

- [6] *Stroppel, A. u. R. Reich:* Vergleichsuntersuchungen an Geräten zur Saatbettbereitung mit zapfwellengetriebenen, rotierenden Werkzeugen. Grundl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 3, S. 86/95.
- [7] *Kalk, W.-D., O. Bosse u. C. Bernard:* Energiebilanz beim Einsatz rotierender Werkzeuge mit horizontaler Drehachse. Grundl. Landtechnik Bd. 37 (1987) Nr. 4, S. 142/51.
- [8] *Müller, M.:* Technologische Grundlagen für die industriemäßige Pflanzenproduktion. Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag 1980.
- [9] *Busch, K., G. Herrendörfer u. K.-D. Feige:* Gesteuerte Intuition – Arbeitsanleitung zur Variantensuche und -bewertung; Heft 2, Variantenbewertung. Gedrucktes Manuskript des FZT Dummerstorf-Rostock der Akademie Landwirtsch.-Wiss. der DDR, 1979.
- [10] *Busch, K.:* Methodologische Untersuchungen zum Erfindungsprozeß. Diss. B, Akademie Landwirtsch.-Wiss. der DDR Berlin, 1985.
- [11] Standard TGL 33738; Gütevorschriften für Arbeiten der Pflanzenproduktion. Akademie Landwirtsch.-Wiss. der DDR Berlin, 1977.
- [12] *Plötner, K.:* Konstruktionsmethodische Grundlagen für die Entwicklung von Landmaschinen. Diss. B, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, 1975.
- [13] *Frese, H.:* Aussichten für eine exakte Beurteilung des Arbeitserfolges von Bodenbearbeitungsgeräten. Grundl. Landtechnik Nr. 7 (1956) S. 5/10.
- [14] *Rid, H. u. A. Süß:* Zur Methodik der Prüfung des Effektes von Bodenbearbeitungsgeräten. Landt. Forschung Bd. 10 (1960) Nr. 3, S. 62/70.
- [15] *Estler, M., H. Knittel u. E. Zeltner:* Bodenbearbeitung aktuell – schlagkräftig – bodenschonend – energiesparend. Frankfurt/Main: DLG-Verlag 1983.
- [16] *Busch, K. u. H. Busch:* Gesteuerte Intuition – Arbeitsanleitung zur Variantensuche und -bewertung; Heft 1 Variantensuche. Gedrucktes Manuskript des FZT Dummerstorf-Rostock der Akademie Landwirtsch.-Wiss. der DDR, 1979.
- [17] *Müller, J.:* Programmbibliothek zur systematischen Heuristik für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Technisch-wissenschaftliche Abhandlungen des Zentralinstitutes für Schweißtechnik der DDR, Halle, 1973.
- [18] Standard TGL 21168/03: Landwirtschaftliche Feldversuche; Boniturskala für Prüfmerkmale landwirtschaftlicher und gartenbaulicher Kulturpflanzen. Akademie Landwirtsch.-Wiss. der DDR Berlin, 1978.
- [19] *Kalk, W.-D. u. O. Bosse:* Untersuchungen an Werkzeugen zur Lockerung der Traktorspur. Tag.-Ber., Akademie Landwirtsch.-Wiss. der DDR, Berlin (1984) Nr. 227, S. 127/32.
- [20] *Storm, R.:* Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1979.
- [21] *Bosse, O. u. W.-D. Kalk:* Vorschlag zur Bewertung von Bodenbearbeitungswerkzeugen hinsichtlich Arbeitsqualität und Energieaufwand. Agrartechnik (Berlin) Bd. 35 (1985) Nr. 10, S. 444/46.
- [22] *Bosse, O., W.-D. Kalk, J. Erler u. K. Gerlach:* Verbesserte Arbeitsqualität des Saatbettbereitungsgerätes B 601 durch neue Werkzeugbestückung. Agrartechnik (Berlin) Bd. 32 (1982) Nr. 1, S. 29/32.

Untersuchungen mit Wärmepumpen-Heizungsanlagen, die den Erdboden als Wärmequelle nutzen

Von Jan Janssen, Braunschweig-Völkenrode*)

DK 697:621.577

Für Wärmepumpen-Heizungsanlagen kann der Erdboden bei ausreichendem Flächenangebot eine sichere, natürliche Wärmequelle sein. Am Beispiel von zwei baugleichen Wärmepumpen mit unterschiedlicher Auslegung der Erdbodenwärmetauscher wird die Auskühlung des Erdbodens durch den Wärmeentzug aufgezeigt. Trotz einer zeitweiligen Vereisung des Erdbodens im Bereich der Wärmetauscher werden im Frühjahr jedoch relativ schnell wieder Temperaturen wie in einem Boden ohne Wärmeentzug erreicht. Aufgrund vergleichsweise hoher Investitionskosten sind Wärmepumpen-Heizungsanlagen bei den gegenwärtig sehr niedrigen Ölpreisen jedoch nicht wirtschaftlich.

*) Dipl.-Ing. J. Janssen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biosystemtechnik ehemals Inst. für landtechnische Grundlagenforschung (komm. Leiter: Prof. Dr. H. Schön) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

1. Einleitung

Das Prinzip der Wärmepumpe, einem Medium Wärme auf niedrigerem Temperaturniveau zu entziehen und diese dann durch Zufuhr höherwertiger Energie auf einem höheren Temperaturniveau für die praktische Nutzung verwendbar zu machen, ist bereits seit Mitte des 19. Jahrhunderts bekannt. Wirtschaftliche Bedeutung erlangte die Wärmepumpe aber fast nur als Kältemaschine (umgekehrte Wärmepumpe), denn für die kontinuierliche Kühlung gibt es kein konkurrierendes Verfahren [1]. So verrichten zahlreiche Wärmepumpen in Haushaltskühlschränken schon seit einigen Jahrzehnten zuverlässig ihre Arbeit.

Etwas anders ist die Situation für Wärmepumpen-Heizungsanlagen, obgleich bereits vor dem 2. Weltkrieg in der Schweiz vorbildliche Anlagen geschaffen wurden [2] und in dem Einsatz von Wärmepumpen-Heizungsanlagen eine Möglichkeit gesehen wird, den Verbrauch hochwertiger und nur begrenzt verfügbarer Primärenergie zu senken. Aber sie müssen mit den bekannten Heizverfahren konkurrieren und hatten solange keine Chancen, wie Heizenergie in fossilen Brennstoffen billig und reichlich zur Verfügung stand.

Mit der Verknappung der fossilen Brennstoffe bzw. deren drastischer Preiserhöhung in den siebziger Jahren nahm das Interesse an Wärmepumpen-Heizungsanlagen jedoch wieder zu. Optimistische Perspektiven sahen sie bereits in klimatisch geeigneten Gebieten die konventionelle Heizung weitgehend ablösen [3]. Wie in der Vergangenheit behindern aber außer den erforderlichen höheren Investitionen zusätzlich noch bestehende Unsicherheiten über die tatsächlich erreichbaren Energieeinsparungen eine derartige Umstellung auf breiter Basis.

Eine Wärmepumpen-Heizungsanlage entsteht aus der Kombination einer Wärmepumpenanlage mit einer Wärmenutzungsanlage. Letztere besteht aus den Einrichtungen zum Transport des Wärmeträgers (z.B. Heizwasser) von der warmen Seite der Wärmepumpe zu den Verbrauchern und der Wärmeverteilung einschließlich aller Zusatzeinrichtungen [4], während die Wärmepumpenanlage die eigentliche Wärmepumpe und die Wärmequellenanlage umfaßt.

Wesentliche Voraussetzung für die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe ist folglich eine geeignete und sichere Wärmequelle, der im Wärmepumpen-Kreisprozeß die Niedertemperatur-Wärme entzogen werden kann. Wichtig ist vor allem, daß der Temperaturunterschied zwischen der Wärmequelle und der Wärmenutzungsanlage möglichst gering ist; denn je geringer dieser Temperaturunterschied ist, desto weniger hochwertige Antriebsenergie wird für den Verdichter erforderlich und desto wirtschaftlicher arbeitet die Wärmepumpe.

Als natürliche wärmeliefernde Medien stehen nach Bild 1 die Energieträger Außenluft, Oberflächen- oder Grundwasser, Erdreich und Sonnenenergie zur Verfügung [5], deren wesentliches gemeinsames Merkmal darin besteht, daß sie die Wärme dem normalen Klimageschehen entnehmen. Insbesondere für landwirtschaftliche Betriebe, Gärtnereien und Eigenheime mit einer ausreichend großen Grundstücksfläche bietet sich dabei das Erdreich als ganzjähriger ausschließlicher Energielieferant für die Wärmepumpe an.

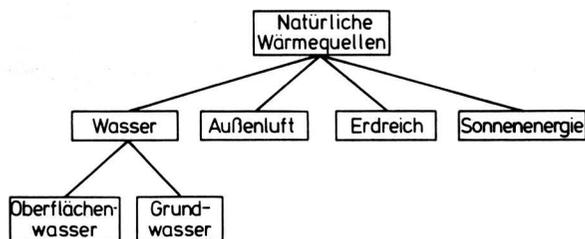


Bild 1. Natürliche Wärmequellen für Wärmepumpen.

Neben konstruktiven Fragen wie Rohrlänge, -durchmesser, -verlegung usw. interessieren bei dieser Wärmepumpen-Heizungsanlage vor allem auch die Wechselwirkungen zwischen dem Boden und dem Wärmeentzug. Im allgemeinen handelt es sich um Anlagen mit horizontal im Erdboden verlegten Wärmetauschern. Vertikal eingebaute Wärmetauscher werden bei einer begrenzten Grundfläche hauptsächlich bei steinigem oder felsigem Untergrund eingesetzt.

Als 1984 die Beheizung zweier Versuchshallen des Instituts für Biosystemtechnik der FAL anstand, wurden zwei baugleiche Wärmepumpen gewählt, die u.a. auch für Untersuchungen dienen sollen, wie sich der Wärmeentzug auf den Temperaturverlauf im Erdboden auswirkt, ob sich eventuell Vegetationsrückstände oder -schäden ergeben können und ob beim heutigen Stand der Technik derartige Wärmepumpen im landwirtschaftlichen Bereich einsetzbar sind und zu einer Einsparung wertvoller Primärenergie unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten führen können.

Für die Nutzung des Erdbodens als Wärmequelle sind Kenntnisse z.B. über die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität von außerordentlicher Wichtigkeit. Diese Größen hängen direkt von der Bodenart, -dichte und -feuchte ab, während sie indirekt und nichtlinear auch von Wärme- und Stofftransportprozessen beeinflusst werden. Deshalb wird im folgenden zunächst auf die thermischen Eigenschaften des Erdbodens näher eingegangen. Nach einem kurzen Überblick über Ergebnisse aus dem Schrifttum werden dann im Hauptteil der Arbeit die bisherigen Erfahrungen beim Betrieb unserer Wärmepumpen und Ergebnisse über den Temperaturgang im Erdboden während der Heizperiode und die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpen mitgeteilt.

2. Erdreich als Wärmequelle

Das Erdreich ist ein natürlicher Wärmespeicher, der im Verlauf des Sommerhalbjahres aufgrund des Stoff- und Wärmeaustausches mit der Atmosphäre aufgeladen wird und dann im Winterhalbjahr als Wärmequelle für eine Wärmepumpe genutzt werden kann.

Die Tagesschwankungen von Lufttemperatur, Sonnenstrahlung usw. wirken sich nur in den obersten Bodenschichten aus, der jährliche Temperaturgang der Außenlufttemperatur ist dagegen in dem für den Wärmeentzug vorgesehenen Bodenhorizont von 0,5–2,0 m Tiefe noch relativ gut zu erkennen, Bild 2. Es stellt sich eine von der Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit sowie der Wärmekapazität des Erdbodens abhängige Phasenverschiebung zwischen der Außenluft- und der Bodentemperatur ein, so daß der Erdboden im Hinblick auf Temperatur, örtliche und zeitliche Verfügbarkeit als eine recht günstige Wärmequelle für Wärmepumpen gelten kann.

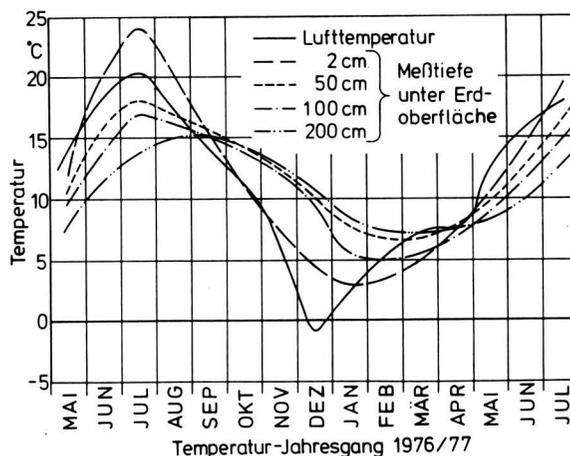


Bild 2. Jahresgang der Temperatur im Erdboden; nach [6].

2.1 Eignung des Erdbodens

Die Eignung verschiedener Böden als Wärmequelle für Wärmepumpen ist jedoch unterschiedlich. Von Bedeutung für den möglichen Wärmeentzug ist zunächst einmal die Bodentiefe, daneben aber spielen Bodenart und -struktur, d.h. mineralische Zusammensetzung, Anteile an organischer Substanz, Wasser und Luft, wegen der unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften dieser Bestandteile unter dem Gesichtspunkt eines möglichst hohen Wärmeentzuges aus dem Erdboden die entscheidende Rolle.

Das Wärmespeichungsvermögen eines Bodens wird durch seine spezifische Wärmekapazität bestimmt, die wiederum stark durch den Wassergehalt des Bodens beeinflusst wird und oberhalb von 0 °C linear mit der Temperatur ansteigt. Bild 3 zeigt diese Abhängigkeiten für eine bestimmte Bodenart. Während die zu einem Wassergehalt von 0–1 % gehörenden Kurven bei 0 °C eine leichte Unstetigkeit aufweisen, zeigt sich bei den feuchteren Böden um 0 °C ein Sprung in der spezifischen Wärmekapazität, verursacht durch den Phasenwechsel fest/flüssig bzw. flüssig/fest des im Boden enthaltenen Wassers. Die aus der Vereisung des Wassers bei Temperaturen um 0 °C gewinnbare Wärmeenergie kann somit erheblich sein. Dieser Phasenwechsel ist bei der Nutzung des Erdbodens als Wärmequelle auch insofern bedeutsam, als während des Wärmeentzugs eine Feuchtigkeitswanderung durch Diffusion zum Wärmetauscher hin stattfindet, so daß sowohl die spezifische Wärmekapazität als auch die Wärmeleitfähigkeit in der Nähe des Wärmetauschers beträchtlich ansteigen können.

Der Wärmetransport im Boden erfolgt im wesentlichen durch Wärmeleitung, und die Wärmeleitfähigkeit hängt vornehmlich von der mineralischen Zusammensetzung und dem in den Poren enthalte-

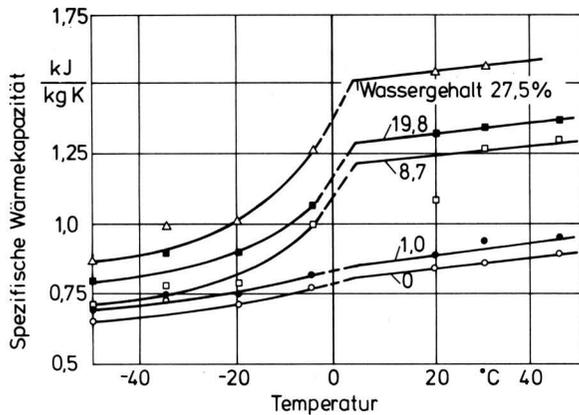


Bild 3. Spezifische Wärmekapazität von Sand in Abhängigkeit von der Temperatur für fünf verschiedene Wassergehalte; nach Farouki [7].

nen Wasser ab, **Bild 4**. So kann bei dem gleichen Boden u.U. die Wärmeleitfähigkeit um eine Zehnerpotenz differieren, je nachdem, ob er trocken oder naß ist. Die beste Eignung für einen Wärmeentzug weisen Böden mit einem hohen Quarz- und Wassergehalt auf, wie die relativ große Wärmeleitfähigkeit des Sandbodens in **Bild 4** zeigt. Andererseits haben Lehm- oder Tonböden ein sehr viel höheres Wasserbindungsvermögen und können somit auch mehr Wärme speichern.

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß beim Wärmeentzug aus dem Erdboden der Wassergehalt auch insofern eine große Bedeutung hat, als Eis eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Wasser hat [7] und somit eine Erhöhung der Wärmeleitung im gefrorenen Erdboden eintritt.

Weitere mit der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens im Zusammenhang stehende Einflußgrößen sind natürlich die Höhe des Grundwasserspiegels, der Niederschlag, die Verdunstung usw., deren Einfluß aber bis heute noch nicht vollends geklärt ist.

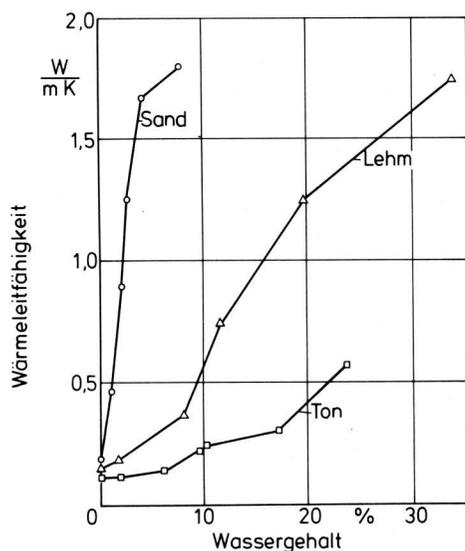


Bild 4. Wärmeleitfähigkeit von drei Bodenarten in Abhängigkeit vom Wassergehalt; nach Farouki [7].

2.2 Nutzung der Wärmequelle Erdboden

Um den Erdboden als Wärmequelle für eine Wärmepumpe zu nutzen, sind zwei Grundprinzipien bekannt. Beim Direkte-Verdampfungssystem wird das Kältemittel der Wärmepumpe direkt durch ein im Erdreich verlegtes Röhrensystem geleitet [8]. Der Wärmetauscher im Erdboden ist gleichzeitig der Verdampfer der Wärmepumpenanlage, und die Erdwärme wird durch Direktverdampfung vom Kältemittel aufgenommen und weitertransportiert. Die Nachteile dieses Verfahrens liegen hauptsächlich darin, daß sich Undichtigkeiten an den Rohranschlüssen oder im Rohr während der Heizperiode katastrophal auswirken können. Außerdem erfordert dieses Verfahren eine äußerst sorgfältige Installation, metallene (meist kupferne) Erdbohlenwärmetauscher und wird dadurch auch relativ teuer.

Deshalb wird allgemein das indirekte Verfahren bevorzugt, bei dem eine Wärmeträger-Flüssigkeit (Sole: meist Wasser mit Frostschutzmittel) das im Erdboden verlegte Röhrensystem durchfließt und dabei Wärme aufnimmt [9, 10]. Die Sole wiederum ist das wärme liefernde Medium für die Wärmepumpe und verbindet somit die Wärmepumpenanlage mit der Wärmequellenanlage.

Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, daß es speziell bei der Aufbereitung der Zuluft von Tierställen noch ein weiteres Verfahren gibt, den Erdboden als Wärmequelle zu nutzen, indem nämlich die Zuluft ganzjährig direkt durch ein im Erdreich verlegtes Röhrensystem geleitet wird und sich dabei je nach Jahreszeit erwärmt oder abkühlt [11 bis 13]. Bisherige Untersuchungen deuten auf eine erfolgreiche Anwendung dieses Verfahrens hin. Es wird auch bereits einer intensiven theoretischen Analyse unterzogen [14]. Dieses Verfahren ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

2.3 Bisherige Arbeiten

Wärmepumpen mit im Erdreich horizontal verlegten Wärmetauschern sind schon seit langem bekannt. Ende der 40er bis Mitte der 50er Jahre wurde insbesondere in den Vereinigten Staaten eine große Anzahl derartiger Anlagen installiert und experimentell untersucht [u.a. 15 bis 17]. Aus dieser Zeit stammen auch die ersten Ansätze zur analytischen Berechnung der Erdbodentemperatur bei Wärmeentzug [18, 19]. Aber erst in jüngster Zeit nach der Ölpreiserhöhung 1973 werden weltweit systematische experimentelle und auch theoretische Analysen durchgeführt [u.a. 20 bis 23]. Im Vordergrund der Bemühungen stand dabei die Verifizierung bzw. Erweiterung schon bekannter Ergebnisse und Planungshinweise hinsichtlich Verlegetiefe, Rohrmaterial, -durchmesser und -abstand der Wärmetauscher im Erdboden.

Dennoch zeigen sich insbesondere bei den Angaben über Verlegetiefe, Rohrabstand und die maximale Wärmeentzugsdichte noch erhebliche Widersprüche, **Tafel 1**. Generell wird immer noch der Flächenbedarf für die horizontal verlegten Wärmetauscher im Boden recht global mit etwa dem 1,5–2,5fachen der zu beheizenden Grundfläche angegeben [6, 28]. Auch dadurch werden Einsatzmöglichkeiten und Verbreitung dieses Wärmepumpentyps bisher noch sehr eingeschränkt, der hauptsächlich bei Neubauten zum Zuge kommt.

Die Beheizung von zwei Versuchshallen des Instituts für Biosystemtechnik mit Wärmepumpen-Heizanlagen gleicher Leistung, deren Bodenwärmetauscher unterschiedlich dimensioniert und verlegt sind, gibt nun die Möglichkeit, die Eigenschaften der im Hinblick auf Temperatur, örtliche und zeitliche Verfügbarkeit günstigen Wärmequelle in ländlichen Gebieten, insbesondere für einzeln stehende landwirtschaftliche Betriebe, näher zu untersuchen und dabei eventuell auch Aussagen über den Flächenbedarf der Wärmetauscherrohre, die kostengünstigste Auslegung und den Betrieb derartiger Anlagen zu gewinnen. Im Mittelpunkt dieses Berichtes stehen jedoch die Beschreibung des Temperaturganges im Boden als Folge des Wärmeentzuges und Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit dieser Wärmepumpen-Heizungsanlagen.

Verlegediefe m	abstand m	Wärmeentzug bezogen auf		Leistungs- ziffer	Schrifttum
		Grundfl. W/m ²	Rohrlänge W/m		
1,5	1,0	30	17	3,1	8
1,6	0,7	21	12	3,0	9
1,8	1,2	26	28	3,5	10
1,5	0,4	—	38	—	17
1,5	—	—	21	—	20
1,0	1,0	—	33	3,1	24
1,6	0,5	26	13	3,3	25
1,8	0,2	52	11	—	26
1,4	0,4	29	12	(3,5)	27

Tafel 1. Im Schrifttum angegebene Auslegungsdaten über ausgeführte Anlagen.

3. Versuchsaufbau

3.1 Gebäude

Die Lage der zu beheizenden Gebäude im Institutskomplex geht aus dem Lageplan in Bild 5 hervor. Es handelt sich um eine Halle (H1) mit einer Grundfläche von etwa 110 m² und einem 24 cm dicken Mauerwerk. In der zum östlichen Hallenvorplatz gelegenen Längswand befinden sich große schlecht isolierte Hallentore, so daß sich bei einer angestrebten mittleren Raumtemperatur von $\vartheta_R = 15\text{ °C}$ ein sehr hoher spezifischer Wärmebedarf von fast 130 W/m² ergibt. Die zweite Halle (H2) hat eine Grundfläche von etwa 96 m² und einen etwa 15 m² großen Anbau (A). Die Wände dieses Anbaus bestehen aus einer Holz-Stülpchalung mit einer Styroporisolierung auf der Innenseite. Die Seitenwände der Halle sind aus Kalksandsteinen gemauert und auf einer Seite außen mit einer Holz-Stülpchalung versehen, während zwei Seitenwände ein Verblendmauerwerk erhalten haben. In der zum Hallenvorplatz gelegenen Längswand befinden sich zwei ungefähr 16 m² große Eisentore. Bei der angestrebten mittleren Raumtemperatur von $\vartheta_R = 15\text{ °C}$ beläuft sich dadurch der maximale Wärmebedarf des Gebäudes nach DIN 4701 auf ungefähr $Q_H = 15\text{ kW}$ mit einem bezogen auf die gesamte zu beheizende Grundfläche, hohen spezifischen Wärmebedarf von 135 W/m².

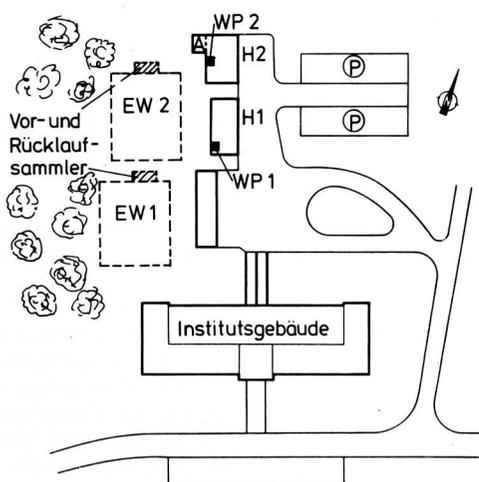


Bild 5. Lageplan der beheizten Gebäude und der Erdreichwärmetauscher.

Als Wärmequelle dient der Erdboden der nicht bebauten Fläche unmittelbar hinter den Versuchshallen. Wie aus dem Lageplan in Bild 5 zu ersehen ist, grenzt der Wärmeentnahmebereich auf einer Längsseite an die Hallen und Garagen an. Auf der gegenüberliegenden Seite wachsen alte Buchen von etwa 25 m Höhe, so daß insbesondere bei niedrigem Sonnenstand im Winterhalbjahr die Fläche fast ständig beschattet ist.

Die Wärmetauscherrohre sind in Einzelgräben verlegt, die mit einer Fräsmaschine ausgehoben wurden, Bild 6. Nach dem Verlegen der Kunststoffrohre wurden die Gräben wieder mit dem Aushub gefüllt. Der Erdboden besteht aus Sand und Lehm und war während der Heizperiode 1985/86 von Lupine und im nachfolgenden Jahr von Gras bestanden.



Bild 6. Graben mit Wärmetauscherrohr.

3.2 Solekreislauf

Da für den Einsatz zweier Wärmepumpen mit einer Gesamtheizleistung von 30 kW nach den Vorgaben der Lieferfirma die insgesamt vorgesehene Grundfläche zu klein war, wurde die Heizleistung auf zweimal 10 kW reduziert. Die für die Wärmepumpe WP1 notwendige Gesamtrohrlänge von 400 m des Erdwärmetauschers EW1 in Bild 5 aus PE-Rohren in den Abmaßen 45 x 4 mm wurde in 4 parallele Kreise von je 100 m Länge unterteilt. Der Aufbau dieser Versuchsanlage ist im Schema von Bild 7 mit zwei Kreisen dargestellt.

Als wahrscheinlich optimale Werte von Verlegeabstand und -tiefe werden 1–1,5 m bzw. 0,5–1,0 m angegeben [24]. Für diese Versuchsanlage wurde die Verlegediefe der Kreise 1, 2 und 3 unterschiedlich gewählt, während der Rohrabstand konstant gehalten wurde, Tafel 2.

Gleiche Verlegediefe haben die Kreise 3 und 4; wobei aber Kreis 4 in Sand gebettet wurde. Aufgrund der erläuterten thermischen Eigenschaften kann der um das Rohr befindliche Sand infolge der Feuchtigkeitsbewegung die Wärmeleitfähigkeit in unmittelbarer Nähe des Wärmetauschers verbessern, besonders bei einer hohen Wärmeentzugsdichte. Außerdem hat die Sandeinbettung den Vorteil, der Bildung von Hohlräumen vorzubeugen, die in der Nachbarschaft des Wärmetauschers durch die Volumenvergrößerung beim Gefrieren während des anschließenden Wiederauftauens entstehen können.

Der zweite Erdwärmetauscher (EW2) mit PE-Rohren 20 x 2 mm hat eine Gesamtrohrlänge von 800 m, die in 8 Kreise zu je 100 m Länge unterteilt ist. Der Aufbau der Versuchsanlage entspricht im übrigen dem in Bild 7. Um auf die gleiche Grundfläche wie bei dem Erdwärmetauscher EW1 zu kommen, wurden von den 8 Kreisen jeweils zwei übereinander in den mit der Fräsmaschine gezogenen Gräben verlegt. 4 Kreise sind 1,20 m tief unter der Erdoberfläche eingebettet. Über diesen 4 Kreisen sind die restlichen 4

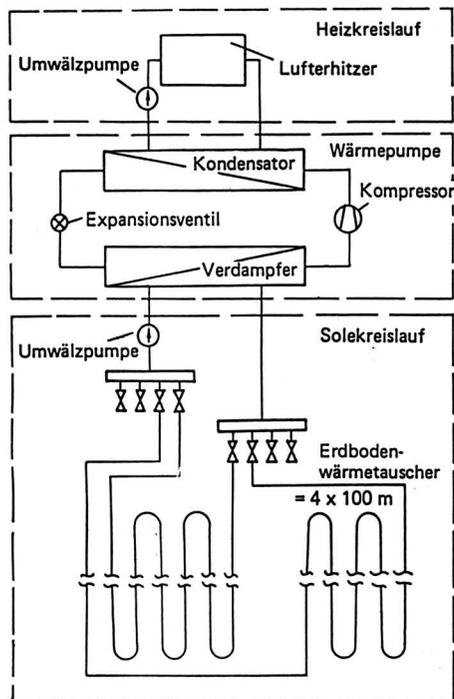


Bild 7. Schema der Wärmepumpen-Heizanlage.

Wärmetauscher-Kreis	1	2	3	4
Rohrabstand	m	1	1	1
Verlegetiefe	m	0,6	0,8	1

Tafel 2. Daten für Erdwärmetauscher EW1.

Kreise mit unterschiedlichem Abstand von 0,3, 0,4, 0,5 und 0,6 m verlegt, so daß die oberen Kreise sich 0,6 bis 0,9 m unter der Erdoberfläche befinden.

3.3 Wärmepumpen

Das Kernstück der gesamten Heizanlagen sind die Schrankaggragate, die in kompakter Ausführung folgende Teile enthalten, Bild 7:

- einen Kompressor, Nennleistung 3,9 kW
- einen Verdampfer
- einen Kondensator
- eine Soleumwälzpumpe, Anschlußwert 100 W
- eine Heizwasserumwälzpumpe, Anschlußwert 100 W
- eine Steuer- und Regeleinrichtung.

Nach Angaben des Herstellers können die Wärmepumpen bei einer Temperatur der Wärmequellen von 0 °C in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur auf der Wärmenutzungsseite eine Wärmeleistung bis zu 11,6 kW liefern. Die Sole in den Erdreichwärmetauschern enthält als Frostschutzmittel Äthylenglykol. Der anfangs auf - 10 °C eingestellte Gefrierpunkt der Sole wurde im Heizjahr 1986/87 auf - 20 °C abgesenkt. Die maximal zulässige Warmwasser-Vorlauftemperatur des Heizwassers beträgt etwa 60 °C.

3.4 Heizkreislauf

Die Wärmeabgabe in den Hallen erfolgt über Lufterhitzer mit Zwangsumwälzung, da ein nachträglicher Einbau einer Fußbodenheizung z.B. nicht mehr möglich war. In der Halle H1 sind zwei

Lufterhitzer mit einem vom Hersteller genannten maximalen Luftvolumenstrom von je 1350 m³/h und einer maximalen Heizleistung von ungefähr 25 kW angebracht, während in der Halle H2 nur ein Lufterhitzer mit einem vom Hersteller genannten maximalen Luftvolumenstrom von 2700 m³/h und einer maximalen Heizleistung von ca. 44 kW eingesetzt ist.

3.5 Aufbau der Meßeinrichtung

Gemessen wurden die Erdbodentemperatur an verschiedenen Stellen, die Temperatur und Durchflußmenge des Heizwassers und der Sole sowie der Stromverbrauch und die Laufzeiten der Anlagen. Außerdem wurden die Außen-, Raumluft- und Heizlufttemperaturen am Konvektorausgang aufgezeichnet. Die Temperaturen wurden digital bei einer Meßperiodendauer von einer Stunde registriert. Die Anordnung der Meßstellen in der Vertikalebene der Rohrstränge des Erdwärmetauschers EW1 ist aus dem linken Teil von Bild 8 zu ersehen. An der Meßstelle C wird die Temperatur an der Rohroberfläche der Soleleitung ermittelt, die Meßstelle D liegt 0,3 m unterhalb der Wärmetauscherebene. Gemessen wurde an Vor- und Rücklaufseite etwa 20 m von den Sammlern entfernt. In gleichen Tiefen wurden an einer nicht vom Wärmeentzug beeinflussten Referenzstelle die Bodentemperaturen aufgenommen.

Bei den übereinander verlegten Rohren des Erdbo-denwärmetauschers EW2 wurden die Erdbodentemperaturen an fünf übereinanderliegenden Stellen registriert, rechter Teil von Bild 8. Diese Messung der Erdbodentemperatur in der Vertikalebene erfolgte jedoch nur für die 1,2 m und 0,8 m tief verlegten Kreise an der Solevor- und -rücklaufseite, während für die anderen Kreise jeweils die Soletemperaturen am Übergang zum Vor- bzw. Rücklaufsammler gemessen wurden. Die über einen Multiplexer und Mikrorechner gesammelten Meßwerte wurden mittels eines PC mit Floppy-Disk gespeichert.

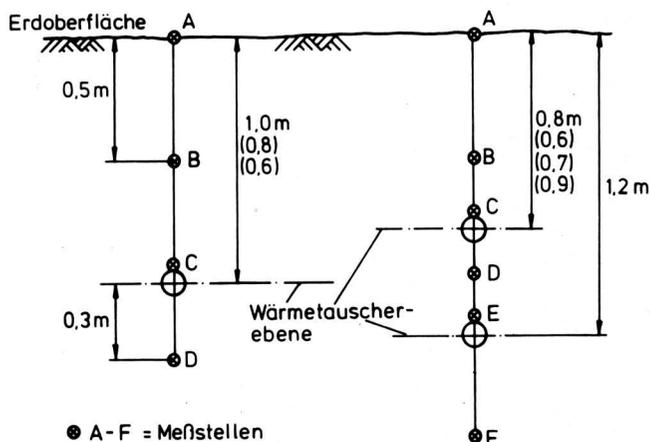


Bild 8. Anordnung der Temperaturmeßstellen im Boden.

3.6 Versuchszeitraum und -durchführung

Der Betrieb der Anlage wurde über drei Heizperioden beobachtet. Im Winterhalbjahr 1984/85 beschränkte sich der Betrieb jedoch nur auf Vorversuche, die der Erprobung von Anlage und Meßapparatur mit Korrektur auftretender Fehler und Störungen dienten. Die späteren Messungen begannen am 25. Oktober und dauerten jeweils bis zum Juni des folgenden Jahres. Die Wärmepumpen wurden etwa 4 Tage nach Meßbeginn eingeschaltet und liefen bis auf eine unvermeidliche Unterbrechung im November 1985 kontinuierlich bis Mitte April des nächsten Jahres.

Der Versuchsablauf sah vor, daß in den Räumen tagsüber (7.00 bis 16.00 Uhr) eine Solltemperatur von 18 °C, in der restlichen Zeit (16.00–7.00 Uhr) eine Solltemperatur von 10 °C eingehalten werden sollte.

4. Versuchsergebnisse

Insgesamt arbeiteten die Wärmepumpen-Heizungsanlagen während der drei Heizperioden sehr zuverlässig und liefen bis auf eine kurze Unterbrechung in der Heizperiode 1985/86 nahezu wartungsfrei.

4.1 Wärmepumpe 1

Der Wärmeentzug aus dem Erdreich betrug für die Wärmepumpe 1 über die gesamte Heizperiode auf die Rohrlänge bezogen ca. 15 W/m bzw. auf die Grundfläche bezogen 15 W/m². Die tiefsten Temperaturen der Sole lagen im Februar 1986 am Wärmepumpeneingang bei - 2,4 °C und im Februar 1987 bei - 1,6 °C, am Wärmepumpenausgang bei - 4 °C bzw. - 3,2 °C. Die Heizwassertemperaturen betragen zu diesen Zeitpunkten im Vorlauf 45,9 °C bzw. 44,3 °C und im Rücklauf 40,0 °C bzw. 38,3 °C.

Die Heizleistung der Wärmepumpe 1 und der Wärmeentzug aus dem Erdreich sind für Zeitabschnitte von jeweils 10 Tagen in **Bild 9** für die beiden Heizperioden 1985/86 und 1986/87 aufgetragen. Die größte Heizleistung wurde in der Heizperiode 1985/86 im Februar und in der Heizperiode 1986/87 im Januar in Anspruch genommen. Dem Erdreich wurden 1985/86 in 2227 Betriebsstunden der Wärmepumpe insgesamt 12957 kWh und 1986/87 in 2096 Betriebsstunden 11456 kWh entzogen. Die Heizleistung betrug in der Heizperiode 1985/86 insgesamt ca. 17706 kWh und in der Heizperiode 1986/87 ca. 17384 kWh. In diesen Wintern traten jedoch mehrfach über einen längeren Zeitraum Außenlufttemperaturen von - 20 °C und niedriger auf, und die installierte Heizleistung der Wärmepumpe reichte zu dieser Zeit nicht mehr aus, um in der Halle Lufttemperaturen oberhalb des Gefrierpunktes zu sichern.

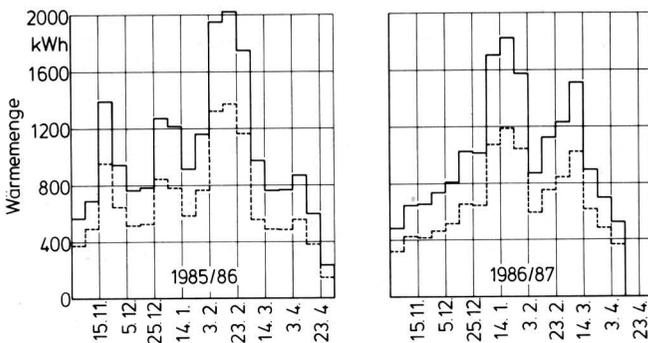


Bild 9. Wärmeentzug aus dem Boden und Heizleistung der Wärmepumpe 1 für Zeitspannen von 10 Tagen.

----- Wärmeentzug aus dem Erdreich
 ——— Heizleistung der Wärmepumpe

Die Mittlere Anlagen-Leistungsziffer (Jahresarbeitszahl) betrug unter Einrechnung des Strombedarfs für die Umwälzpumpen und die Steuereinrichtung in der Heizperiode 1985/86 etwa 2,6 und in der Heizperiode 1986/87 etwa 2,3. Unter Berücksichtigung der Leistungsaufnahme der Ventilatoren in den beiden Lufterhitzern betrug sie sogar nur 2,0 bzw. 1,7. Die Leistungsziffer nimmt dabei während der Heizperiode mit fortschreitender Laufzeit der Wärmepumpe ab, da infolge des Wärmeentzuges die Bodentemperatur und somit auch die Soletemperatur absinken. Deshalb sollte in der Zeit bis etwa Ende März, d.h. solange ein nennenswerter Wärmeentzug aus der Atmosphäre in den Boden normalerweise nicht zu erwarten ist, die Soletemperatur nicht zu tief abfallen, da sonst die Heizleistung der installierten Wärmepumpe u.U. nicht mehr ausreicht.

Bild 10 zeigt für die Heizperiode 1985/86 im mittleren Teil die für den Tag- bzw. Nachtbetrieb gemittelten Erdbodentemperaturen an der Oberfläche des 1 m tief im Sandbett verlegten Wärmetauscherrohres und an den benachbarten Meßstellen B (0,5 m) und D (1,3 m) nach Bild 8 links. Im oberen Bildteil ist die zugehörige mittlere Außenlufttemperatur, im unteren sind die auf den Meßzeitraum normierten Betriebsstunden der Wärmepumpe aufgetragen. Nach dem Einschalten der Wärmepumpe sinkt die Oberflächentemperatur am Wärmetauscherrohr zunächst fast kontinuierlich bis nahe dem Gefrierpunkt ab, trotz gelegentlicher Temperaturzunahmen aufgrund atmosphärischer Wärmeeinträge durch höhere Außenlufttemperaturen, Sonnenstrahlung oder Niederschläge. Die Erdbodentemperaturen an den benachbarten Meßstellen B und D folgen diesem Verlauf relativ gleichmäßig; Wärmeentzugsänderungen von außen wirken sich dabei naturgemäß auf die Erdbodentemperatur in einer Tiefe von 0,5 m sehr viel stärker aus als an den beiden anderen Meßstellen.

Durch die unterschiedlichen Solltemperaturen während des Tag- bzw. Nachtbetriebes und die damit verbundenen längeren Stillstandzeiten bzw. die geringeren Laufzeiten in der Nacht tritt vornehmlich bei Außenlufttemperaturen oberhalb 0 °C am Wärmetauscherrohr ein pulsierender Temperaturverlauf auf. Die Temperatursprünge werden aber um so kleiner, je mehr sich die mittlere Oberflächentemperatur dem Gefrierpunkt nähert. Nach Ablauf der Heizperiode werden insbesondere in den oberen Erdschichten relativ schnell wieder Temperaturen erreicht, die auch an den nicht dem Wärmeentzug ausgesetzten Referenzstellen gemessen werden.

Bild 11 zeigt die an den Meßstellen A–D in Intervallen von 30 Tagen gewonnenen mittleren Erdbodentemperaturen für die Heizperiode 1985/86. Aufgetragen sind die Temperaturprofile in den Vertikalebene durch die drei verschieden tief im Erdboden liegenden Vorlaufrohre des Erdbodenwärmetauschers und an der Referenzstelle. Außerdem eingezeichnet sind als Meßpunkte Erdbodentemperaturen, die von der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle (AMF) Braunschweig-Völkenrode an anderer Stelle auf dem Gelände der FAL in unterschiedlichen Tiefen gemessen wurden [29].

Am 26.10.1985 liegen alle Meßwerte noch relativ nahe beieinander und geben den natürlichen Temperaturverlauf im Erdboden zu dieser Jahreszeit wieder. Die von der AMF mitgeteilten Meßwerte weichen nur geringfügig von den eigenen Meßwerten ab. Der beginnende Wärmeentzug verändert das Temperaturprofil drastisch. Nach ca. 30 Tagen (25.11.) mit einem Wärmeentzug von insgesamt annähernd 1800 kWh sind an zwei Wärmetauscherrohren die Bodentemperaturen auf fast 0 °C gesunken. Oberhalb der Wärmetauscherrohre kühlt der Boden gleichfalls stark aus, so daß in dem gesamten Bereich die Bodentemperaturen nur geringfügig voneinander abweichen. Obwohl sich der Wärmeentzug natürlich auch auf die Erdschichten unterhalb der Wärmetauscherebene auswirkt, liegt infolge der aus den tieferen Erdschichten nachgelieferten Wärmemenge die Bodentemperatur 0,3 m unterhalb des Wärmetauschers noch etwa 3 °C über der am Tauscher selbst. Diese Temperaturdifferenz ist weitgehend unabhängig von der Tiefe, in der sich jeweils der Wärmetauscher befindet.

Der Temperaturverlauf in der Vertikalebene durch den 0,8 m tief verlegten Wärmetauscher weicht zu diesem Zeitpunkt aber nur wenig von dem an der Referenzstelle ab. Das dürfte damit zusammenhängen, daß in diesem Rohr eine Luftblase eine entsprechende Rohrdurchströmung verhinderte. Sie konnte jedoch während einer etwa dreitägigen Unterbrechung (s. Bild 10) entfernt werden.

Der nachfolgend bis zum 25.12.1985 geringere und gleichmäßigere Wärmeentzug von unter 1700 kWh in 30 Tagen – bedingt durch relativ hohe Außenlufttemperaturen (Bild 10, oben) – führt, verbunden mit hohen Niederschlagsmengen während dieser Zeit, zu einem Wiederanstieg der Bodentemperaturen, die am Wärmetauscher noch etwa 2 °C erreichen. Weniger ausgeprägt sind die Temperaturzunahmen 0,3 m unter der Wärmetauscherebene.

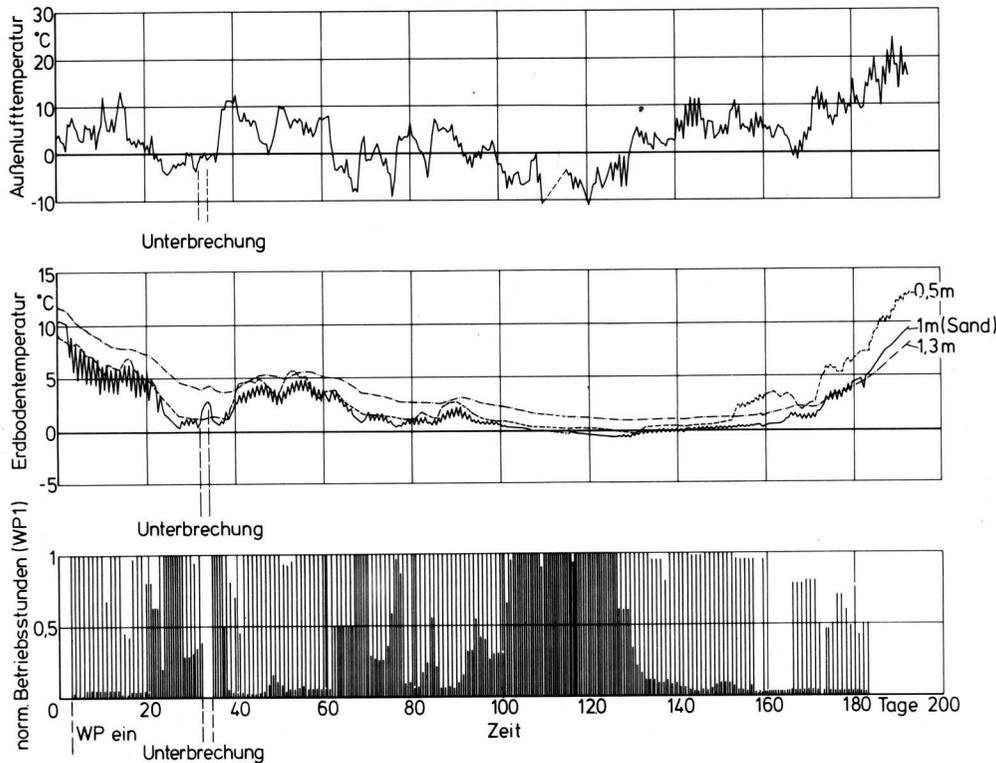


Bild 10. Verlauf der Außenlufttemperatur, der Bodentemperatur am und nahe dem 1 m tief im Sandbett verlegten Wärmetauscherrohr und der normierten Betriebszeit der Wärmepumpe 1.

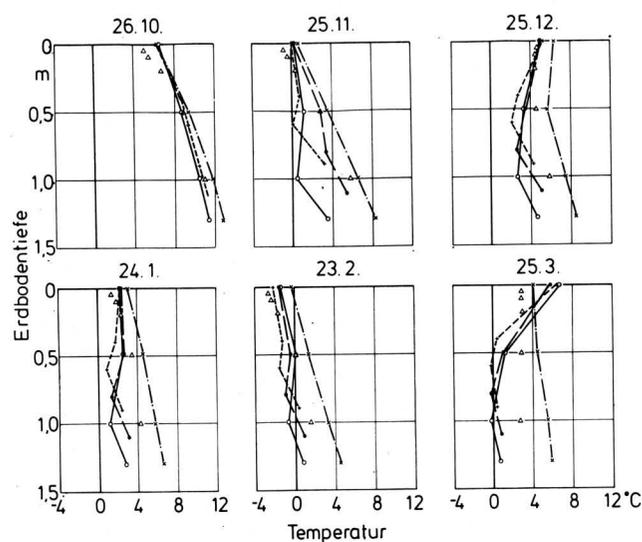


Bild 11. Temperaturprofile in der Vertikalebene der verschieden tief verlegten Wärmetauscherrohre, aufgenommen im Abstand von 30 Tagen für den Erdwärmetauscher 1; zum Vergleich Meßwerte der Referenzmeßstelle und der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle (AMF) Braunschweig-Völkenrode [29].

Tiefe des Rohrbündels
 - - - - 0,6 m
 - - - 0,8 m
 ——— 1,0 m

--- Referenzmeßstelle
 ΔΔ Messungen der AMF

Durch den anschließend wieder verstärkten Wärmeentzug sinken die Erdbodentemperaturen dann bis Ende Februar/Anfang März 1986 wieder ab auf Minimalwerte von etwa -1 °C an dem Wärmetauscher in 1 m Tiefe und etwa -2 °C an dem Wärmetauscher

in 0,6 m Tiefe. Aus dem Temperaturverlauf geht hervor, daß unterhalb des 0,6 m tief verlegten Wärmetauscherrohres der Erdboden bis 0,9 m tief gefroren ist und unterhalb des 1 m tief verlegten Rohres bis etwa 1,2 m tief. Der Temperaturgradient in den Erdschichten unterhalb der Wärmetauscher beträgt ca. $0,07\text{--}0,1\text{ K/cm}$. Oberhalb der Wärmetauscher ist der gesamte Erdboden vereist, wobei die horizontale Ausdehnung der Vereisung entlang der Wärmetauscherrohre zwischen 1 m und 0,2 m schwankt. Andererseits weisen aber die Vergleichswerte von der AMF darauf hin, daß zu diesem Zeitpunkt die Bodenfrostgrenze etwa 0,5 m unter der Erdoberfläche lag. Bei einer engeren Verlegung der Wärmetauscherrohre beispielsweise mit 0,4–0,5 m Abstand besteht somit durchaus die Gefahr, daß bei derart ungünstigen Witterungsbedingungen wie in diesen Wintern der gesamte Erdboden gegebenenfalls bis zu einer Tiefe von 1,3 m gefriert.

Mit dem verringerten Wärmeentzug aufgrund höherer Außenlufttemperaturen ab Anfang März 1986 (Bild 10) beginnt jedoch eine rasche Erwärmung zunächst der oberen Erdschichten, dann des gesamten Erdbodens. An den Wärmetauscherrohren steigt die Temperatur unabhängig von ihrer Tiefe bis zum 25. März 1986 auf etwa $-0,2\text{ °C}$ an. Dadurch verkleinert sich der Radius der Vereisungszone auf maximal 0,1 m. Die Erwärmung der oberen Erdschichten durch höhere Außenlufttemperaturen, Sonnenstrahlung und Niederschläge setzt sich relativ schnell nach unten fort, so daß etwa ab Mitte Mai auch in tieferen Schichten die Temperatur des nicht für den Wärmeentzug genutzten Erdreiches wieder erreicht wird. Grundsätzlich kann daraus gefolgert werden, daß eine Verlegetiefe von 0,6 m genügt, um den entsprechenden Wärmebedarf von jährlich ca. 20000 kWh ohne Gefahr der Dauereisbildung im Boden zu decken. Bei einem Verlegeabstand von 0,5 m muß allerdings bei dem vorliegenden auf die Rohrlänge bezogenen Wärmeentzug von ca. 15 W/m auch bei Verlegetiefen bis 1 m mit einer durchgehenden Vereisung des Erdbodens gerechnet werden, die sich aber nach dem Ende der Heizperiode bzw. mit dem Beginn höherer Wärmeeinträge aus der Atmosphäre in den Erdboden schnell wieder zurückbildet.

Zwischen dem 1 m tief im Sandbett bzw. dem im anstehenden Boden verlegten Wärmetauscherrohr ergibt sich kein meßbarer Unterschied hinsichtlich der Temperaturprofile im Erdboden.

4.2 Wärmepumpe 2

Die Heizleistung der baugleichen Wärmepumpe 2 und der Wärmeentzug aus dem Erdreich sind für Zeitabschnitte von jeweils 10 Tagen in **Bild 12** für die beiden Heizperioden aufgetragen. Dem Erdreich wurden in der Heizperiode 1985/86 in 2695 Betriebsstunden der Wärmepumpe insgesamt 13 155 kWh und 1986/87 in 2377 Betriebsstunden 11 156 kWh entzogen. Die Heizleistung betrug in der Heizperiode 1985/86 22 613 kWh und 1986/87 20 178 kWh. Auch hier reichte die installierte Heizleistung nicht aus, um bei langandauernden Minimaltemperaturen unter $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Lufttemperatur in der Halle über dem Gefrierpunkt zu halten.

Die Mittlere Anlagen-Leistungsziffer betrug unter Einrechnung des Strombedarfs für die Umwälzpumpen und die Steuereinrichtung in der Heizperiode 1985/86 etwa 2,5 und in der Heizperiode 1986/87 etwa 2,3. Bei Berücksichtigung der Leistungsaufnahme des Ventilators im Lufterhitzer sinkt sie auf etwa 2,1 bzw. 1,9. Die größte Heizleistung wurde im Februar 1986 und im März 1987 in Anspruch genommen. Auffallend ist der sehr hohe Wärmebedarf im November 1985. Er ist auf einen zu diesem Zeitpunkt ablaufenden Versuch in Halle 2 zurückzuführen, bei dem aus Sicherheitsgründen tagsüber die Türen geöffnet waren, der Betrieb der Wärmepumpe jedoch nicht unterbrochen wurde.

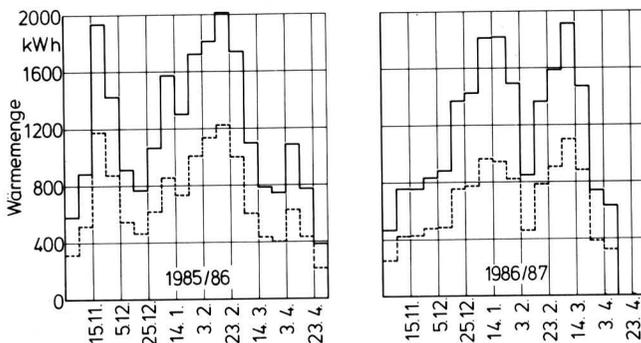


Bild 12. Wärmeentzug aus dem Boden und Heizleistung der Wärmepumpe 2 für Zeitspannen von 10 Tagen.

----- Wärmeentzug aus dem Erdreich
 ——— Heizleistung der Wärmepumpe

Der für diese Jahreszeit ungewöhnlich hohe Wärmeentzug aus dem Erdboden verursacht einen sehr großen Temperaturabfall im Boden, links in **Bild 13**. Aufgetragen sind in **Bild 13** die in zeitlichen Abständen von jeweils 30 Tagen ermittelten Temperaturprofile für die Heizperioden 1985/86 und 1986/87 in der Vertikalebene durch die in 1,2 m und um 0,8 m Tiefe verlegten Rohre etwa 10 m hinter dem Vorlaufsammler. Aufgrund des extrem hohen Wärmeentzuges im November 1985 nimmt in den ersten 30 Tagen nach Wärmepumpenanlauf (25.11. ----) die Erdbodentemperatur bis zu einer Bodentiefe von etwa 1,3 m um nahezu $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab, so daß sich am Rohr in 0,8 m Tiefe an der Vorlaufseite bereits eine Vereisungszone gebildet hat. Der Temperaturgradient unterhalb des Wärmetauscherrohres in 1,2 m Tiefe ist mit $0,14\text{ K/cm}$ relativ hoch; ein Zeichen dafür, daß bis zu diesem Zeitpunkt der überwiegende Teil der Wärme den oberen Erdschichten entzogen wurde. Trotz eines zeitweiligen Temperaturanstiegs bis zum 25.12.1985 (— · —) kühlt aber der Erdboden in der Folgezeit durch den Wärmeentzug so weit aus, daß er Ende Februar in der Vertikalebene der Wärmetauscherrohre bis zu einer Tiefe von etwa 1,3 m vollständig vereist ist. Bei einem geringeren Verlegeabstand als den hier vorliegenden 1 m könnte gegebenenfalls die gesamte Erdbodenschicht bis in eine Tiefe von 1,3 m gefrieren. Obgleich ab Anfang März der Wärmestrom aus der Atmosphäre in den Erdboden wieder zunimmt, wie aus den Temperaturen in den obersten Erdschichten zu erkennen ist, steigen die Temperaturen in den tieferen Erdschichten aufgrund des weiterhin notwendigen Wärmeentzuges nur sehr langsam an.

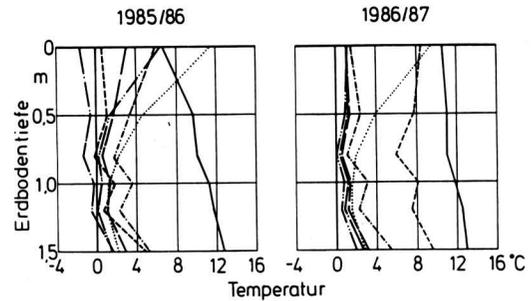


Bild 13. Temperaturprofile in der Vertikalebene der übereinander 0,8 und 1,2 m tief verlegten Wärmetauscherrohre der Wärmepumpe 2, aufgenommen im Abstand von 30 Tagen.

— 26.10. - - - 23.2.
 - - - 25.11. - - - 25.3.
 - - - 25.12. ····· 24.4.
 - - - 24.1.

Während der gesamten Heizperiode 1986/87 sinkt die Erdbodentemperatur nicht unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, rechts in **Bild 13**. Der moderate Wärmeentzug zu Beginn der Heizperiode 1986/87 verursacht mit etwa $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in den ersten 60 Tagen bis zum 25.12.1986 einen nur halb so schnellen Temperaturabfall wie in der Heizperiode 1985/86 ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 30 Tagen bis zum 25.11.). Anschließend fällt die Bodentemperatur trotz Wärmeentzuges kaum noch. Wie in der Heizperiode 1985/86 ist der Erdboden Ende April nach dem Wärmeentzug von 11 156 kWh jedoch noch sehr kalt. Nur bis zu einer Tiefe von 0,5 m unter der Erdoberfläche liegen die Temperaturen über $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Wärmeentzug über Wärmetauscherrohre, die in zwei übereinanderliegenden Ebenen verlegt worden sind, bringt bei gleichem auf die Grundfläche bezogenem Wärmestrom vom Boden an die Sole keine wesentlichen Nachteile gegenüber dem Wärmeentzug über ein in einer Ebene liegendes Rohrregister. Teilweise kühlt der Boden sogar nicht so stark aus. Ein sehr starker Wärmeentzug zu Beginn der Heizperiode und damit verbunden ein großer Temperaturabfall im Erdboden kann allerdings eine starke Vereisung des Erdbodens herbeiführen und sollte möglichst vermieden werden.

5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Entscheidung über den Einsatz einer Wärmepumpenanlage wird, wie bereits erwähnt, entscheidend von deren Wirtschaftlichkeit beeinflusst. Die erforderlichen Investitionen können nur dann als sinnvoll eingesetzt betrachtet werden, wenn die jährlichen Gesamtkosten der Wärmepumpen-Heizungsanlage niedriger sind als die jährlichen Gesamtkosten einer vergleichbaren konventionellen Heizungsanlage. Deshalb sollen Wirtschaftlichkeitsberechnungen die Entscheidung über die Investition erleichtern helfen, wobei unter Wirtschaftlichkeit ein Kosten/Nutzen-Vergleich zu verstehen ist.

Die jährlichen Gesamtkosten für Heizungen setzen sich aus den Energiekosten, den Kapitalkosten sowie den Kosten für Instandhaltung und Wartung zusammen [28]. Konventionelle Heizungsanlagen haben einen sehr großen Energiekostenanteil. Wärmepumpen dagegen verursachen wesentlich höhere Kapitalkosten bei allerdings mehr oder minder deutlich geringeren Energiekosten.

Tafel 3 zeigt einen Vergleich zwischen den Arbeitskosten für die monovalente Wärmepumpen-Heizungsanlage und eine monovalente Ölzentralheizungsanlage für den Zeitraum vom 26. Oktober bis 13. April. Der Berechnung wurden für Heizöl die Energiepreise im Dezember 1985 ($0,685\text{ DM/l}$) bzw. 1986 ($0,32\text{ DM/l}$) zugrunde gelegt. Die Kosten für die elektrische Energie wurden mit $0,15\text{ DM/kWh}$ (a) bzw. mit $0,25\text{ DM/kWh}$ (b) angesetzt. Die Arbeitskosten enthalten nur die verbrauchten Energiemengen der Wärmepumpen und des Kessels. Für die Energiekosten insgesamt kämen noch die fixen Kosten (z.B. Grundkosten für elektrische Energie usw.) hinzu. Bei der Ermittlung der Kosten für die monovalente Ölzentralheizung wurde ein Gesamtwirkungsgrad von $\eta_K = 0,8$ angenommen.

	Wärmepumpe	Zeitraum	Heizleistung kWh	Mittl. Anl. Leist.-Ziff.	Arbeitskosten		
					Wärmepumpe DM	Ölheizung DM	Differenz DM
a)	I	85/86*	19528	2,6	1126,60	1666,10	539,50
	I	86/87	17348	2,3	1131,40	1480,10	348,70
	II	85/86	22613	2,5	1356,80	1929,30	572,50
	II	86/87	20178	2,3	1316,00	1712,70	396,70
b)	I	85/86	19528	2,6	1877,70	1666,10	-211,60
	I	86/87	17348	2,3	1885,70	1480,10	-405,60
	II	85/86	22613	2,5	2261,30	1929,30	-332,00
	II	86/87	20178	2,3	2193,30	1712,70	-480,60

*) jeweils vom 26.10–13.4.

Tafel 3. Heizleistung und daraus resultierende Arbeitskosten für Wärmepumpe und Ölzentralheizung bei Preisen von 0,15 DM/kWh (a) bzw. 0,25 DM/kWh (b) für die elektrische Energie und Heizölpreisen von 0,685 DM/l (1985/86) und 0,32 DM/l (1986/87).

Da der Heizölpreis im Dezember 1986 mit 0,32 DM/l im Vergleich zum Vorjahr um mehr als die Hälfte gefallen war, sind die mit der Wärmepumpe erzielbaren Energiekosteneinsparungen für die Heizperiode 1986/87 natürlich kleiner. Bei einem Preis von 0,15 DM pro kWh für die elektrische Energie beträgt der Unterschied etwa 40 bis 60 DM/a. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß bei beiden Anlagen auch die Mittlere Anlagen-Leistungsziffer in der Heizperiode 1986/87 niedriger war. Bei einem Preis von 0,25 DM pro kWh für die elektrische Energie sind auch für den Heizölpreis von 0,685 DM/l im Dezember 1985 schon Mehrausgaben für die Wärmepumpe einzukalkulieren, die sich mit dem niedrigeren Heizölpreis 1986/87 und der niedrigeren Mittlere Anlagen-Leistungsziffer weiter erhöhen.

Die entscheidende Frage wird deshalb sein, wie hoch bei vorgegebenen Energiepreisen die Investitionskosten für diese Wärmepumpen-Heizungsanlage sein dürfen, um bei einer bestimmten Nutzungszeit noch Wirtschaftlichkeit zu erzielen.

Bei Wärmepumpen wird im allgemeinen von einer mittleren Nutzungsdauer von 13 Jahren ausgegangen [28] und im folgenden soll deshalb anhand einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung [28, 30] versucht werden, die Grenzen der Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpen-Heizanlage gegenüber der konventionellen Heizungsanlage aufzuzeigen bzw. die zulässigen Mehrkosten für die Investition der Wärmepumpe bei einer Nutzungsdauer von 13 Jahren und unter den gegebenen Energieeinsparungen auszurechnen. Die Rechnung wird durchgeführt für insgesamt 2200 Vollbenutzungsstunden im Jahr [31] in Abhängigkeit von der Mittlere Anlagen-Leistungsziffer und für vorgegebene unterschiedliche Preise von Heizöl und elektrischer Energie.

Bei diesen Berechnungen wird u.a. von folgenden Werten ausgegangen:

- Heizwert Heizöl EL: $H_u = 10 \text{ kWh/l}$
- Preis elektrischer Energie: 0,15 und 0,25 DM/kWh
- Mittlere Anlagen-Leistungsziffer: 2,0 2,5 und 2,8.

Bereitstellungspreise bleiben unberücksichtigt und für Wartungs- und Instandhaltungskosten wird der Einfachheit halber angenommen, daß sie für beide Anlagen gleich sind. Vorausgesetzt wird ferner eine bestimmte jährliche Energiepreissteigerung.

Bild 14 zeigt für diesen Fall die zulässigen Investitionsmehrkosten für die Wärmepumpen-Heizungsanlage in Abhängigkeit vom Heizölpreis. Parameter sind die Mittlere Anlagen-Leistungsziffer und der Preis für elektrische Energie.

Das eingezeichnete Beispiel für die Heizperiode 1985/86 mit einem Ölpreis von ca. 0,70 DM/l (= 0,07 DM/kWh) erlaubt bei

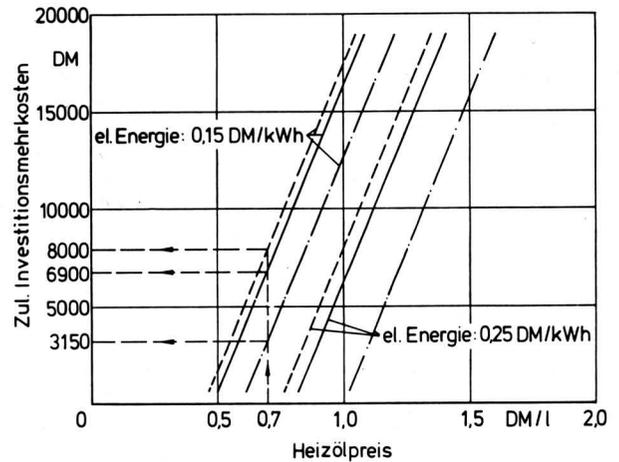


Bild 14. Zulässige Mehrkosten für die Investition einer Wärmepumpen-Heizungsanlage in Abhängigkeit vom Heizölpreis; Kosten der elektr. Energie und Mittlere Anlagen-Leistungsziffer (MALZ) als Parameter.

- MALZ = 2,0
- MALZ = 2,5
- MALZ = 2,8

einem Preis von 0,15 DM/kWh für die elektrische Energie in Abhängigkeit von der Mittlere Anlagen-Leistungsziffer eine Mehrinvestition für die Wärmepumpe von 3150 bis 8000 DM, wenn sich die Anlage nach 13 Jahren amortisiert haben soll. Bei den niedrigen Ölpreisen der Heizperiode 1986/87 ist jedoch auch bei dem vergleichsweise niedrigen Preis für die elektrische Energie keine Amortisation zu erwarten.

Bei dem höheren Preis von 0,25 DM/kWh für die elektrische Energie sind beispielsweise bei einer Mittlere Anlagen-Leistungsziffer von 2,5 erst von einem Heizölpreis oberhalb 0,80 DM/l ab Investitionsmehrkosten vertretbar. Wird die Investitionssumme für eine Ölzentralheizungsanlage etwa um 25 % niedriger veranschlagt als die für die Wärmepumpe ohne Wärmequellenanlage (Erdreichwärmetauscher, etc.), dann dürften bei den betrachteten Anlagen mit einem Preis von ca. 14000 DM die Lieferung und Einbringung der Erdbohrwärmetauscher nicht mehr als 3800 DM ausmachen. Tatsächlich kostete die Erstellung des Erdbohrwärmetauschers mit komplettem Anschluß an die Wärmepumpe jedoch ca. 5500 DM. Diese Kosten sind niedriger als die von der FTA [6] angegebenen Richtpreise von ungefähr 11000 DM, die allerdings für die vollflächige Abtragung und Wiederauffüllung des Bodens gelten. Dennoch ist davon auszugehen, daß eine Wirtschaftlichkeit für diese Wärmepumpen-Heizungsanlagen im Vergleich zu konventionellen Ölheizungen auch dann noch nicht gegeben ist, wenn der Heizölpreis etwa 0,70 DM/l beträgt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von Wärmepumpen wird insbesondere nach den drastischen Ölpreissteigerungen in den siebziger Jahren und angesichts weltweit abnehmender Ölreserven als eine Alternative angesehen, den Verbrauch teurer und hochwertiger Primärenergie zu senken. Eine der besten, der betriebssichersten und letzten Endes auch der billigsten Wärmequellen für die Wärmepumpe kann der Erdbohrbohrer sein, aus dem über Rohrregister die benötigte Wärme entzogen wird.

Im Jahr 1984 wurden zwei Versuchshallen des Instituts für Biosystemtechnik der FAL mit derartigen Wärmepumpen-Heizungsanlagen ausgerüstet. Dadurch bestand die Möglichkeit, die Auswirkungen des Wärmeentzuges auf den Temperaturverlauf im Boden zu untersuchen sowie unter anderem auch der Frage nachzugehen, ob diese Wärmepumpen-Heizungsanlagen zuverlässig einsetzbar sind und wirtschaftlich zu einer Einsparung wertvoller Primärenergie führen können.

Dabei führt ein durchschnittlicher Wärmeentzug von etwa 12000 kWh aus 400 m² Grundfläche zu einem Temperaturabfall im Erdboden mit einer zeitweiligen Vereisung im Bereich der im Abstand von 1 m verlegten Wärmetauscherrohre. Die Vereisung kann u.U. bis in eine Tiefe von 1,3 m reichen. Durch den im Frühjahr zunehmenden Wärmeeintrag aus der Atmosphäre in den Erdboden, verbunden mit den durch die höheren Außenlufttemperaturen verursachten längeren Stillstandszeiten der Heizungsanlage, steigt in den ausgekühlten Bodenschichten die Temperatur jedoch relativ schnell wieder an.

Die vorliegenden Messungen weisen für die unterschiedliche Verlegung der Wärmetauscherrohre keine gravierenden Unterschiede sowohl bei der Leistung der Wärmepumpen als auch bei der Abkühlung des Erdbodens aus. Dabei waren für einen etwa gleich großen auf die Grundfläche bezogenen Wärmeentzug Rohre 45 x 4 mm in einer Ebene und Rohre 20 x 2 mm in zwei Ebenen übereinander bei insgesamt gleicher Übergangsfläche der beiden Wärmetauscher verlegt.

Die Entscheidung über den Einsatz von Wärmepumpen wird entscheidend von deren Wirtschaftlichkeit beeinflusst. Trotz der Einsparung an Energiekosten im Vergleich zu einer konventionellen Heizanlage bei einem entsprechend niedrigen Kostenaufwand für die elektrische Energie von 0,15 DM/kWh zeigt ein Kosten/Nutzen-Vergleich jedoch, daß der Wärmepumpeneinsatz unter den gegenwärtigen Bedingungen mit Ölpreisen unter 0,70 DM/l ohne die Gewährung wirksamer zusätzlicher Investitionshilfen nicht empfohlen werden kann.

Dennoch kann die Wärmepumpen-Heizungsanlage, die die im Erdboden gespeicherte Energie nutzt, eine günstige und ernstzunehmende Alternative zur Einsparung nur begrenzt verfügbarer Primärenergie sein, wenn durch konstruktive Fortschritte beispielsweise bei den Erdbodenwärmetauschern die Leistungsfähigkeit erhöht und die Kosten damit noch gesenkt werden können. Die sich hier abzeichnende Entwicklung sollte sorgfältig beobachtet werden. Keineswegs hinreichend geklärt sind bisher die Wechselwirkungen zwischen dem Erdbodenwärmetauscher und dem angrenzenden Boden, die durch Trocknungseffekte, Wärmeeinträge aus der Atmosphäre, vor allem auch durch Niederschläge, aber ebenso durch die Bodeneigenschaften selbst oder den Wechsel zwischen Eisbildung und Wiederauftauen beeinflusst werden und sicherlich auch noch Möglichkeiten zur Verbesserung der Anlagen bieten. Dazu werden aber im Ansatz auch bereits vorhandene leistungsfähige Simulationsmodelle notwendig sein, mit denen eine Wärmepumpen-Heizungsanlage unter bestimmten ortsabhängigen und technischen Bedingungen geplant und entworfen werden kann.

Bei Wärmepumpen-Heizungsanlagen werden im allgemeinen elektromotorisch angetriebene Kompressionswärmepumpen eingesetzt. Auch wenn Gas- oder Dieselmotoren für den hier angesprochenen Leistungsbereich bisher noch kaum angeboten werden, so sind sie sicher geeignet, die Energiekosten weiter zu reduzieren und die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpen-Heizungsanlagen zu erhöhen. Das gilt auch für die Absorptions-Wärmepumpe, bei der das Anheben des Temperaturniveaus thermisch über einen Ab- und Desorptionsprozeß erfolgt und die somit den Vorteil besitzt, daß nur wenige bewegliche Teile zum Einsatz kommen und dadurch die Lebensdauer erhöht wird.

In Einzelausführungen gibt es inzwischen auch Wärmepumpen-Heizungsanlagen mit dem Erdboden als Wärmequelle in Kombination mit einem Dach- oder anderen Wärmeabsorbern. Da in diesem Fall zwei Wärmequellen zur Verfügung stehen, dürfen beide Komponenten entsprechend klein dimensioniert werden. Die mit dieser Anlagenkombination zusammenhängenden zahlreichen Fragen sind jedoch noch weitgehend ungeklärt und lassen eine Bewertung dieser Systeme noch gar nicht zu, auch wenn sie vermutlich eine gute Lösung zur Reduzierung der Energiekosten darstellen.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] ● *Plank, R.* (Hrsg.): Handbuch der Kältechnik. Bd. VI a: Wärmepumpen. Berlin/Heidelberg/New York: Springer 1967.
- [2] *Wirth, P.E.*: Aus der Entwicklungsgeschichte der Wärmepumpe. Schweiz. Bauzeitg. Bd. 73 (1955) Nr. 42, S. 647/51.
- [3] ● *von Cube, H.L. u. F. Steimle*: Wärmepumpen – Grundlagen und Praxis. Düsseldorf: VDI-Verlag 1978.
- [4] ● *DIN 8900*: Wärmepumpen: Anschlußfertige Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenem Verdichter. Teil 1: Begriffe. Berlin/Köln: Beuth 1980.
- [5] *Paul, J.*: Wärmequellen für Wärmepumpen – dargestellt in einer Matrix. Elektrowärme Intern., Ausgabe A, Elektrowärme im technischen Ausbau Bd. 35 (1977) Nr. 1, S. 40/41.
- [6] ● *FTA Fachberichte*, Bd. 2: Wärmepumpen zur Hausheizung – Beurteilungskriterien. Hrsg. Fördergesellschaft Technischer Ausbau. Gräfelfing: Resch-Verlag 1981.
- [7] ● *Farouki, O.T.*: Thermal properties of soils. Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 11. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1986.
- [8] *Schinke, H. u. C. Mostofizadeh*: Messung von Erdreichtemperaturen bei direktem Wärmeentzug durch den Verdampfer einer Wärmepumpe. Heizung-Lüft.-Haust. Bd. 32 (1981) Nr. 3, S. 108/14.
- [9] *Kirn, H. u. R. Störk*: Heizung eines Einfamilienwohnhauses mit einer Wärmepumpe, die in der Gartenerde gespeicherte Sonnenwärme nutzt. Elektrowärme Intern., Ausgabe A, Elektrowärme im technischen Ausbau Bd. 35 (1977) Nr. 6, S. 327/32.
- [10] *Rouvel, L.*: Erdreichtemperaturen bei Wärmeentzug mittels Wärmepumpe. Heizung-Lüft.-Haust. Bd. 26 (1975) Nr. 11, S. 393/96.
- [11] *Goetsch, W.D. u. A.J. Muehling*: Earth-tube as air tempering systems for swine farrow-nursery housing. Trans. ASAE Bd. 27 (1984) Nr. 4, S. 1154/62.
- [12] *Stingl, W.*: Erdspeicher zur Klimatisierung von Schweineställen. KTBL-Schrift 302, Darmstadt 1985.
- [13] *Tiedemann, H.*: Erdwärmetauscher für Schweineställe. RKL Schrift 6.1.0 Kiel 1985.
- [14] *Puri, V.M.*: Feasibility and performance curves for intermittent earth tube heat exchangers. Trans. ASAE Bd. 29 (1986) Nr. 2, S. 526/32.
- [15] *Penrod, E.B.*: Sizing earth heat pumps. Refr. Engng. Bd. 62 (1954) Nr. 4, S. 57/61.
- [16] *Vestal, D.M. u. B.J. Fluker*: Earth as heat source and sink for heat pumps. Heating, Piping & Air Conditioning Bd. 28 (1956) Nr. 8, S. 117/23.
- [17] *Kidder, A.H. u. J.H. Neher*: Residential heat pump experiments in Philadelphia – earth as a heat source. AIEE Trans. Bd. 71 (1952) Nr. 11, S. 343/50.
- [18] *Ingersoll, L.R. u. H.J. Plass*: Theory of the ground pipe heat source for the heat pumps. Heating, Piping & Air Conditioning Bd. 20 (1978) Nr. 7, S. 119/22.
- [19] *Ingersoll, L.R., F.T. Adler, H.J. Plass u. A.C. Ingersoll*: Theory of earth heat exchangers for the heat pump. Trans. Am. Soc. Heating Vent. Eng. (1951) S. 167/88.
- [20] ● *Balstrup, T.*: Varmepumpeanlaeg – Varmeovergangsforhold i jord. Kobenhavn: Teknologisk Instituts Forlag, 1977, Bd. 1.

- [21] *von Cube, H.L., E. Ludwig, J. Saltlegger u. J. Rohde:* Erarbeitung eines Optimierungsverfahrens für die Auslegung von Erdbodenrohrschlangen als Wärmequelle für Wärmepumpen. BMFT Forschungsbericht T 80-121 (1980).
- [22] *Nievergeld, P.B.M., J.H.A.M. v.d. Brugh, J.F. v.d. Horst u. A.D. Kopperal:* Investigations on using the earth as a natural heat source for heat pumps. Final Report (1980), Energy Directorate General Contract No. 231-77 EEN, Commission of the European Communities, Luxemburg.
- [23] *Neiß, J.:* Numerische Simulation des Wärme- und Feuchte- transports und der Eisbildung in Böden. Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 3, Nr. 73 Düsseldorf: VDI-Verlag 1982.
- [24] *von Cube, H.L.:* Wärmequellen für Wärmepumpen. Berichtsband Wärmepumpen der 1. Essener Wärmepumpen- tagung, S. 173/82. Essen: Vulkan-Verlag, 1977.
- [25] *Ginschel, J.:* Betriebsergebnisse einer Erdreich-Wasser- Wärmepumpe. Elektrowärme Intern., Ausgabe A, Elektrowärme im tech- nischen Ausbau Bd. 35 (1977) Nr. 6, S. 332/37.
- [26] *Reimann, J.:* Erfahrungen mit Erdreich-Wasser-Wärme- pumpen für Heizung und direkte Brauchwassererwärmung. Elektrowärme Intern., Ausgabe A, Elektrowärme im tech- nischen Ausbau Bd. 38 (1980) Nr. 6, S. 367/71.
- [27] *Sowa, G.:* Erdreich-Wasser-Wärmepumpe in einem Ein- familienhaus. Elektrowärme Intern., Ausgabe A, Elektrowärme im tech- nischen Ausbau Bd. 32 (1974) Nr. 1, S. 46/48.
- [28] *Holzappel, K.Q. u. C. Brendel:* Informationspaket – Heizen mit Wärmepumpen. Bürger-Information Neue Energietechniken, Fachinfor- mationszentrum Energie/Physik/Mathematik GmbH, Karlsruhe (1984).
- [29] Zentrale Agrarmeteorologische Forschungsstelle Braun- schweig des Deutschen Wetterdienstes: Agrarmeteorologi- scher Wochenbericht von Braunschweig.
- [30] *Rostek, A. u. N. Haarmann:* Dynamische Wirtschaftlich- keitsberechnung für den Praktiker. Heizung-Lüft.-Haust. Bd. 32 (1981) Nr. 8, S. 300/15.
- [31] *VDI 2067, Blatt 1:* Berechnung der Kosten von Wärmever- sorgungsanlagen. Betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen. Berlin/Köln: Beuth 1979.

Entwicklungstendenzen bei metallischen Konstruktionswerkstoffen im Maschinenbau

Von Karl Heinz Illgner, Kaarst*)

DK 621. DK 621:669.1.004.12

Werkstoffe mit weiterentwickelten Eigenschaften ge- statten die Ausführung von Bauteilen, Maschinen und Einrichtungen hoher Leistung, Haltbarkeit und Wirt- schaftlichkeit. Dazu stehen heute Stähle und Eisenguß- werkstoffe wie Fertigungsverfahren zur Verfügung, die ihre Vorgänger weit übertreffen. Sie machen auch auf dem Sektor der Landtechnik "Hightec"-Lösungen möglich.

1. Ziele der Werkstoffentwicklung

Werkstoffneu- und -weiterentwicklungen erfolgten stets und wer- den ständig erfolgen. Ihr Ziel ist

- die Optimierung der Bauteilhaltbarkeit, d.h. Erreichen höherer Beanspruchbarkeit und Ausnutzung der Werk- stoffe im Bauteil und damit die Verwirklichung kleinerer, leichter und/oder leistungsfähigerer Bauteile
- eine wirtschaftlichere Herstellbarkeit von Bauteilen unter Berücksichtigung von Werkstoffgestehungs- und -verar- beitungskosten bis zum fertigen Bauteil, wobei auch die Fer- tigung komplexerer Bauteile aus einem Stück, die zuvor aus mehreren Elementen montiert werden mußten, ange- strebt wird
- eine Erhöhung der Bauteilnutzbarkeit, der Lebensdauer und Sicherheit bei weniger Kosten für Geste- hung, Betrieb, Wartung und Reparatur der Einrichtungen bzw. Maschinen für den Betreiber. Selbst die Frage der Entsorgung wird zukünftig mehr Gewicht erhalten.

Diese marktwirtschaftlich starken Impulse führten und führen weniger zu spektakulären Erfindungen von ganz neuen Werkstof- fen mit alles übertreffenden, nie gekannten Eigenschaften als viel- mehr zu einer ständig fortschreitenden dem Nichtnachforschen- den meist verborgen bleibenden Weiterentwicklung und Modifizie- rung bekannter Werkstoffe sowie zu einer laufenden Verbesserung ihrer Herstellungstechnologien und damit zu wesentlichen techni- schen Fortschritten. Der Evolutionsprozeß – hier auf den Sek- tor der metallischen Werkstoffe bezogen – ermöglichte

- die genauere und an die Eigenschaften zielstrebig angepaßte Herstellung der Werkstoffe hinsichtlich ihrer Zusammen- setzung auch im Spurenelementbereich sowie hinsichtlich ihrer Reinheit und Gefügegenmäßigkeit
- eine Reproduzierbarkeit von spezifizierten Eigenschaften in vorgegebenen engen Toleranzgrenzen
- die möglichst gleichzeitige Erhöhung von Festigkeit und Zähigkeit
- eine bessere spanlose bzw. spanabhebende Ver- und Bear- beitbarkeit
- und unter Umständen die Einsparung von Arbeitsgängen bei der Fertigung der Bauteile.

Die Werkstoffentwicklung wurde aber auch befruchtet durch die modernen Fertigungsverfahren, wie z.B. Genauschmieden, Vergü- ten aus der Schmiedehitze oder durch gesteuertes Abkühlen, Hoch- geschwindigkeitszerspanen, Mehrstufen-Kaltmassivumformen und modernste Schweißverfahren.

Für den jeweiligen einzelnen Hersteller ergibt sich daraus mehr denn je die Verpflichtung, sich über Weiterentwicklungen ständig zu informieren und diese möglichst umgehend im eigenen Betrieb zu nutzen. Ein Zögern kann den Abstand zum besser informierten und ausgerichteten Wettbewerb nachhaltig und konsequenzenreich vergrößern.

*) Prof. Dr.-Ing. K.H. Illgner ist Fachhochschullehrer für Werk- stofftechnik an der Fachhochschule Münster, Abteilung Steinfurt.