergleich

Franziska Bockelmann*, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter

Technische Universität Braunschweig – Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS),
Mühlenpfordtstraße 23, 38106 Braunschweig, Tel:0531-3913557, Fax: 0531-3918125,
bockelmann@igs.tu-bs.de

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

In Folge des wachsenden Einsatzes von Wärmepumpen steigt auch die am Markt vorhandene Anzahl von potentiell nutzbaren Niedertemperaturwärmequellen und entsprechenden Wärmeübertragern für Wärmepumpensysteme. Dabei kommen Produkte wie Energiezäune, Hochleistungs-Energiepfähle oder Eisspeicher zum Einsatz, ohne dass wissenschaftliche Erkenntnisse über deren Leistungsfähigkeit oder das Kosten-Nutzen-Verhältnis vorliegen. Die optimierte Auslegung einer Wärmepumpe, die Auswahl der zugehörigen Niedertemperaturwärmequelle und die sinnvolle Ankopplung an das Gebäude sind jedoch wesentliche Voraussetzungen, um einen energieeffizienten und dauerhaft wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen zu erreichen.

Das vom BMWi geförderte Forschungsprojekt „future:heatpump“ widmet sich der energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen. In diesem Zusammenhang wird ein Pre-Check-Tool zur Vorauswahl von Niedertemperaturwärmequellen und zugehörigen, geeigneten Wärmeübertragungssystemen für Wärmepumpen entwickelt und derer aktueller Entwicklungsstand dargestellt. Die ganzheitliche, vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Wärmequellen und Wärmeübertragungssysteme bezieht sich u. a. auf die Leistungszahlen der Wärmepumpen, die Eintrags- und Entzugsleistungen der Wärmeübertrager und die allgemeine *Performance* der Systeme. Zudem erfolgt eine Einschätzung von wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten (Investitions- und Betriebskosten, CO₂-Emissionen). Ziel ist die Ermittlung der Plausibilität von Anwendungen und wesentlicher Randbedingungen einzelner Quellen-Systeme. Zum qualitativen Vergleich werden in einem projektbegleitenden Monitoring verschiedene Anlagen und Quellsysteme messtechnisch erfasst.

Stichwörter:

Wärmepumpen, Niedertemperaturwärmequellen, Wärmeübertrager, energetische und wirtschaftliche Bewertung, Monitoring, Pre-Check-Tool.

1 Einleitung

Die Einbindung von Wärmepumpen in die Energieversorgung von Gebäuden ist eine zunehmend angewandte Technik, die vornehmlich zur Wärme- aber auch zur Kältebereitstellung genutzt wird. Die Marktpräsenz von Wärmepumpen ist in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen. Zur Kälteerzeugung in Nichtwohngebäuden werden zunehmend reversible Wärmepumpen, die eine Wärme- und Kälteerzeugung ermöglichen, eingesetzt. Beim Verbraucher bewirkt der zunehmende Einsatz dieser Technologie Interesse und Vertrauen - auch wenn viele Wärmepumpen in der Praxis unbefriedigend oder zumindest nicht optimal arbeiten. Nicht selten sind die Gründe für schlecht arbeitende Wärmepumpen eine unzureichende Anbindung an eine Niedertemperaturwärmequelle und/oder eine fehlerhafte Dimensionierung des zugehörigen Wärmeübertragers. Hinzu kommt, dass die Wärmepumpen zum Teil nicht gemäß der Auslegung betrieben werden (können), was oftmals die Folge von zu optimistischen Annahmen bei der Planung, teilweise aber auch durch eine nutzerbedingt falsche Betriebsweise verursacht wird. In vielen Fällen ist das primärenergetische, ökologische und auch wirtschaftliche Potenzial einer Wärmepumpe größer, als es sich in der Praxis darstellt.

Mit dem wachsenden Angebot verfügbarer Wärmepumpen ist auch die Zahl der potenziell nutzbaren Niedertemperaturwärmequellen und Wärmeübertragungssysteme gestiegen. Bei der Erschließung der Niedertemperaturwärmequellen bieten sich zudem diverse Optimierungsmöglichkeiten an. Jedoch bereits zur Auswahl der Niedertemperaturwärmequelle stehen nicht immer hinreichende Informationen und eindeutige Kriterien zur Verfügung. Hinzu kommen innovative Produkte, wie etwa Eisspeicher, Energiezäune oder Hochleistungs-Energiepfähle, die für viele Planer zunächst unbekannt sind und für die in vielen Fällen kaum fundierte Kenntnisse bezüglich deren Leistungsfähigkeit oder das Kosten-Nutzen-Verhältnis vorliegen.

In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojekt "future:heatpump - Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen" (FKZ 03ET1273A), untersucht das Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS) der Universität Braunschweig das Zusammenspiel zwischen Wärmepumpen und unterschiedlichen Niedertemperaturwärmequellen sowie den dazu angebotenen Wärmeübertragern. Im Kern geht es um die Frage, welche der zur Verfügung stehenden Wärmequellen unter welchen Umständen energetisch und wirtschaftlich sinnvoll oder auch „die sinnvollste“ ist. Zum Ende des Forschungsvorhabens wird ein Pre-Check-Tool zu Verfügung stehen, mit dessen Hilfe z. B. Planer oder Architekten für einen individuell definierten Fall eine geeignete Vorauswahl für eine Niedertemperaturwärmequelle und ein zugehöriges Wärmeübertragungssystem treffen können. Zielgrößen sind der möglichst energieeffiziente und dauerhaft wirtschaftliche Betrieb der gesamten Wärmepumpenanlage.

2 Wärmequellen und -übertrager im Vergleich

In einer umfassenden System- und Marktanalyse wurden 24 Unternehmen zu ihren Produkten befragt und auf diese Weise gängige, am Markt verfügbare Wärmeübertragungssysteme, identifiziert.

Die Zusammenführung und Aufbereitung der Informationen und Angaben der Hersteller sowie der Ergebnisse aus der Marktrecherche erfolgte (systemweise) in einer Übersichtsmatrix. Insgesamt wurden 16 Kategorien von Wärmeübertrager-/Wärmepumpensystemen identifiziert, die u. a. das Erdreich, die Luft oder Wasser als Wärmequelle nutzen. Als eigene Kategorie wurde die klassische Luft-Wasser-Wärmepumpe in die Übersicht aufgenommen. (Bild 1)

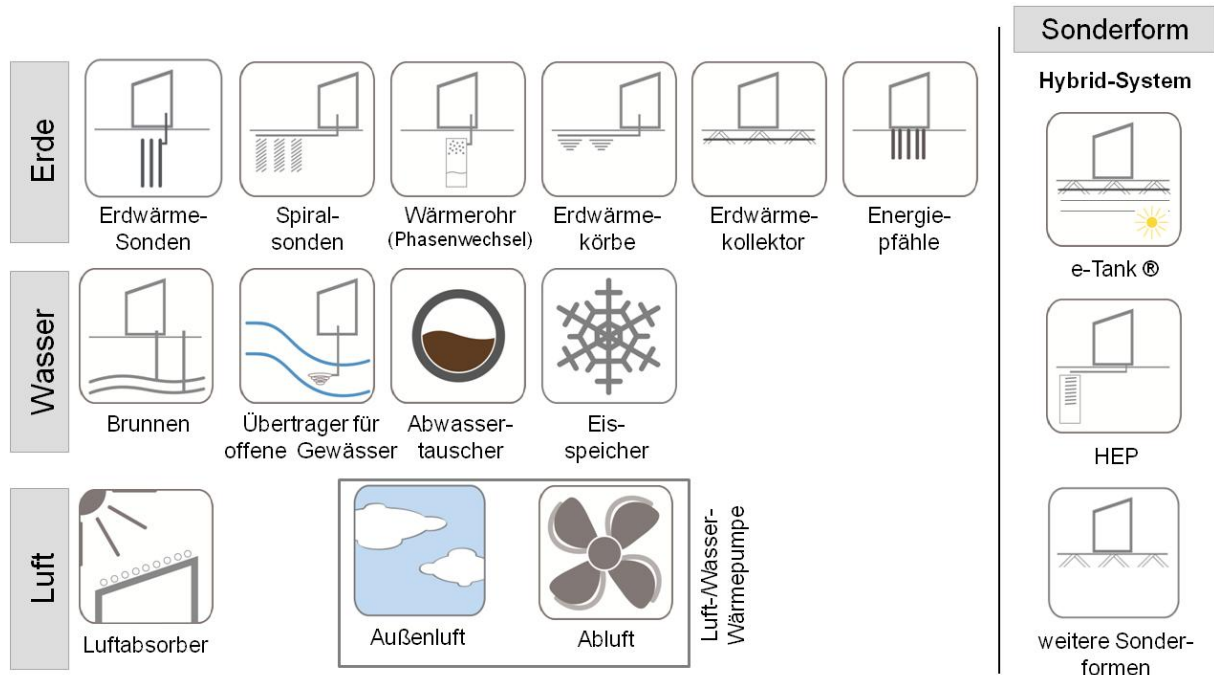


Bild 1: Auswahl / Kategorisierung der Wärmeübertragungssysteme

2.1 Randbedingungen, Einflussfaktoren und Einschränkungen

Bei der Wahl der Niedertemperaturwärmequelle und des entsprechenden Übertragungssystems müssen die vorhandenen Randbedingungen, Einflussfaktoren und Einschränkungen auf die Entzugs- und/oder Eintragsleistung sowie Vorgaben für die Planung und Umsetzung berücksichtigt werden.

Im Vorfeld der Planung und Konzeptionierung sind u. a. zu klären:

- Klimatische Bedingungen,
- Energiekonzeption des Bauwerks,
- Grundstücksgröße und einzuhaltende Grenzabstände; mögliche Anordnung, Abstände und Geometrie der Wärmeübertragungssysteme,
- Auswahl der Systeme (überbaubar, Freifläche, Flächenbedarf, Abteuftiefen und/oder Einbautiefen),
- geothermische und hydrogeologische Eigenschaften des Untergrunds (Grundwasser und Grundwasserströmung, Wärmeleitfähigkeiten usw.),
- Wasserschutzgebiet und/oder Einschränkungen der Einbautiefen (Grundwasserleiter),
- ggf. vorhandene Lärmschutzzonen,
- Gewässer in relevanter Entfernung,
- in der Umgebung vorhandene Bohrungen oder Gegebenheiten die ggf. zu Beeinflussungen führen.

Zum Beispiel kommt fast die Hälfte der Niedertemperaturquellsysteme für eine Wärmepumpenanwendung nicht in Frage, da die zur Verfügung stehende Grundstücksfläche zu klein ist und die Systeme aufgrund der notwendigen Regeneration nicht überbaut werden dürfen. So dürfen z. B. Flächenkollektoren oder Spiralsonden nicht unterhalb eines Gebäudes platziert werden, da diese Systeme den Niederschlag und die solare Einstrahlung zur Regeneration des Bodens und damit der

Wärmequelle benötigen. Auch muss beachtet werden, dass einige Systeme Zusatzeinrichtungen und/oder -komponenten zu ihrer Regeneration oder Sicherstellung der Versorgung (Redundanzsystem) benötigen. Beispielsweise erfordert ein Eisspeicher oder ein sogenannter e-Tank® zur Regeneration bzw. „Beladung“ einen Luftabsorber oder eine Solarthermieanlage. Anders verhält es sich beim Abwasserwärmeübertrager: Bei der Nutzung von Abwasser als Wärmequelle ist meist ein redundantes Heizsystem erforderlich, das in Fällen zu geringen Abwasseraufkommens oder einer Kanalreparatur eine Wärmebereitstellung ermöglicht. (siehe Bild 2)

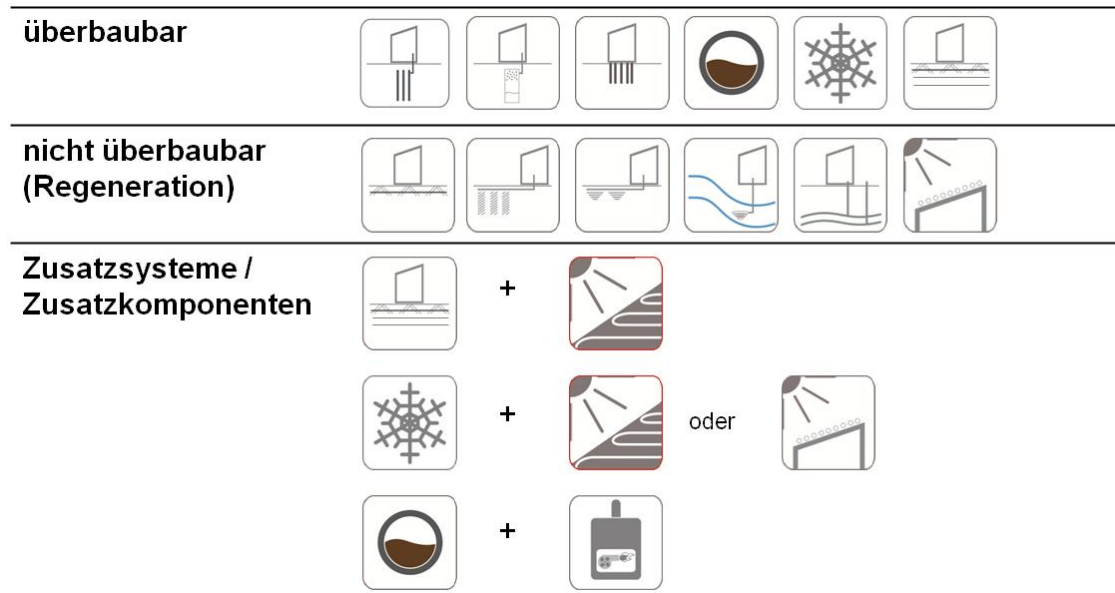


Bild 2: Randbedingung, Überbaubarkeit und Zusatzsystem / -komponenten

Bild 3 zeigt den Flächenbedarf für verschiedene Niedertemperaturquellsysteme im Vergleich. Als Grundlage für die Darstellung wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Eckdaten der Wärmeübertrager verwendet. Zusätzlich wurden die Randbedingungen (geologisch, klimatisch, Baufläche, etc.) als optimal und ohne Einschränkungen angenommen. Die zu berücksichtigenden Abstände zwischen den Systemen, zu den Grundstücksgrenzen sowie zu verlegten Rohrleitungen wurden bei der Flächenermittlung berücksichtigt. Bei den in Bild 3 angegebenen Flächen handelt es sich somit um einen „Mindestflächenbedarf“. Bei einem verringerten Wärmeentzug aus dem Boden bedarf es weiterer Wärmeübertrager und zusätzlicher Fläche.

An der Auswertung ist zu erkennen, dass die oberflächennahen Systeme mit einer Abteuftiefe von < 10 m den größten Flächenbedarf haben. Dies ist damit zu erklären, dass diese Systeme eine Übertragerfläche repräsentieren, die einen wesentlichen horizontalen Einfluss hat. Damit der gegenseitige Einfluss minimiert und auch eine Eisbildungen vermieden werden kann, sind die Abstände der einzelnen Elemente und/oder Rohrleitungen untereinander zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Annahmen für die Flächenbedarfsermittlung

| Übertragungssystem | Durchmesser Übertrager [m] | Abstände zwischen den Übertragern [m] | angenommene Entzugsleistung [W/m, W/Stk, W/m ²] | Anzahl | Anmerkung | Flächenbedarf gesamt [m ²] |
|------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---|--------|--|--|
| Erdwärmesonden | 0.18 | 6 | 100 | 1 | Sonde 100 m | 30.0 |
| Spiralsonden | 0.5 | 3 | 1 500 | 5 | - | 48.1 |
| Erdwärmekörbe | 2.4 | 4 | 2 000 | 4 | - | 128.7 |
| Flächenkollektoren | - | - | 40 | - | - | 187.5 |
| Energiepfähle | 0.5 | 5 | 85 | 6 | Pfahl 15 m | 142.5 |
| Abwassertauscher | 6 | - | 1 800 | 1 | - | 6.0 |
| Übertragungssysteme Gewässer, etc. | 1.1 | 4 | 15 000 | 1 | - | 20.4 |
| Brunnen (Grundwasser) | | 30 | jeweils 1 Entnahme- und Schluckbrunnen | | | 30.0 |
| Luftabsorber | - | - | 500 | - | - | 15.0 |
| Eisspeicher | 2.7 | 2 | 10 000 | 1 | - | 17.3 |
| Luftwärmepumpe | - | - | 10 000 | 1 | nur Gerät: H/B/T [mm] 1045 / 1490 / 593 | 0.88 |

Annahmen: Heizleistung Gebäude 10 kW
 COP WP 4
 Wärmeentzug Quelle 7.5 kW

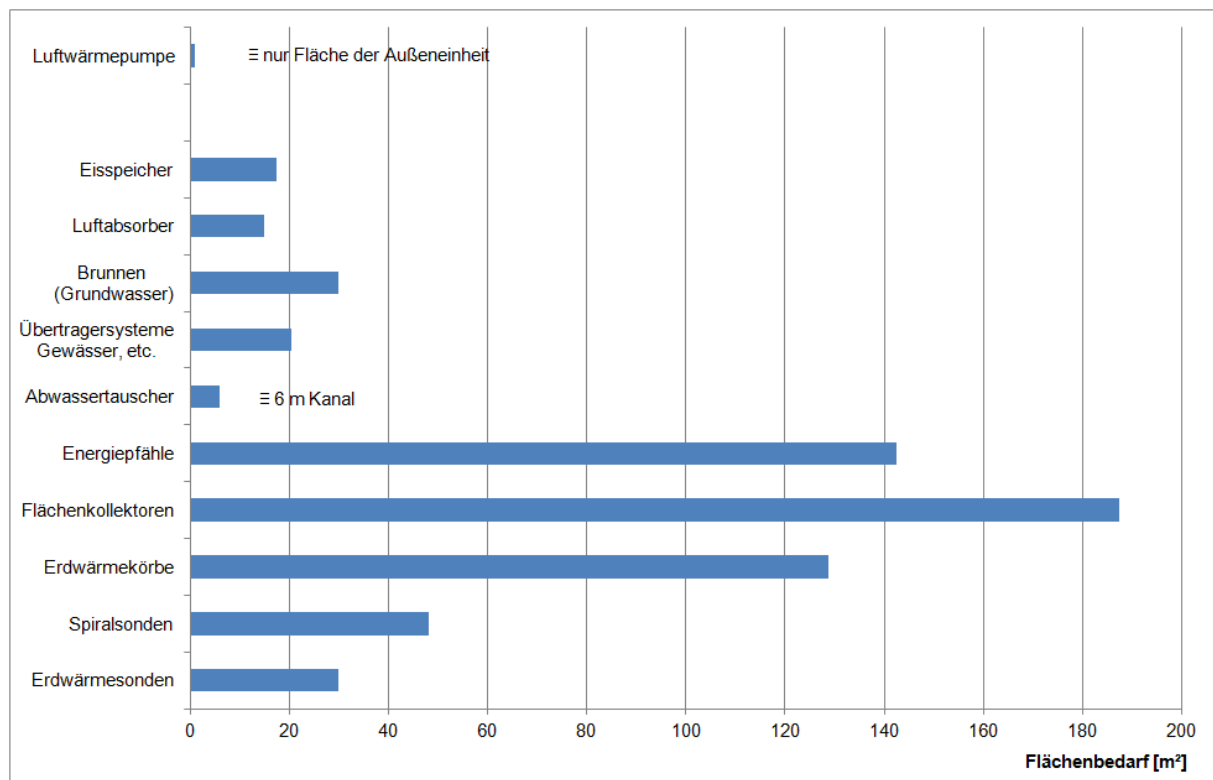


Bild 3: Flächenbedarf der Niedertemperaturquellsysteme bezogen auf 10 kW Heizleistungsbedarf des Gebäudes (Annahme: optimale geologische Verhältnissen und Randbedingungen)

2.2 Herstellerumfrage

Im Einzelnen enthalten die recherchierten Informationen

- Allgemeine Angaben zu den verwendeten Materialien und dem Aufbau der Wärmeübertrager sowie die vorgesehenen Wärmequellen und besondere Anforderungen,
- Angaben zu den Abmessungen und zum Einbau der Wärmeübertrager und die zu verwendenden Wärmeträgermedien,
- Besonderheiten beim Betrieb der Wärmeübertrager, prognostizierte Entzugsleistungen oder Wärmeabgaben, z. B. an Erdreich und in Bezug auf verschiedene Bodenklassen und/oder dem vorherrschenden Temperaturniveau im Vor- und Rücklauf,
- geplante Einsatzgebiete (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Büro, Neubau und/oder Sanierung, Heizen, Trinkwassererwärmung, Kühlen etc.) der angebotenen Technologie,
- Investitionskosten für das Material und Kosten für den Einbau,
- gesetzliche Grundlagen und Bestimmungen für den Einbau, Auslegungsvorschriften und ggf. vorhandene Auslegungs- und Dimensionierungsanleitungen oder -programme.

In Bezug auf die Marktrecherche und den Angaben in Tabelle 2 ist festzuhalten, dass vor jeder Nutzung des Erdreichs der mögliche Wärmeeintrag bzw. -entzug mit der zur Anwendung kommenden Wärmeübertragertechnologie bestimmt werden muss. Grundsätzlich müssen die Beschaffenheit und Zusammensetzung des Bodens dem Planer bekannt sein. Die Angaben in der Tabelle stellen Mittelwerte auf der Grundlage der in Deutschland üblichen Bodenklassen dar.

Tabelle 2: Überblick der Wärmeübertragungssysteme (Mittelwerte der Herstellerangaben)

| Übertragungssystem | Quelle | Abmessungen Überträger | Einbautiefe | Entzugs- und Eintragsleistung | Randbedingungen |
|--|---|---|----------------------------|---|--|
| Erdwärmesonden | Erdreich | Ø 75 - 180 mm | > 100 m | 30 - 100 W/m | Abstand zwischen Sonden einhalten Vorschriften / Randbedingungen der Bundesländer beachten genehmigungspflichtig |
| Spiralsonden | Erdreich (solare Einstrahlung, Niederschlag) | Ø ~500 mm | bis 15 m | bis 1.500 W/Sonde | keine Überbauung möglich außerhalb tiefwurzelnder Bäume |
| Phasenwechsellsonde | Erdreich | Ø 60 cm | bis 275 m | | kein Frostschutzmittel notwendig (u.a. CO ₂ -Sonde) kein extra Solekreislauf notwendig nur für den Heizfall anwendbar genehmigungspflichtig |
| Erdwärmekörbe | Erdreich (solare Einstrahlung, Niederschlag) | Ø 1,4 - 4,0 m | 1 - 4 m | 700 - 2.000 W/Korb | keine Überbauung möglich platzsparend, jedoch starken Temperaturschwankungen ausgesetzt |
| Flächenkollektoren | Erdreich (solare Einstrahlung, Niederschlag) | keine Flächenbegrenzung vorh. bei Verlegung der Rohrschleifen | 1,2 - 3,0 m | 10 - 40 W/m ² | keine Überbauung / Versiegelung möglich großer Platzbedarf |
| Energiepfähle | Erdreich | Ø bis 0,6 m | 10 - 30 m | 40 - 85 W/m | Synergieeffekte nutzen, wenn statisch bedingt erforderlich Tragfähigkeit der Pfähle muss gewährleistet sein (keine Temperaturen < 5°C) |
| Abwassertauscher | Abwasser | 1,0 m x 0,6 m | im Kanal | bis 1.800 W/m ² | Abnehmer mit großem Wärmebedarf sinnvoll (>50 kW) Trockenwetterfluss min. 10 - 15 l/s Anbindung max. 100 - 500 m Redundantes System erforderlich genehmigungspflichtig bei Abwasserwerken |
| Übertragungssysteme für Seen, Gewässer, etc. | Wasser | Höhe 1,1 m Ø 1,1 m | im Wasser 3 - 30 m tief | 6 - 15 kW/Einheit (Entzug) 6 - 26 kW/Einheit (Eintrag) | ggf. genehmigungspflichtig bei öffentlichen Gewässern |
| Brunnen (Grundwasser) | Grundwasser | | 10 - 200 m | 500 - 600 W/m ³ /h | Grundwasserqualität beachten Analyse des Grundwassers auf pH-Wert, Eisen, Mangan (Verockerungsgefahr) Pumpversuch erforderlich: Bestimmung der Förderfähigkeit / Ergiebigkeit genehmigungspflichtig |
| Luftabsorber | Luft (solare Einstrahlung) | 2,1 - 4,0 m x 1,0 - 1,2 m | Aufdach / Aufstellung | | keine Bohrung, kein Umweltrisiko Grundwasserschutz, in Kombination z. B. mit Eisspeicher als Regenerationssystem oder als Einzelsystem anwendbar |
| Eisspeicher | Erdreich (solare Einstrahlung, Niederschlag) | Ø bis 2,7 m | bis 10 m tief | 4 - 18 kW (Entzug) 3,5 - 7 kW (Eintrag) | großer Wärmebedarf -> großer Speicher System zur Regeneration erforderlich (Absorber, Solarthermie) auch Kühlung im Sommerfall möglich |
| Luftwärmepumpe | Luft | | | | optische Aufstellungskriterium Beachtung des Schallschutzes Luftansaug- bzw. Auslassseite frei zugänglich |

3 Das Pre-Check-Tool

Das im Forschungsprojekt erarbeitete Pre-Check-Tool wird der Öffentlichkeit zum Projektende online zur Verfügung gestellt. Auf der Basis der im Programm enthaltenen Wärmequellen und Wärmeübertrager ermöglicht das Tool z. B. Planern und Architekten eine für einen individuellen Anwendungsfall geeignete Vorauswahl zu einer Niedertemperaturwärmequelle/Wärmeübertrager-Kombination zu treffen. Neben der Vorauswahl findet eine überschlägige Dimensionierung des entsprechenden Wärmeübertragers statt.

3.1 Aufbau und Methodik

Um die benötigten Inputs und Outputs klar und rechtzeitig zu definieren, wurde mit den Arbeiten zur Umsetzung des Pre-Check-Tools direkt zu Beginn des Projektes begonnen. In einem ersten Schritt erfolgten die Festlegungen der Struktur und der Methodik zur Toolentwicklung. Gemäß Bild 4 besteht das Tool aus verschiedenen Blöcken. Um alle Schnittstellen zu erfassen und darzustellen, werden diese Blöcke zunächst im Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel umgesetzt. Nach dem strukturellen Aufbau erfolgt eine erste Ergänzung des Pre-Check-Tools mit Inhalten und Daten aus der Literatur und Normung. In einem nächsten Schritt werden vielfältige Simulationsergebnisse der analysierten Niedertemperaturquellsysteme und Gebäudetypologien in das Programm implementiert. Die Simulationsergebnisse erweitern insbesondere die Programmoption einer Vordimensionierung von Niedertemperaturwärmeübertragern.

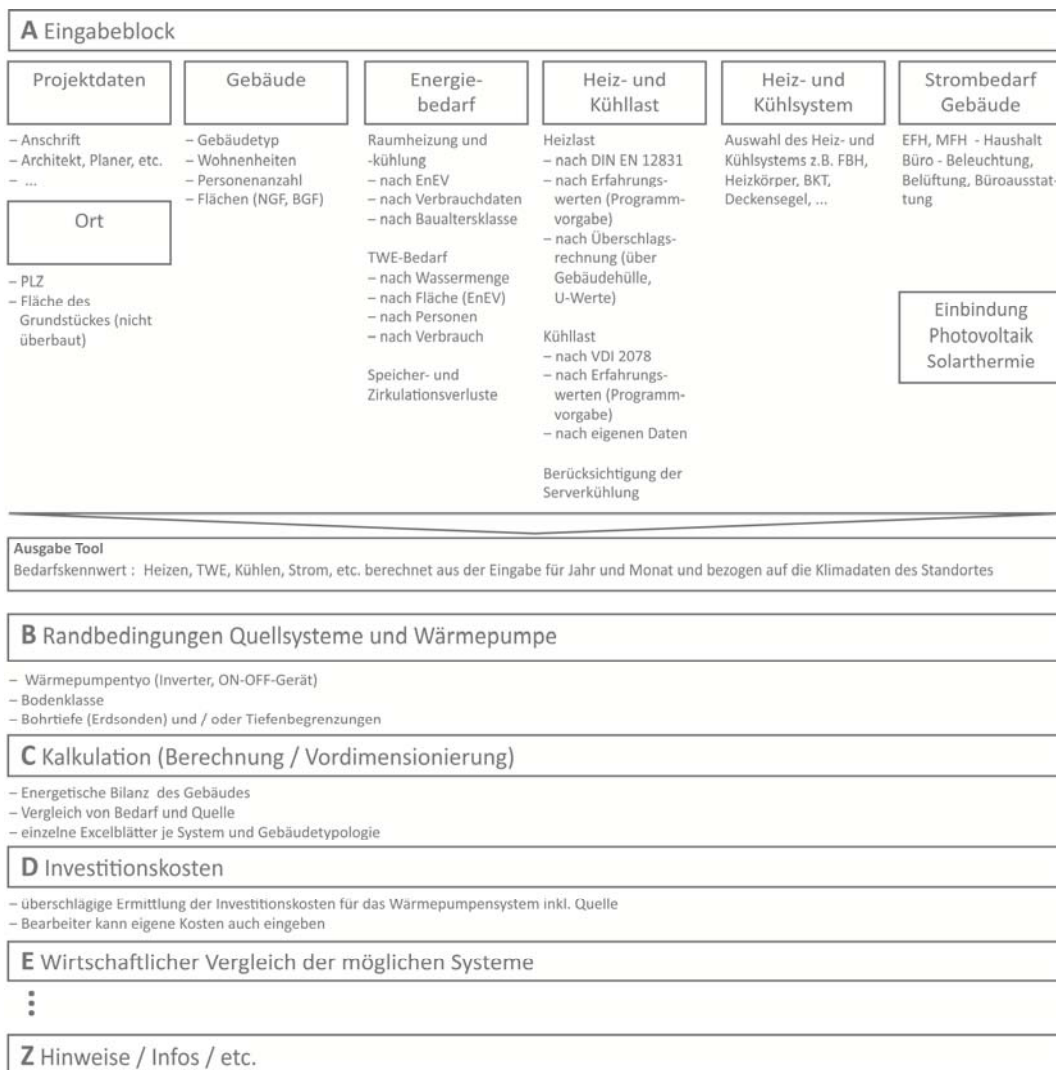


Bild 4: Schematischer Aufbau des Pre-Check-Tools (Bearbeitungsstand)

Die Berechnung der Wärmepumpenanlagen bzw. eine Abschätzung der benötigten Energien, insbesondere in Bezug auf die Niedertemperaturwärmequellen, erfolgt innerhalb des Pre-Check-Tools. Bild 5 fasst die wesentlichen Schritte und Berechnungen zusammen.

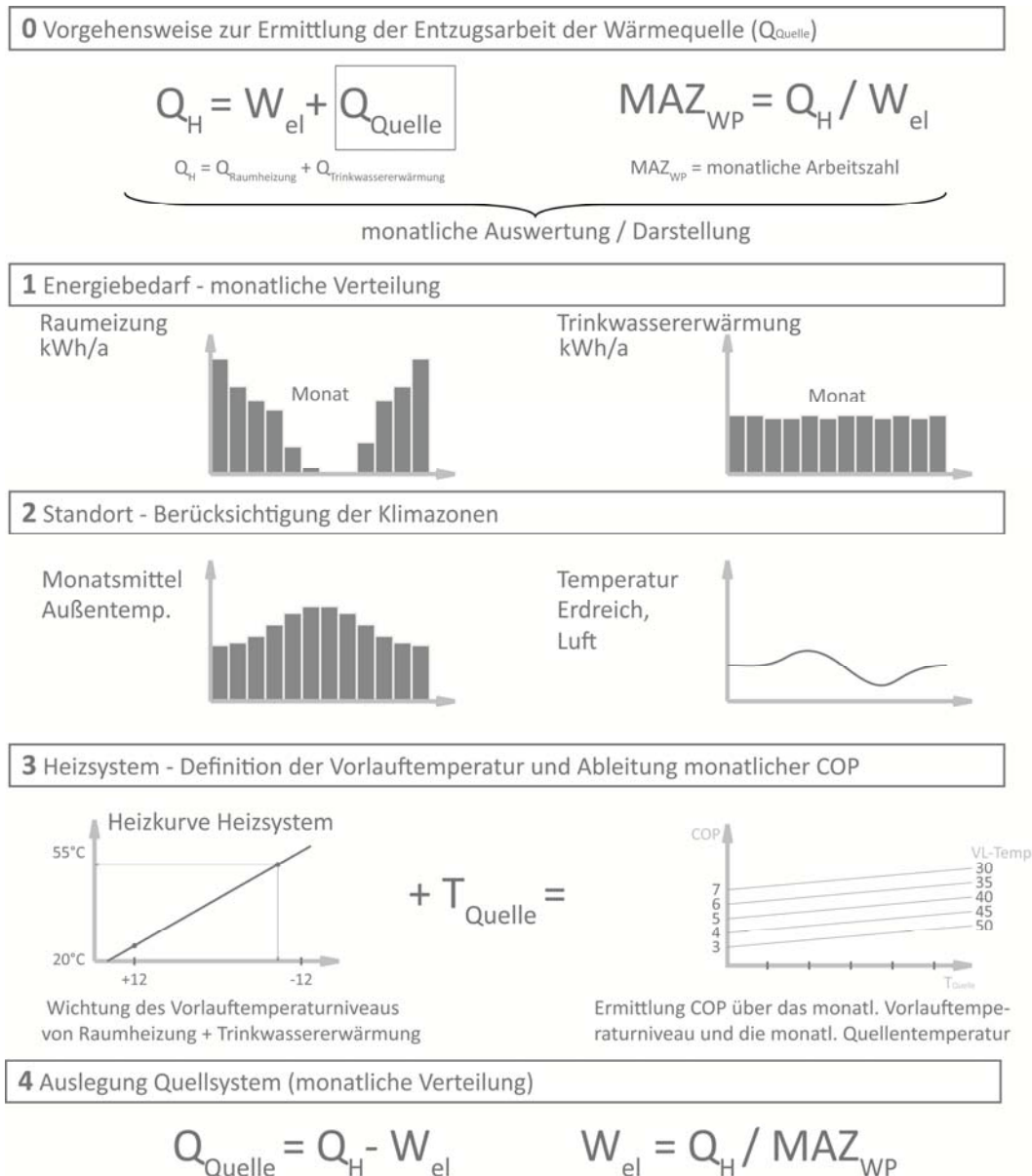


Bild 5: Methodik der Berechnungen innerhalb des Pre-Check-Tools bis zur Auslegung der/einer Niedertemperaturwärmequelle (Bearbeitungsstand)

3.2 Bedienung des Pre-Check-Tools

Die Bedienung des Pre-Check-Tools beginnt mit der Dokumentation der Ausgangssituation und der Rahmenbedingungen des jeweiligen Projekts. Durch eine benutzerfreundliche Oberfläche sollen die Anwendung erleichtert und Eingabefehler vermieden werden. Mittels Optionsschaltflächen wählt der Anwender die für sein Projekt geeigneten Voreinstellungen und trifft grundsätzliche Festlegungen, wie etwa die Gebäudeart oder den thermischen Standard des Gebäudes. Über Kenndatenfelder werden Rahmendaten, wie z. B. die Grundstücksfläche oder der Energiebedarf des Gebäudes - falls bekannt - eingegeben. Der Nutzer kann Annahmen bezüglich des auszulegenden Heiz- und Kühlsystems treffen

und zusätzliche Anforderungen definieren. Wo inhaltlich vertretbar, werden vom Anwender nicht spezifizierte Angaben und Kenndaten vom Programm mit Standardwerten belegt. (siehe Bild 6)



Bild 6: Pre-Check-Tool, derzeitiger Aufbau der Benutzeroberfläche in MS Excel

Auf der Grundlage der Ergebnisse der analysierten Systeme und Systemvarianten berechnet das Pre-Check-Tool eine Vorauswahl von Niedertemperaturwärmequellen für den eingegebenen Anwendungsfall. Ökologische (CO₂-Emissionen, Primärenergie) und wirtschaftliche Faktoren (Investitions- und Betriebskosten) werden ermittelt und einer konventionellen Wärme- und/oder Kälteerzeugung gegenübergestellt. Zusätzlich informiert das Pre-Check-Tool über wichtige Nebenbedingungen der jeweiligen Systemvariante, wie z. B. die Beachtung von Schallschutzanforderungen bei Luft-Wasser-Wärmepumpen oder erforderliche Pumpversuche bei der Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle oder -senke. Auch der Hinweis auf eine Kühloption, z. B. bei der Verwendung von Eisspeichern, erfolgt an dieser Stelle.

4 Fazit und Ausblick

Die Wärmepumpentechnologie wird bei der zukünftigen Wärme- und Kälteversorgung eine wesentliche Rolle spielen. Um das Potential dieser Energieversorgungsvariante möglichst effizient ausschöpfen zu können, kommt der Wahl der Niedertemperaturwärmequelle und des für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeigneten Wärmeübertragers eine entscheidende Bedeutung zu. Mit dem hier vorgestellten Pre-Check-Tool, das auf theoretischen Untersuchungen, einer Vielzahl von Systemsimulationen sowie auf in der Praxis erhobenen Messdaten und Hersteller- bzw. Anbieterinformationen beruht, steht ein multifunktionales und in der Planung in weiten Bereichen verwendbares Hilfsmittel zur Verfügung. Das Programm ermöglicht eine bedarfsgerechte und an spezifische Rahmenbedingungen angepasste Vorauswahl sowie überschlägige Dimensionierung von

Wärmeübertragern zur Nutzung von Niedertemperaturwärmequellen für Wärmepumpen. Es wird zu einem effizienteren Betrieb von Wärmepumpen beitragen.

5 Quellenangaben

Alle angegebenen Kenndaten, Kosten und Randbedingungen beruhen auf Angaben der Hersteller und befragten Firmen.

6 Danksagung

Das Forschungsprojekt „future:heatpump – Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen“ (FKZ 03ET1273A) wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert.

Wir danken unseren Projektpartnern (Stiebel Eltron GmbH & Co. KG, Uponor GmbH, Doppelacker GmbH, Viessmann Werke GmbH & Co. KG und Eurocoles GmbH & Co. KG) für die projektbezogenen Informationen und die finanzielle Unterstützung.