

SCHAUBERGER, GÜNTHER

Spezielle Untersuchungen zur Stallklimatologie

Univ., Diss.,
Wien
1981



books2ebooks.eu

digitalisiert an der
Universitätsbibliothek
Wien

digitised at Vienna
University Library

books2ebooks – Millions of books just a mouse click away!



European libraries are hosting millions of books from the 15th to the 20th century. All these books have now become available as eBooks – just a mouse click away. Search the online catalogue of a library from the eBooks on Demand (EOD) network and order the book as an eBook from all over the world – 24 hours a day, 7 days a week. The book will be digitised and made accessible to you as an eBook. Pay online with a credit card of your choice and build up your personal digital library!

What is an EOD eBook?

An EOD eBook is a digitised book delivered in the form of a PDF file. In the advanced version, the file contains the image of the scanned original book as well as the automatically recognised full text. Of course marks, notations and other notes in the margins present in the original volume will also appear in this file.

How to order an EOD eBook?



Wherever you see this button, you can order eBooks directly from the online catalogue of a library. Just search the catalogue and select the book you need.

A user friendly interface will guide you through the ordering process. You will receive a confirmation e-mail and you will be able to track your order at your personal tracing site.

How to buy an EOD eBook?

Once the book has been digitised and is ready for downloading you will have several payment options. The most convenient option is to use your credit card and pay via a secure transaction mode. After your payment has been received, you will be able to download the eBook.

Standard EOD eBook – How to use

You receive one single file in the form of a PDF file. You can browse, print and build up your own collection in a convenient manner.

Print

Print out the whole book or only some pages.

Browse

Use the PDF reader and enjoy browsing and zooming with your standard day-to-day-software. There is no need to install other software.

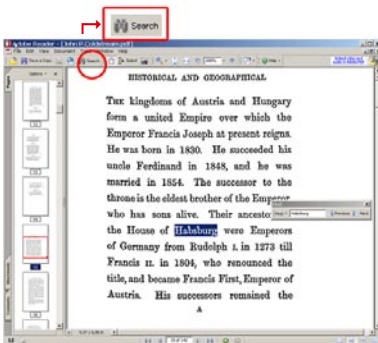
Build up your own collection

The whole book is comprised in one file. Take the book with you on your portable device and build up your personal digital library.

Advanced EOD eBook - How to use

Search & Find

Print out the whole book or only some pages.



With the in-built search feature of your PDF reader, you can browse the book for individual words or part of a word.

Use the binocular symbol in the toolbar or the keyboard shortcut (Ctrl+F) to search for a certain word. "Habsburg" is being searched for in this example. The finding is highlighted.

Copy & Paste Text



Click on the "Select Tool" in the toolbar and select all the text you want to copy within the PDF file. Then open your word processor and paste the copied text there e.g. in Microsoft Word, click on the Edit menu or use the keyboard shortcut (Ctrl+V) in order to Paste the text into your document.

Copy & Paste Images



If you want to copy and paste an image, use the "Snapshot Tool" from the toolbar menu and paste the picture into the designated programme (e.g. word processor or an image processing programme).

Terms and Conditions

With the usage of the EOD service, you accept the Terms and Conditions. EOD provides access to digitized documents strictly for personal, non-commercial purposes.

Terms and Conditions in English: <http://books2ebooks.eu/odm/html/ubw/en/agb.html>

Terms and Conditions in German: <http://books2ebooks.eu/odm/html/ubw/de/agb.html>

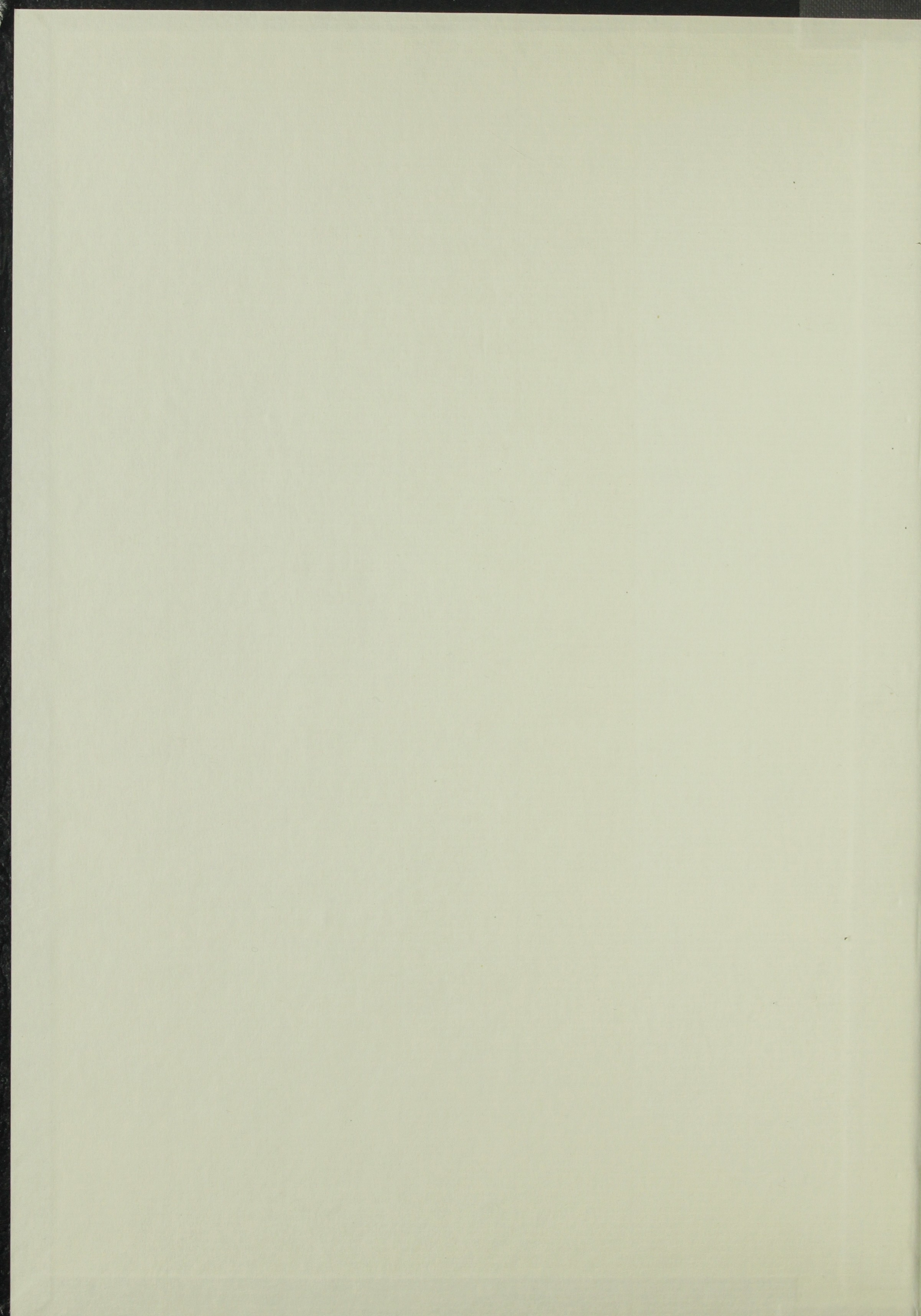
More eBooks

More eBooks are available at <http://books2ebooks.eu>

Universitäts-Bibliothek Wien

D

22.736



N 345

Frau/Herrn Professor REUTER
" " " CEHAK als Referenten
zur Begutachtung.

Wien, am 22. Mai 1981

Der Dekan:

Sintner

SPEZIELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR STALLKLIMATOLOGIE
(Energiesparende Luftaufbereitung durch Bodenspeicher)

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des Doktorgrades

an der

Formal- und Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Universität Wien

eingereicht von

Günther SCHAUBERGER

Wien, 1981



Promoviert zum
Dr. phil. am

7. Juli 1981

Ich danke Herrn o. Univ.-Prof. Dr.phil. Heinz REUTER, Direktor der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, für die Themenstellung und für seine Führung und Unterstützung, ebenso für die Bereitstellung von Teilen der Meßausrüstung, durch welche die Arbeit erst ermöglicht wurde.

Mein besonderer Dank gilt Frau o. Univ.-Prof. Dr.phil. Gertrud KECK, Vorstand des Institutes für Medizinische Physik der Veterinärmedizinischen Universität Wien, durch deren Initiative und Verständnis die Arbeit zustande kam.

Herrn o. Univ.-Prof. Dr.med.vet. Erich GLAWISCHNIG, Vorstand der II. Medizinischen Universitätsklinik für Kleintiere der Veterinärmedizinischen Universität Wien, danke ich für die Möglichkeit auf seinem Forschungsgut in Harmannsdorf (NÖ) die Messungen durchführen zu können.

Herrn Doz. Dr.phil. Peter KAHBIG, Oberassistent am Institut für Meteorologie und Geophysik, danke ich für die umsichtige Betreuung der Arbeit sowie für die wertvollen Diskussionen.



INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. VORWORT	2
3. BAULICHE UND TECHNISCHE GEGENSTÄNDE	3
3.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung	3
3.2 Detailbeschreibung	6
4. TECHNISCHE MESSENGEN	12
4.1 Messung	12
4.2 Messgeräte	13
4.3 Messverfahren und Messdaten	15
5. TECHNISCHES VERHALTEN DES BODENS	17
5.1 Grundlagen	17
5.2 Thermische Eigenschaften von Böden	22
5.2.1 Bestimmung der Parameter für die Temperaturverteilung im ungestörten Boden	34
5.2.1.1 Temperaturleitfähigkeit	34
5.2.1.2 Amplitude	38
5.2.1.3 Mitteltemperatur	40
5.2.1.4 Phasenverschiebung	41
5.2.1.5 Literaturübersicht über den zeitlichen und räumlichen Verlauf der Bodentemperatur	42
5.2.2 Bestimmung der Temperaturverteilung im gestörten Boden	46
5.2.3 Temperaturverteilung im Bereich des Grundwassers	52
5.2.4 Berechnung der Störfunktion im Bereich des Grundwassers	54
5.2.5 Temperaturverteilung im Bereich des Grundwassers	55

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. PROBLEMSTELLUNG	2
3. BAULICHE UND TECHNISCHE GEGEBENHEITEN	3
3.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung	3
3.2 Detailbeschreibung	6
4. BODENPHYSIKALISCHE MESSUNGEN	12
4.1 Meßanordnung	12
4.2 Meßgeräte	13
4.3 Meßwerterfassung und Meßdaten	15
5. THERMISCHES VERHALTEN DES BODENS	17
5.1 Grundlagen	17
5.2 Thermisches Verhalten des ungestörten Bodens	22
5.2.1 Bestimmung der Parameter für die Temperaturverteilung im ungestörten Boden	34
5.2.1.1 Temperaturleitfähigkeit	34
5.2.1.2 Amplitude	38
5.2.1.3 Mitteltemperatur	40
5.2.1.4 Phasenverschiebung	41
5.2.1.5 Literaturübersicht über den täglichen und den jährlichen Verlauf der Bodentemperaturen	42
5.2.2 Erstellung der Temperaturverteilung	46
5.3 Temperaturverteilung im Bereich des Bodenspeichers	52
5.3.1 Berechnung der Störfunktion im Bereich der Meßpunkte 1 und 2	54
5.3.2 Temperaturverteilung im Bereich der Meßpunkte 1 und 2	68

	Seite
6. LUFTPHYSIKALISCHE MESSUNGEN	72
6.1 Meßanordnung	72
6.2 Meßgeräte	73
6.3 Prüfung der Meßpunkte	76
6.4 Meßwerterfassung und Meßdaten	79
7. LANGZEITVERHALTEN	83
7.1 Luftphysik	83
7.2 Speichermasse	94
7.3 Energieinhalt der Speichermasse	105
8. KURZZEITVERHALTEN	111
8.1 Luftphysik	111
8.2 Energieinhalt der Speichermasse	123
9. DISKUSSION	131
10. ZUSAMMENFASSUNG	134

VERZEICHNIS DER SYMBOLE

LITERATURVERZEICHNIS

CURRICULUM VITAE

1. EINLEITUNG

Eines der zentralen Probleme der sogenannten Massentierhaltung ist die Versorgung der Tiere mit Frischluft. Da unter Beachtung des Tierschutzes wirtschaftliche Aspekte eine wesentliche Bedeutung haben, sind energiesparende Luftaufbereitungssysteme von besonderem Interesse.

Im Winter und in der Übergangszeit muß die Zuluft zum Teil erwärmt werden. Systeme, die lediglich auf der Basis der Wärmerückgewinnung arbeiten, sind in diesen Zeiten wirtschaftlich, nicht jedoch im Sommer. Durch die große Belegdichte im Stall wird infolge der Wärmeproduktion der Tiere die Optimaltemperatur der Stallluft zumeist überschritten. Eine Vollklimatisierung wäre notwendig, ist jedoch aus ökonomischen Gründen untragbar.

In Harmannsdorf⁺) (NÖ) wurde ein einfaches System zur Luftaufbereitung installiert, das im Sommer die Möglichkeit bietet, dem Stall eine vorgekühlte Zuluft zuzuführen. Die Anlage wird als "Bodenspeicher" bezeichnet und stand für Meßzwecke zur Verfügung.

Die Untersuchungen an der Anlage Harmannsdorf sollen Aufschluß geben über die Eigenschaften eines derartigen Systems und mögliche Verbesserungen erkennen lassen. Es wurden die Grundlagen für ein Modell erarbeitet, das Hinweise zur Dimensionierung von Neuplanungen geben kann.

⁺) Die Anlage wurde gefördert durch Mittel der Österreichischen Vereinigung für Agrarwissenschaftliche Forschung.

2. PROBLEMSTELLUNG

Nachdem die Idee des Bodenspeichers in Harmannsdorf realisiert wurde, war das Ziel die Erfassung der Wirkungsmechanismen.

Als Grundlage diente die von DULOSY (1980) gegebene Übersicht. Um das Meßprogramm übersichtlicher zu gestalten, wurde eine Zweiteilung in einen bodenphysikalischen und einen luftphysikalischen Teil vorgenommen:

a) Bodenphysikalische Messungen

Diese Messungen dienten der Erfassung der Vorgänge in der Speichermasse - dem Erdboden.

b) Luftphysikalische Messungen

Dieser Teil diente der Untersuchung der Möglichkeiten, die ein solches System für die Luftaufbereitung bietet.

Aus dieser Zweiteilung wurde die Grundlage für ein Modell entwickelt, welches die vollständige Beschreibung der Anlage ermöglicht.

Daraus ergeben sich nicht nur für den Betrieb des bereits bestehenden Bodenspeichers in Harmannsdorf Hinweise, sondern auch für die Verbesserung der Anlage sowie der richtigen Dimensionierung von Neuplanungen.

3. BAULICHE UND TECHNISCHE GEGEBENHEITEN

3.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung

Das System des Bodenspeichers dient der Luftaufbereitung für Tierhaltungsbetriebe. Da die Grenzwerte für das Stallklima gegeben sind (DIN-Norm 18910), bedarf es einer Lüftungstechnischen Aufbereitung der Zuluft. Diese Systeme sollen möglichst energiesparend arbeiten, da die ökonomische Situation, besonders in der Schweinemast, keine zusätzliche Aufwendung für das optimale Stallklima zuläßt.

Das vorliegende System arbeitet ohne Energieaufwand für Kühl- bzw. Heizlast.

Der Energieaufwand wird durch den Erdboden gedeckt. Das geschieht dadurch, daß die für den Lüftungsbetrieb notwendige Zuluft durch ein Rohrsystem gesaugt wird, welches etwa 2 bis 3 m tief in den Erdboden verlegt ist.

Der vorliegende Bodenspeicher liegt in Harmannsdorf (NÖ) und wurde von DULOSY geplant (DULOSY, 1980). Er wird einem Schweinemaststall mit 140 Schweinen (28 GV-Einheiten) vorgeschaltet. Die maximalen Luftmengen liegen bei $8000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Die Vorteile der Anlage sind (nach DULOSY, 1980):

- 1) Kleinere Auslegungsluftleistung der Lüftungsanlage
- 2) Luftmenge - zwischen Winter und Sommer - nur etwa 1 : 2 variierbar
- 3) bei gut wärmegeprägten Objekten keine Lufterwärmung (durch Heizöl) erforderlich
- 4) vollkommener Ersatz des aus Kostengründen undenkbaren Kälteaggregates
- 5) niedrige Schadstoffkonzentration im Winterbetrieb
- 6) vollkommene Betriebssicherheit
- 7) Keine Tagestemperaturschwankungen auch ohne Regelgerät.

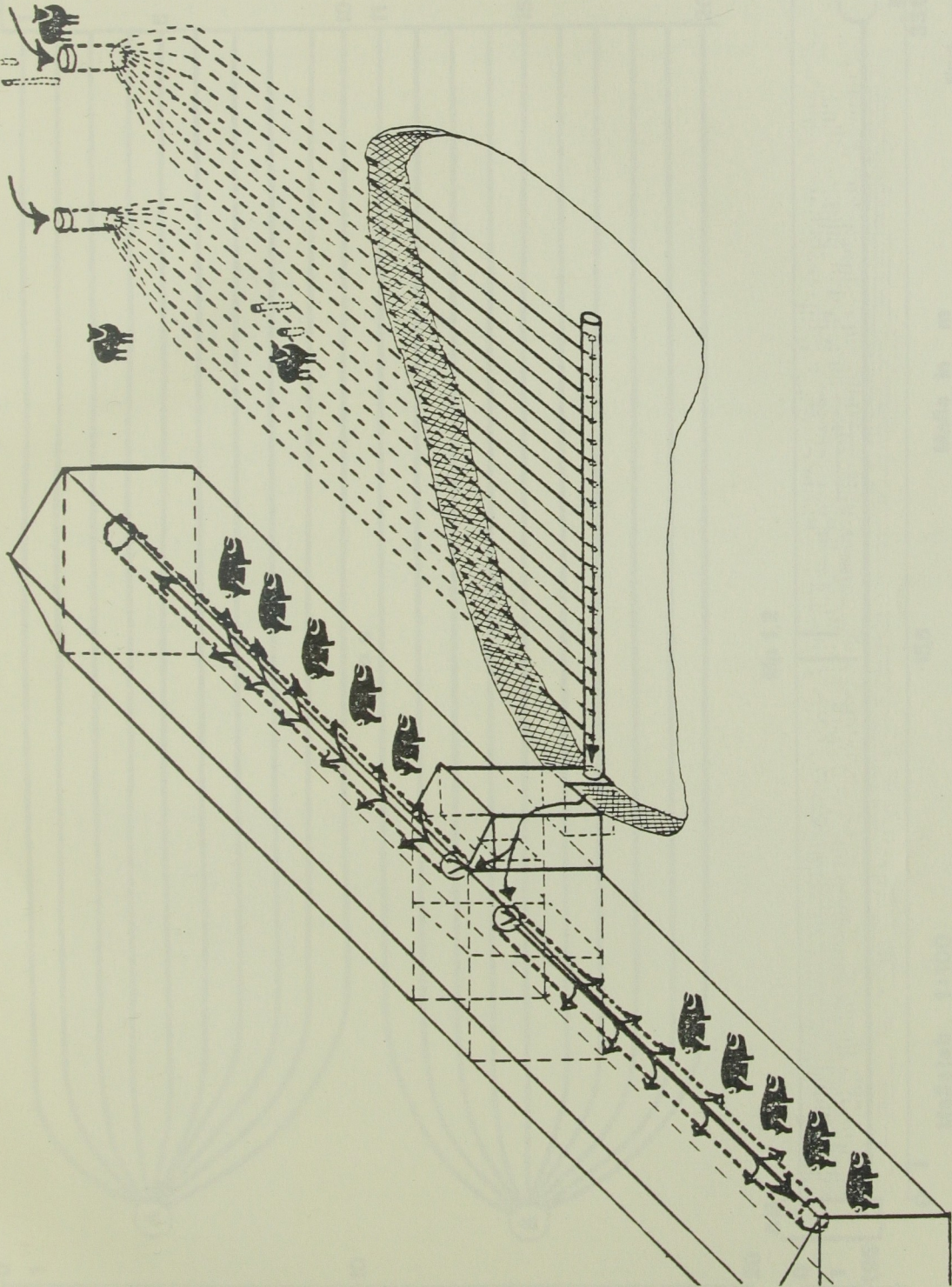


Abb. 1: Gesamtansicht des Bodenspeichers

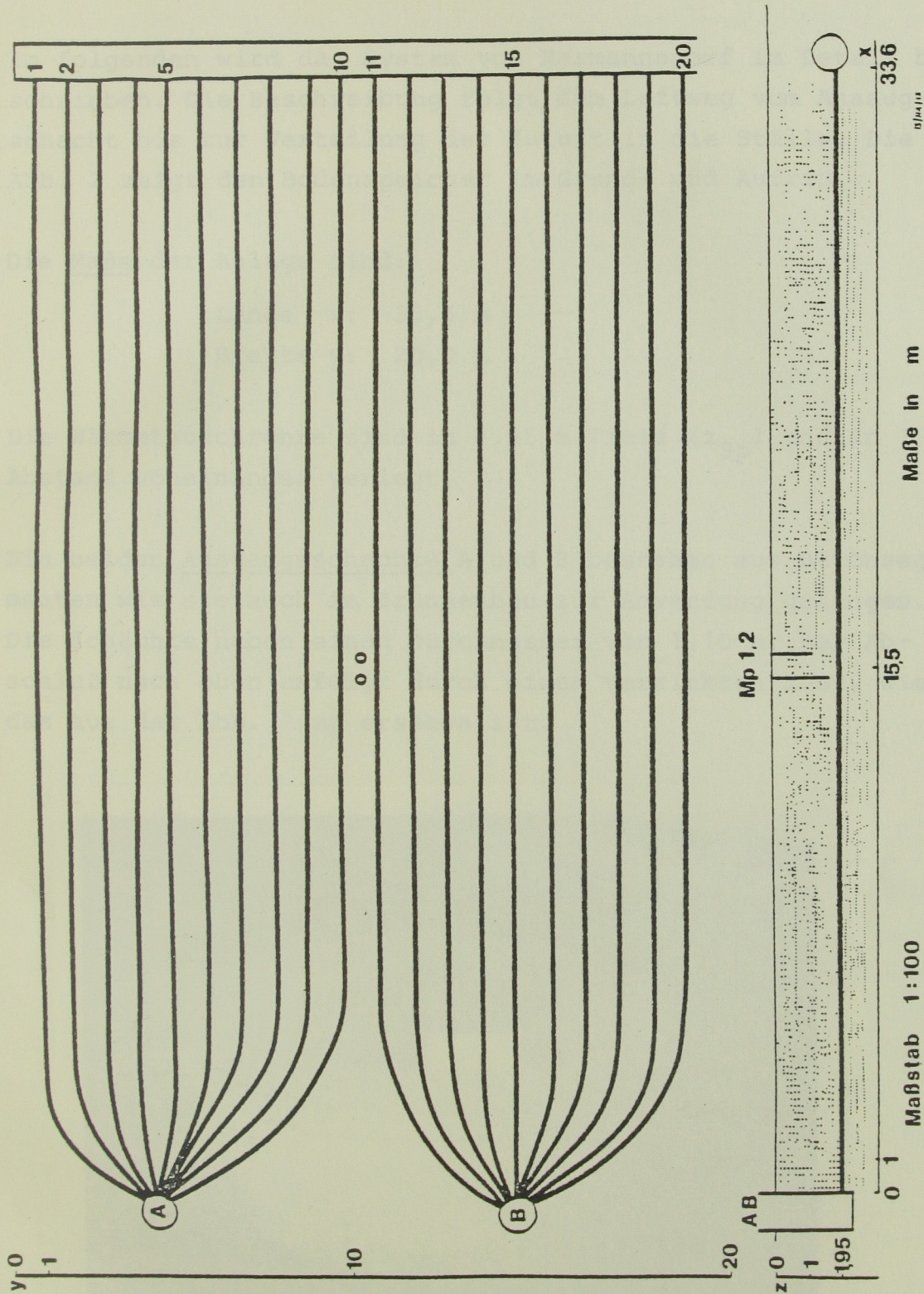


Abb. 2: Grund- und Aufriß des Bodenspeichers

A, B - Ansaugschächte, Meßpunkte 1 und 2 (Bodentemperatur), Sammelerschacht (1...20 Wärmetauschrohre)

3.2 Detailbeschreibung

Im folgenden wird das System von Harmannsdorf im Detail beschrieben. Die Beschreibung folgt dem Luftweg vom Ansaugschacht bis zur Verteilung der Zuluft in die Ställe. Die Abb. 2 zeigt den Bodenspeicher im Grund- und Aufriß.

Die Maße der Anlage sind:

Länge x: 33,6 m

Breite y: 20,0 m

Die Wärmetauschrohre sind in 1,95 m Tiefe (z_{Sp}) und in 1 m Abstand voneinander verlegt.

Die beiden Ausgangsschächte A und B bestehen aus Betonsegmenten wie sie auch im Brunnenbau zur Anwendung gelangen. Die Schächte haben einen Durchmesser von 1,10 m. Der Abschluß nach oben erfolgt durch einen verzinkten Rost, wie das aus der Abb. 3 zu ersehen ist.

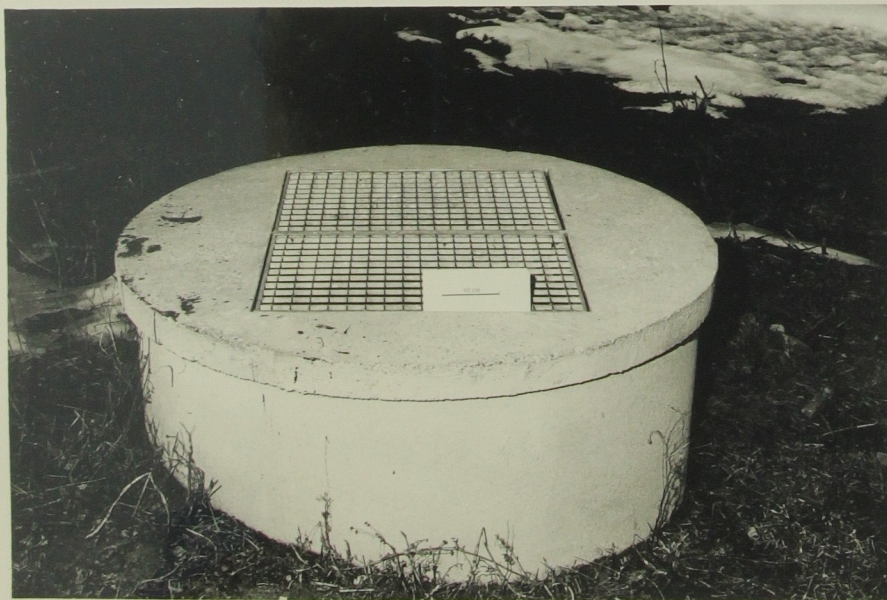


Abb. 3: Ansaugschacht A bzw. B

Die Schächte reichen bis in eine Tiefe von 2,30 m. Von beiden Ausgangsschächten verlaufen je 10 Wärmetauschrohre, die in einer Tiefe von 1,95 m verlegt sind (Abb. 4).



Abb. 4: Wärmetauschrohre in einem der Ansaugschächte (der horizontale Verlauf der Wärmetauschrohre ist ersichtlich)

Die Wärmetauschrohre selbst sind flexible Plastikschläuche mit der Bezeichnung "DRAINFLEX". Dieses Material wird aus mehreren Gründen verwendet. Durch die dünnwandige gewellte Oberfläche wird ein guter Wärmeübergang gewährleistet. Die Festigkeit erlaubt die Verlegung auch in diesen Tiefen ohne aufwendige Vorkehrungen. Weiters ist das Material gegen chemische Einwirkungen resistent und somit gut für die Verlegung im Erdboden geeignet.

In der Anlage von Harmannsdorf wurden Rohre mit folgenden Maßen verlegt:

Außendurchmesser: 200 mm

Innendurchmesser: 180 mm.

Durch die gerippte Struktur ist die Oberfläche der Rohre wesentlich vergrößert.

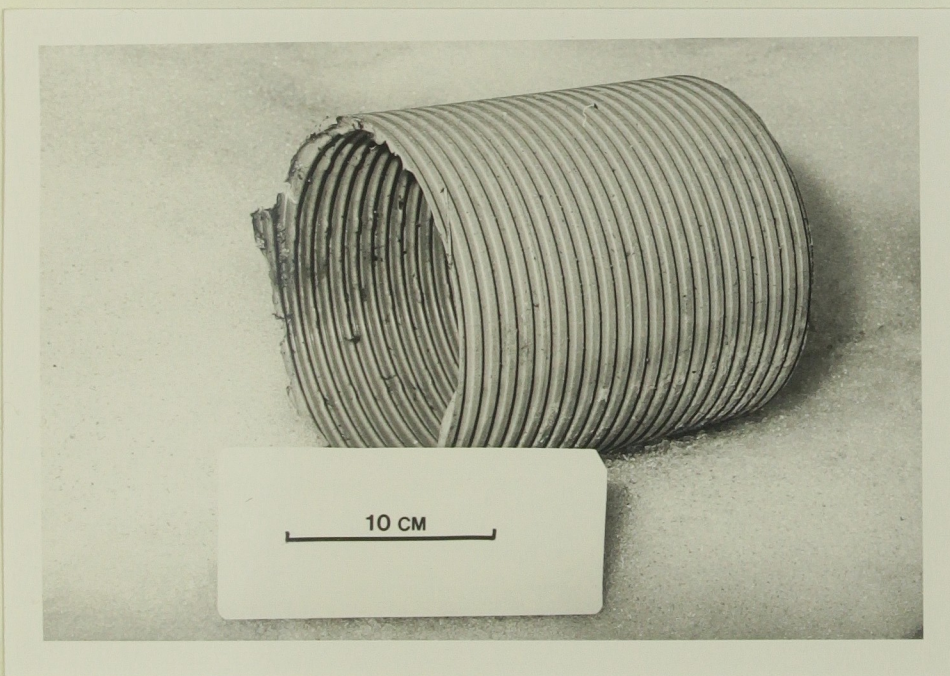


Abb. 5: Wärmetauschrohr ("DRAINFLEX")

Bei einer Länge von 33,6 m steht eine Fläche von $21,1 \text{ m}^2$ für den Wärmeübergang zur Verfügung. Bei 20 Wärmetauschrohren beträgt die Gesamtfläche 422 m^2 . Inwieweit die gerippte Oberfläche der Rohre zu einer Vergrößerung der effektiven Wärmeübergangsfläche beiträgt, kann erst aus den Messungen beurteilt werden.

Die 20 Wärmetauschrohre münden in einen Sammelkanal mit 1 m Durchmesser. Dieser Kanal besteht aus Betonsegmenten von 1 m Länge, wobei in jedes Segment ein Wärmetauschrohr ein-

mündet. Der Sammelkanal wurde in 2 m Tiefe verlegt und führt in eine Vorkammer, aus der die Zuluft dann in die Ställe verteilt wird.



Abb. 6: Sammelkanal, in den die 20 Wärmetauschrohre einmünden

Da sich bereits in dieser Tiefe der Grundwasserspiegel befindet, kommt es im Bereich des Sammelkanals zu Verschlamungen, die teilweise die Wärmetauschrohre verlegt haben. Durch das Ausheben eines Entwässerungsschachtes nach dem Sammelkanal konnte dieser Vorgang weitgehend verhindert werden.

Die Luftförderung erfolgt über zwei Ventilatoren, die auch die Luftzufuhr in den Stall besorgen. Die maximale Förderleistung der Ventilatoren beträgt $8000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Die Regelung erfolgt über zwei Raumthermostate, die durch eine Drei-Punkt-Schaltung die Luftmenge stufenweise verändern. Dadurch ergibt sich, daß das Luftvolumen, welches durch den Bodenspeicher gefördert wird, sich jahreszeitlich verändert, wobei

das Maximum im Sommer und das Minimum im Winter liegt.

Die Ventilatoren befinden sich in der Vorkammer und nehmen von dort die Verteilung der Zuluft in beide Stallräume vor. Dadurch ergibt sich, daß die Belüftung der Stallräume mit einem Überdrucksystem arbeitet, während die Luftführung durch das System durch den Unterdruck in der Vorkammer erfolgt.

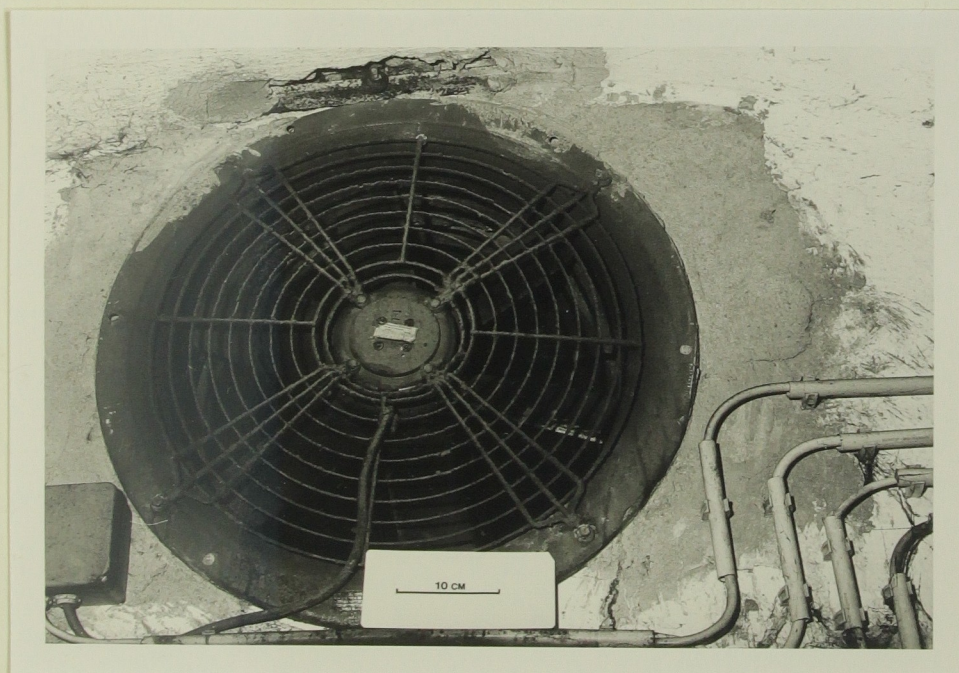


Abb. 7: Ventilator. Die Luftmenge wird durch zwei solche Ventilatoren in die Stallräume eingebracht.

Die Verlegungsarbeiten der Wärmetauschrohre und des Sammelkanals können auf zwei Arten durchgeführt werden. In Harmannsdorf wurde durch eine Schubraupe der Erdboden bis zu der Verlegungstiefe der Rohre abgetragen und anschließend die Rohre verlegt. Bei dieser Methode muß jedoch beachtet werden, daß die natürliche Struktur des Erdbodens zerstört wird.

4. BODENPHYSIKALISCHE MESSUNGEN

Das Ziel des Meßprogramms lag in der Erfassung des Verhaltens des Wärmehaushaltes im Bereich des Bodenspeichers. Das Hauptaugenmerk wurde auf die jährliche Periodik gelegt.

Um den Einfluß des Bodenspeichers auf den Wärmehaushalt beurteilen zu können, mußte eine Referenzmessung außerhalb des wärmebeaufschlagten Bodens durchgeführt werden. Die Meßpunkte für die Referenzmessung wurden so angelegt, daß die Ergebnisse aufgrund der Bodenbeschaffenheit direkt mit jenen des Bodenspeichers vergleichbar waren.

Die Lage der Meßpunkte wurde einerseits durch die Verlegetiefe der Wärmetauschrohre in etwa 2 m Tiefe und andererseits durch das Interesse an nur langfristigen Änderungen festgelegt. Die Meßpunkte hatten alle eine Tiefe zwischen 1 m und 3 m.

4.1 Meßanordnung

Die Referenzmessung wurde so gewählt, daß einerseits der Einfluß des Bodenspeichers vernachlässigbar war, andererseits die Bodenbeschaffenheit der des Bodenspeichers entsprach.

Die Meßpunkte 3 und 4 lagen etwa 10 m außerhalb des Bereichs des Bodenspeichers.

Die Lage der Hauptmessung, Meßpunkte 1 und 2 (Bodenspeicher), wurde etwa in der Mitte des Systems gewählt.

Die Längskoordinate x (Angabe in Metern) lautet für einige Punkte:

$x = 0$ für die Ansaugschächte A und B

$x = 15,5$ für Meßpunkte 1 und 2

$x = 33,6$ für den Sammelkanal

4.2 Meßgeräte

Die Bohrungen wurden mit Hilfe eines Spiralbohrers händisch durchgeführt. Durch diese Methode war gewährleistet, daß die Struktur des Bodens nicht verändert wurde. Die uneinheitliche Tiefe der Meßpunkte lag an dem steinigen Erdboden, der eine einheitliche Meßanordnung nicht zuließ.

Um das Einbrechen der Bohrlöcher zu verhindern, wurden diese mit flexiblen Kunststoffrohren ausgekleidet. In der Höhe des Erdbodens setzen sich diese in 1 m lange Tonröhren fort, auf denen sich Blechkappen als Abschluß befanden (Abb. 8).



Abb. 8: Meßstelle für die Bodentemperatur

Die Meßsonden wurden an Ketten in die jeweilige Tiefe hinuntergelassen. Sie bestanden aus einem Glasrohr mit einem Außendurchmesser von 75 mm und einer Länge von 290 mm (Abb. 9).

Das Thermometer selbst steckte in einer sandgefüllten Kupferhalbkugel. Durch das Kupfer wurde einerseits ein guter thermischer Kontakt zum Thermometer hergestellt, andererseits war die Trägheit des Sandes groß genug, sodaß die Messung exakt durchgeführt werden konnte. Nach oben wurde das Glasrohr durch eine Kupferplatte abgeschlossen, woran die Kette befestigt war.

Um eine gute Ablesbarkeit des Thermometers zu erhalten, wurde die Sandfüllung getrocknet und die gesamte Meßsonde abdichtet. Durch diese Maßnahme konnte eine Kondenswasserbildung im Inneren der Rohre völlig verhindert werden.

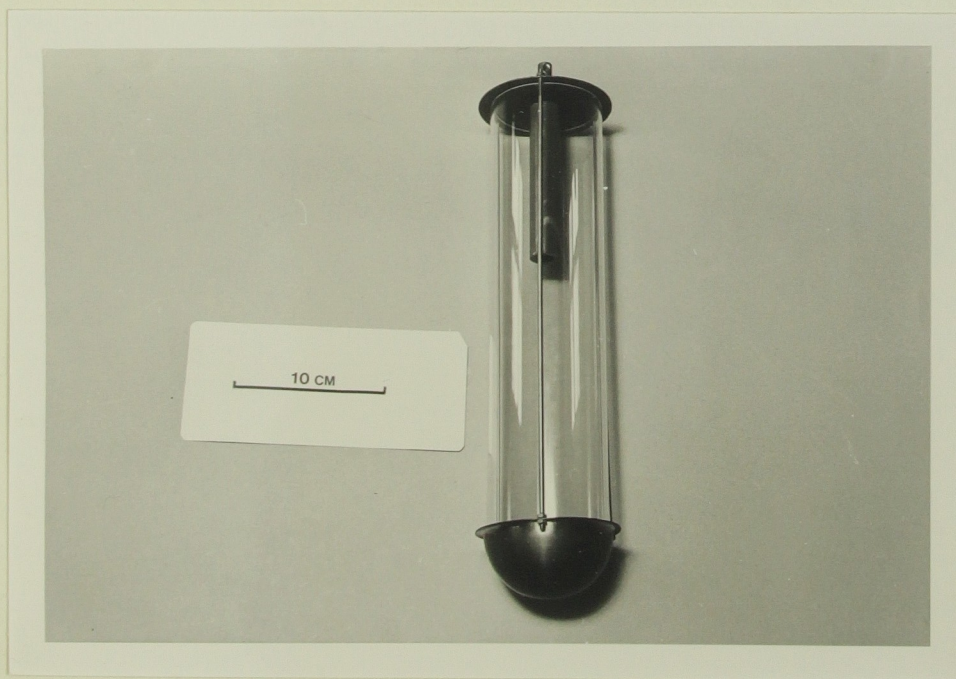


Abb. 9: Meßsonde für die Bodentemperatur

Die einzelnen Meßpunkte befanden sich in folgenden Tiefen:

Meßpunkt	Tiefe (m)	Bemerkung
1	1,25	} Speicherbereich x = 15,5 m
2	1,85	
3	1,15	} Referenzmessung
4	2,35	

4.3 Meßwerterfassung und Meßdaten

Die Meßwerterfassung wurde auf die Meßtiefen abgestimmt. So waren wöchentliche Ablesungen ausreichend, um Aussagen über das jährliche Verhalten machen zu können. Die Meßaufzeichnungen wurden in ein Protokollheft eingetragen, um dann weiter verarbeitet werden zu können. Da die Ablesung durch Dritte vorgenommen wurde, konnten Lücken in der Datenerfassung nicht verhindert werden.

Die Meßwerte wurden auf $0,1^{\circ}\text{C}$ abgelesen und sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefaßt.

Tabelle 1

Meßwerte der Bodentemperatur:

(DAT: Nummer des Tages, gezählt ab 1. Jänner 1979;

MP.: Meßpunkt)

DAT	Speicherbereich		Referenzmessung	
	MP.1	MP.2	MP.3	MP.4
17.	15.8		14.8	12.0
24.	16.4	15.1	15.4	12.1
26.	16.2	15.1	15.4	12.2
28.	16.4	15.4	15.4	
31.	16.3	15.5	15.0	
39.	17.1	16.1	16.3	
50.	16.8	16.0	15.7	
89.	14.2	13.7	13.8	
102.	10.8	11.1	11.4	
132.	6.2	7.0	8.0	10.6
139.	5.4	6.3	7.2	10.1
153.	4.2	5.5	5.4	9.1
167.	5.2	5.8	5.9	8.3
172.	4.4	5.3	5.2	8.2
183.	5.1	4.9	4.5	7.1
189.	3.9	3.7	3.8	6.3
196.	2.0	2.8	3.4	6.2
204.	1.6	2.5	3.0	6.4
210.	.9	2.2	2.8	6.4
214.	1.2	2.0	2.8	6.0
222.	1.4	2.2	2.3	5.7
232.	1.4	2.2	3.0	5.0
235.	1.4	2.1	2.9	5.4
239.	1.3	2.0	3.0	5.4
245.	1.2	2.0	2.4	5.2
253.	1.2	2.0	2.9	5.2
256.	1.2	1.9	3.0	5.0
265.	2.0	2.2	3.5	5.0
274.	3.0	3.4	4.1	5.1
282.	3.8	3.8	5.4	5.6
301.	5.4	5.4	6.0	6.0
322.	8.8	7.8	8.5	6.8

5. THERMISCHES VERHALTEN DES BODENS

Um die thermischen Verhältnisse im Bereich des Bodenspeichers erfassen zu können, muß die Temperaturverteilung im unberührten Boden bekannt sein. Dafür werden die Bodentemperaturmessungen der Meßpunkte 3 und 4 (unberührter Boden) herangezogen. Aus diesen Messungen werden die Bodenkonstante und die restlichen Parameter für die Temperaturverteilungsgleichung hergeleitet und daraus die vollständige räumliche und zeitliche Temperaturverteilung berechnet.

5.1 Grundlagen

Dieser Abschnitt befaßt sich mit den physikalischen Grundlagen für den Wärmehaushalt. Er wird bestimmt durch die augenblickliche Temperatur der Erdoberfläche sowie die räumliche und zeitliche Veränderung der Temperatur.

Die Wärmeübertragungsmechanismen sind folgende:

1) Wärmeleitung:

Die Wärmeübertragung erfolgt dabei ohne Transport von Materie. Im Boden ist die Wärmeleitung der wesentliche Transportmechanismus.

2) Strahlung:

Dabei erfolgt die Übertragung durch elektromagnetische Wellen. Als "Wärmestrahlung" bezeichnet man den Bereich

des elektromagnetischen Spektrums mit Wellenlängen zwischen 750 und 4000 nm (als Vergleich: Sichtbares Licht: 400 - 800 nm).

An der Grenzfläche Boden - Luft spielt Strahlung eine wesentliche Rolle, nicht jedoch im Erdboden selbst.

3) Konvektion:

Übertragung von Wärme durch Materialtransport durch Flüssigkeiten oder Gase.

Im Boden selbst spielt diese Form der Wärmeübertragung nur eine untergeordnete Rolle. Als Transportmedium kämen Grundwasser und auch Gase, die sich im Hohlvolumen befinden, in Frage. Durch die niedrigen Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers im Erdboden ist der Wärmetransport in dieser Form unwesentlich.

Die Wärmeübertragung durch Gase ist nur in der obersten Schichte von Bedeutung, da nur dort ein ausreichend zusammenhängendes Luftvolumen vorhanden ist. Dabei erfolgt der Transport vor allem durch latente Wärme des Wasserdampfes. Für die Betrachtung des Bodenspeichers ist die Konvektion unbedeutend.

Um den Wärmehaushalt im Erdboden zu beschreiben, wird daher im folgenden als Wärmeübertragungsmechanismus nur die Wärmeleitung betrachtet. Die Darstellung des Temperaturfeldes in kartesischen Koordinaten hat folgende Form:

$$T = F(x, y, z, t)$$

T ... Temperatur

x, y, z ... Raumkoordinaten

t ... Zeit

Da sich im Erdboden keine Wärmequelle befindet, wird das Temperaturfeld durch folgende Differentialgleichung beschrieben

$$\frac{\partial T}{\partial t} = m^2 \nabla^2 T \quad (1)$$

Diese Gleichung heißt "Fouriersche Differentialgleichung ohne Wärmequelle". Der Faktor m^2 wird Temperaturleitfähigkeit oder thermische Diffusivität genannt und hat die Dimension eines Diffusionskoeffizienten $[m^2 s^{-1}]$.

$$m^2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (2)$$

λ Wärmeleitfähigkeit $[J \cdot s^{-1} m^{-1} K^{-1}]$

c spezifische Wärmekapazität $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

ρ Dichte $[kg m^{-3}]$

Ebenso wie λ , c und ρ ist auch m^2 eine Materialkonstante. Das bedeutet eine Idealisierung des Erdbodens als homogenes Medium.

Für die weitere Beschreibung der Bodentemperatur kann die Differentialgleichung auf die vertikale Raumkoordinate reduziert werden, da der horizontale Temperaturgradient vernachlässigt werden kann.

Sie hat dann die Form

$$\frac{\partial T}{\partial t} = m^2 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3)$$

Randbedingungen:

$$z = 0 : T = A_0 \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} t \right)$$

$$z \longrightarrow \infty : T < \infty$$

Als Lösungsansatz kann man wählen:

$$T(z, t) = \exp(-pz) \left\{ C_1 \cos \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - pz \right) + C_2 \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - pz \right) \right\} \quad (4)$$

Mit den Konstanten

$$p = \sqrt{\frac{\pi}{\tau \cdot m^2}}$$

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = A_0$$

Als Gleichung für das Temperaturfeld erhält man dann

$$T(z, t) = A_0 \exp \left(-z \sqrt{\frac{\pi}{\tau m^2}} \right) \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - z \sqrt{\frac{\pi}{\tau m^2}} \right) \quad (5)$$

Ein erweiterter Ansatz lautet

$$T(z, t) = \exp(-pz) \left\{ C_1 \cos \left(\frac{2\pi}{\tau} t - pz \right) + C_2 \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - pz \right) \right\} + C_3 \cdot z + C_4 \quad (6)$$

mit den Konstanten

$$p = \sqrt{\frac{\pi}{\tau_m^2}}$$

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = A_0$$

$$C_3 = \frac{\partial T_m}{\partial z}$$

$$C_4 = T_m(0)$$

Die Anfangstemperaturverteilung kann als Überlagerung von periodischen Funktionen beschrieben werden (in der Form einer Fourierschen Reihe).

Für die vorliegende Untersuchung wird die Fouriersche Reihe auf ein Glied reduziert, d.h. Glieder höherer Ordnung (Periode $\tau < 365$ Tage) werden vernachlässigt. Der Einfluß von Gliedern höherer Ordnung kann durch die verschiedenen Eindringtiefen abgeschätzt werden. Der Vergleich wird für die Periode eines Jahres τ_a (365 Tage) und der Periode eines Tages τ_d durchgeführt.

$$\tau_a = 365 \text{ d}$$

$$\tau_d = 1 \text{ d}$$

Wird das Verhältnis gesucht, das die Eindringtiefe der Jahresoberflächenschwankung zur Tagesschwankung ergibt, so erhält man

$$\frac{z_a}{z_d} = \sqrt{\frac{\tau_a}{\tau_d}}$$

Somit gilt

$$z_a = \sqrt{365} z_d \quad \text{bzw.}$$

$$z_a = 19 z_d$$

Aufgrund der Tatsache, daß die Wärmetauschrohre in einer Tiefe von etwa 2 m verlegt sind, sind somit Glieder höherer Ordnung in der Fourier-Reihe tatsächlich vernachlässigbar: Die Amplitude für kürzer-periodische Schwingungen liegt um etwa eine Größenordnung niedriger als für das jährliche Temperaturverhalten

5.2 Thermisches Verhalten des ungestörten Bodens

Um das thermische Verhalten zu charakterisieren, wurde als leicht erfaßbare Meßgröße die Bodentemperatur herangezogen.

Für die folgenden Überlegungen wird nur das jährliche Verhalten der Bodentemperatur berücksichtigt (Periode $\tau = 365$ d). Das zeigt sich auch durch die Wahl der Meßpunkte 3 und 4 in 1,15 m und 2,35 m Tiefe.

Als Datenmaterial standen wöchentliche Bodentemperaturmessungen von einem Jahr zur Verfügung. Die Meßreihe war bei beiden Meßpunkten nicht vollständig.

Die Funktion, an die die Daten angepaßt wurden, lautet:

$$T_z(t) = T_{m,z} + A_z \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t + \varphi_z\right) \quad (7)$$

sie ist ein Spezialfall von Gl. (6):

$$T_{m,z} = C_3 \cdot z + C_4, \quad A_z = C_2 \exp(-pz), \quad \varphi_z = -pz, \quad C_1 = 0$$

$T_z(t)$	... Bodentemperatur in der Tiefe z zur Zeit t [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{m,z}$	.... Mittlere jährliche Bodentemperatur in der Tiefe z
A_z	..... Amplitude der jährlichen Temperaturschwankung in der Tiefe z [$^{\circ}\text{C}$]
τ	..... Periode der Schwingungen ($\tau = 365$ Tage) [d]
φ_z	..... Phasenverschiebung [rad]
z	..... Tiefe (Raumkoordinate) [m]
t	..... Zeit (Zeitkoordinate) [d]

Die Anpassung wird mit Hilfe der Methoden der kleinsten Fehlerquadrate durchgeführt.

Die numerische Berechnung der Anpassung wird mit dem Programmpaket SPSS durchgeführt (Statistical Package for the Social Sciencies), und zwar mit der Prozedur NONLINEAR (SPSS-Subprogram Nonlinear, 1977).

Für die Anpassung wird die Periodenlänge mit 356 Tagen angesetzt, sodaß die Werte der Mitteltemperatur $T_{m,z}$, der Amplitude A_z und der Phasenverschiebung φ_z berechnet werden. Die Phasenverschiebung φ ist durch die Wahl des Nullpunktes der Zeitkoordinate begründet ($t = 0$) und hat keine physikalische Bedeutung.

Um eine Abschätzung für die Güte der Anpassung vornehmen zu können, stehen mehrere Möglichkeiten bei diesem Programmpaket zur Verfügung.

Anhand der "singular values" kann die Wahl der Parameter begutachtet werden. Da das Verhältnis zwischen dem größten und dem kleinsten Wert wesentlich kleiner als 1000 : 1,

nämlich 39 : 1 und 27 : 1 ist, zeigt sich, daß die Abhängigkeit der Parameter untereinander gering ist und daß das Datenmaterial die Bestimmung dieser drei Parameter erlaubt (Tab. 2).

Tabelle 2

Auszug aus dem SPSS-Nonlinear.

"singular values" für die Meßpunkte 3 und 4

Meßpunkt 3

S I N G U L A R V A L U E S

SING. VALUES			2.1994738E+01	5.9714691E+00	4.0869963E+00
PAR.	1	B1	-.0191622	.8932773	-.4490973
	2	B2	.0088922	-.4490098	-.9934826
	3	B3	.9997769	.0211146	-.0006608

Meßpunkt 4

S I N G U L A R V A L U E S

SING. VALUES			1.3676680E+01	5.4149320E+00	2.6314495E+00
PAR.	1	B1	-.1330549	.8396203	.5266252
	2	B2	.0742109	-.5214180	.3500682
	3	B3	.7893264	.1521871	.0070683

Die Parameter in SPSS-Nonlinear werden wie folgt bezeichnet:

$$B1 = T_{m,z} [^{\circ}\text{C}]$$

$$B2 = A_z [^{\circ}\text{C}]$$

$$B3 = \varphi_z [\text{rad}]$$

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Anpassung für B1, B2 und B3 zusammengefaßt.

Tabelle 3
Auszug aus SPSS-Nonlinear.

Endwerte für B1, B2, B3 und 95 % Vertrauensgrenze für die Meßpunkte 3 und 4

Meßpunkt 3

CONFIDENCE LIMITS ON LINEAR HYPOTHESIS

			LOWER LIMIT	FINAL VALUE	UPPER LIMIT
PAR.	1	B1	8.5887135E+00	8.8172023E+00	9.0456910E+00
	2	B2	6.2175080E+00	6.5020946E+00	6.7866812E+00
	3	B3	7.8120277E-01	8.3732672E-01	8.9345106E-01

Meßpunkt 4

CONFIDENCE LIMITS ON LINEAR HYPOTHESIS

			LOWER LIMIT	FINAL VALUE	UPPER LIMIT
PAR.	1	B1	3.7571756E+00	8.9472922E+00	9.1274088E+00
	2	B2	3.7325319E+00	3.9722124E+00	4.2118936E+00
	3	B3	3.5709148E-01	4.1155973E-01	4.6502797E-01

Die Ergebnisse für den Meßpunkt 3, für eine Tiefe z von 1,15 m, lauten:

$$\begin{aligned} T_{m,z} &= 8,8^{\circ}\text{C} \pm 0,23^{\circ}\text{C} \\ A_z &= 6,5^{\circ}\text{C} \pm 0,28^{\circ}\text{C} \\ \varphi_z &= 48,6 \text{ d} \pm 3,2 \text{ d} \end{aligned}$$

Die Abweichung der Parameter entspricht der Vertrauensgrenze von 95 %, wobei bei Betrachtung eines Parameters die restlichen als konstant angenommen werden.

Für den Meßpunkt 4 ($z = 2,35$ m) wurden für die Parameter folgende Werte errechnet:

$$\begin{aligned}T_{m,z} &= 8,9^{\circ}\text{C} \pm 0,18^{\circ}\text{C} \\A_z &= 4,0^{\circ}\text{C} \pm 0,24^{\circ}\text{C} \\\varphi_z &= 23,8 \text{ d} \pm 3,1 \text{ d}\end{aligned}$$

Für beide Anpassungen wird ein Gütewert berechnet, der analog zur Standardabweichung gebildet ist (root mean square residual):

$$s' = \sqrt{\frac{\sum (f(t) - y_0)^2}{v}} \quad (8)$$

wobei t die Zeit, $f(t)$ die gewählte Funktion der Anpassung ist, y_0 der Meßwert und v die Freiheitsgrade.

In Tabelle 4 sind die Abweichungen des Meßwertes (observation), des Funktionswertes (prediction) und der Differenz (residual) aufgestellt.

Tabelle 4

Auszug aus SPSS-Nonlinear.

Funktionswert, Meßwert und Abweichung für alle Meßwerte der Meßpunkte 3 und 4

Meßpunkt 3:

FINAL FUNCTION VALUES AND RESIDUALS

ROOT MEAN SQUARE RESIDUAL = 6.1549242E-01

D.F. =

29

THIS IS THE SCALE UNIT IN THE GRAPH OF THE RESIDUALS.

CASE	VAR	PREDICTION	OBSERVATION	RESIDUAL
1	1	1.4597588E+01	1.4800000E+01	1.0231204E-01
2	1	1.4983548E+01	1.5400000E+01	4.1145172E-01
3	1	1.5055365E+01	1.5400000E+01	3.4463512E-01
4	1	1.5111788E+01	1.5400000E+01	2.8521197E-01
5	1	1.5189908E+01	1.5000000E+01	-1.8990838E-01
6	1	1.5305757E+01	1.6300000E+01	9.9324280E-01
7	1	1.5255733E+01	1.5700000E+01	4.3326718E-01
8	1	1.3353807E+01	1.3800000E+01	4.4619309E-01
9	1	1.2205987E+01	1.1400000E+01	-8.0698679E-01
10	1	9.0251775E+00	9.0000000E+00	-1.0251775E+00
11	1	8.2424655E+00	7.2000000E+00	-1.0424655E+00
12	1	6.7132775E+00	5.4000000E+00	-1.3132775E+00
13	1	5.3055950E+00	5.9000000E+00	5.9430399E-01
14	1	4.8432561E+00	5.2000000E+00	3.5173387E-01
15	1	3.9497995E+00	4.5000000E+00	5.5020046E-01
16	1	3.5312567E+00	3.8000000E+00	2.6874328E-01
17	1	3.1144439E+00	3.4000000E+00	2.8555615E-01
18	1	2.7395552E+00	3.0000000E+00	2.6034477E-01
19	1	2.5337771E+00	2.4000000E+00	2.6622294E-01
20	1	2.4335247E+00	2.4000000E+00	3.6637525E-01
21	1	2.3244141E+00	2.3000000E+00	-2.4414116E-02
22	1	2.3503081E+00	3.0000000E+00	6.3919193E-01
23	1	2.4091396E+00	2.9000000E+00	4.9086044E-01
24	1	2.5001313E+00	3.0000000E+00	4.9986871E-01
25	1	2.6925809E+00	2.4000000E+00	-2.9258095E-01
26	1	3.0502594E+00	2.9000000E+00	-1.5026936E-01
27	1	3.2129852E+00	3.0000000E+00	-2.1298623E-01
28	1	3.7883508E+00	3.5000000E+00	-2.8886079E-01
29	1	4.4851875E+00	4.1000000E+00	-3.8518750E-01
30	1	5.1918384E+00	5.4000000E+00	2.0816161E-01
31	1	7.1181080E+00	5.0000000E+00	-1.1181080E+00
32	1	9.4475547E+00	8.5000000E+00	-9.4765467E-01

Tabelle 4 (Fortsetzung)

Meßpunkt 4:

FINAL FUNCTION VALUES AND RESIDUALS

ROOT MEAN SQUARE RESIDUAL = 3.5547206E-01

D.F. = 23

THIS IS THE SCALE UNIT IN THE GRAPH OF THE RESIDUALS.

CASEVAR		PREDICTION	OBSERVATION	RESIDUAL
1	1	1.1519003E+01	1.2000000E+01	4.8099717E-01
2	1	1.1364265E+01	1.2100000E+01	2.3573503E-01
3	1	1.1955345E+01	1.2200000E+01	2.4465451E-01
4	1	1.0702766E+01	1.0600000E+01	-1.0275602E-01
5	1	1.0251705E+01	1.0100000E+01	-1.6170434E-01
6	1	9.3290585E+00	9.1000000E+00	-2.2906847E-01
7	1	8.3743655E+00	8.3000000E+00	-7.4365482E-02
8	1	8.0385865E+00	8.2000000E+00	1.611346E-01
9	1	7.3259500E+00	7.1000000E+00	-2.2694005E-01
10	1	6.9515946E+00	6.3000000E+00	-6.6169462E-01
11	1	6.5525374E+00	6.2000000E+00	-3.6525374E-01
12	1	6.1490220E+00	6.4000000E+00	2.5097804E-01
13	1	5.8732653E+00	6.4000000E+00	5.2673469E-01
14	1	5.7074624E+00	6.0000000E+00	2.9253757E-01
15	1	5.4225341E+00	6.7000000E+00	2.7736590E-01
16	1	5.1509643E+00	6.0000000E+00	-1.6096429E-01
17	1	5.1040214E+00	6.4000000E+00	2.9597862E-01
18	1	5.0440505E+00	6.4000000E+00	3.5593953E-01
19	1	4.9885594E+00	6.2000000E+00	2.1113056E-01
20	1	4.9809477E+00	6.2000000E+00	2.1905234E-01
21	1	4.9973759E+00	6.0000000E+00	2.5230736E-01
22	1	5.1095408E+00	6.0000000E+00	-1.0954078E-01
23	1	5.3125366E+00	6.1000000E+00	-2.1363662E-01
24	1	5.5583278E+00	6.5000000E+00	3.1672163E-02
25	1	6.4183673E+00	6.0000000E+00	-4.1836734E-01
26	1	7.6551867E+00	6.8000000E+00	-8.6518670E-01

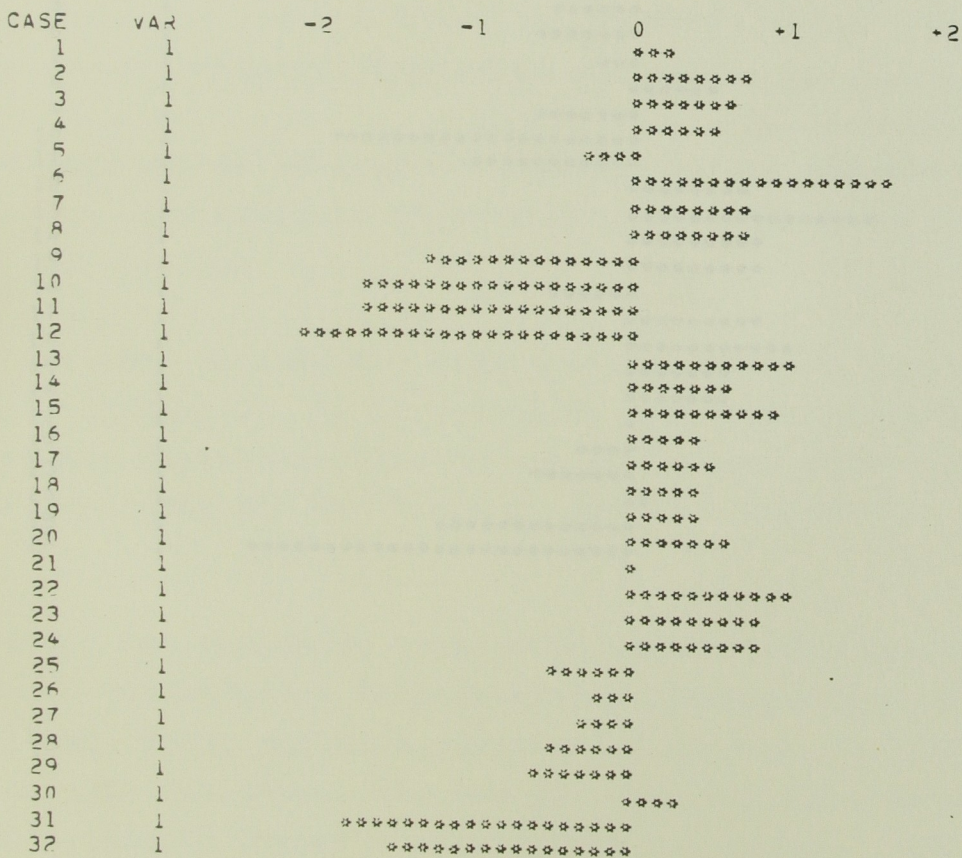
Tabelle 5

Auszug aus SPSS-Nonlinear.

Graphische Darstellung der Abweichung (residuals) für alle Meßwerte der Meßpunkte 3 und 4

Meßpunkt 3: Einheit der Abweichung $0,62^{\circ}\text{C}$

GRAPH OF RESIDUALS



Die Werte von s' für die Meßpunkte 3 und 4 sind

$$s_4' = 0,36^{\circ}\text{C}$$

$$s_3' = 0,62^{\circ}\text{C}$$

Die Zuordnung der Dimension einer Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] folgt daraus, daß der Nenner von Gl. (8) (Freiheitsgrade) dimensionslos ist und daher der Ausdruck für s' (Gl. (8)) die Dimension einer Temperatur annimmt.

Wie sich aus den Werten s_3' und s_4' zeigt, ist die Anpassung an eine einfache Temperaturverteilung in der Form der Gl. (7) möglich.

In der Abb. 10 sind die Funktionsverläufe der Temperaturverteilungen (Gl. 7) dargestellt. Aus dieser Abbildung läßt sich die Phasenverschiebung von 24,8 Tagen sowie die Abnahme der Amplitude mit der Tiefe z deutlich erkennen.

Die aus der Anpassung gewonnenen Werte wurden herangezogen, um die vollständige Temperaturverteilungsfunktion zu berechnen. Dafür war eine Erweiterung der Gl. (7) erforderlich. Die Gleichung, die nun die vollständige räumliche und zeitliche Temperaturverteilung beschreibt, lautet nach Gl. (6)

$$T_B(z, t) = T_m(0) + \frac{\Delta T_m}{\Delta z} \cdot z + A_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t - \frac{z}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} - \epsilon\right) \quad (9)$$

$T_m(0)$... Mitteltemperatur an den Oberflächen $z = 0$ [$^{\circ}\text{C}$]

$\frac{\Delta T_m}{\Delta z}$... Abweichung von der Mitteltemperatur $T_m(0)$ [$^{\circ}\text{C}$]

A_0 Amplitude für $z = 0$ [$^{\circ}\text{C}$]

m^2 Temperaturleitfähigkeit [m^2s^{-1}]

ϵ Phasenverschiebung [rad]

τ Periode (365 d) [d]

Die Phasenverschiebung ϵ hat keine physikalische Bedeutung, sondern ist nur durch die Wahl des Nullpunktes der Zeitachse festgelegt. Der Unterschied der Phasenverschiebung ϵ (Gl. 9) gegenüber der Phasenverschiebung φ der Anpassungsfunktion (Gl. 7) liegt darin, daß bei der Anpassung die Tiefenabhängigkeit des Argumentes und die geometrisch bedingten Phasenwinkel ϵ zusammengefaßt wurden. Der Zusammenhang lautet:

$$\varphi = - \frac{z}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} - \epsilon$$

Aus der zeitlichen Abhängigkeit der Bodentemperatur vom Meßpunkt 3 und 4 können nun die Parameter der obenstehenden Gleichung bestimmt werden.

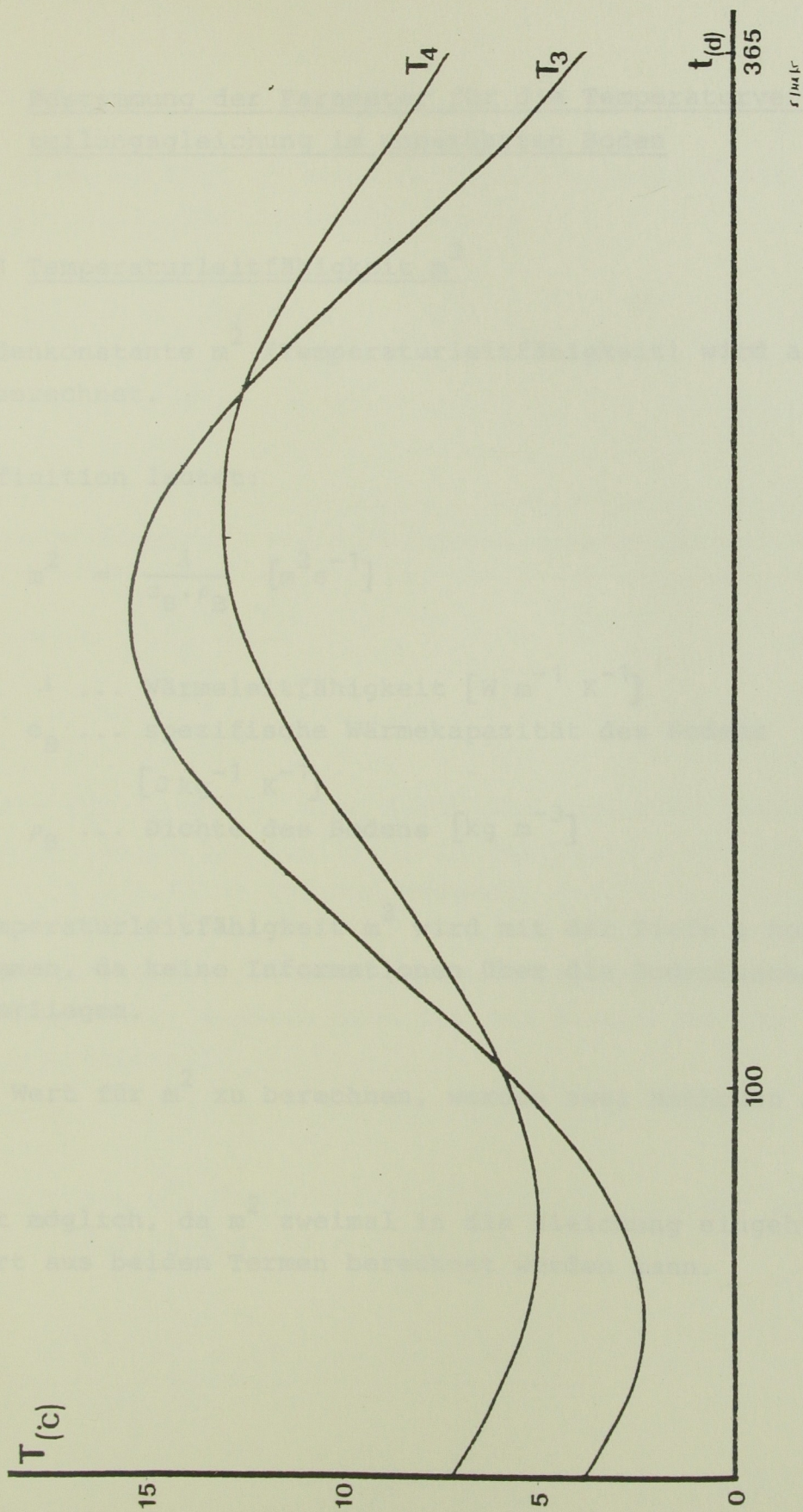


Abb. 10: Bodentemperatur $T_3(t)$ und $T_4(t)$. Funktionsanpassung für die Meßpunkte 3 und 4

5.2.1 Bestimmung der Parameter für die Temperaturverteilungsgleichung im unberührten Boden

5.2.1.1 Temperaturleitfähigkeit m^2

Die Bodenkonstante m^2 (Temperaturleitfähigkeit) wird als erste berechnet.

Die Definition lautet:

$$m^2 = \frac{\lambda}{c_B \cdot \rho_B} \quad [m^2 s^{-1}]$$

λ ... Wärmeleitfähigkeit $[W m^{-1} K^{-1}]$

c_B ... spezifische Wärmekapazität des Bodens
 $[J kg^{-1} K^{-1}]$

ρ_B ... Dichte des Bodens $[kg m^{-3}]$

Die Temperaturleitfähigkeit m^2 wird mit der Tiefe z konstant angenommen, da keine Informationen über die Bodenbeschaffenheit vorliegen.

Um den Wert für m^2 zu berechnen, werden zwei Methoden angewandt.

Das ist möglich, da m^2 zweimal in die Gleichung eingeht und der Wert aus beiden Termen berechnet werden kann.

1. Methode

Zuerst wird der Wert m^2 aus dem Amplitudenverlauf mit der Tiefe berechnet. Die Gleichung lautet:

$$A_i = A_0 \exp \left(- z_i \cdot \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \right) \quad (10)$$

$$i = 3, 4$$

$$z_3 < z_4$$

Aus zwei Meßtiefen z_3 und z_4 ergibt sich nun für m :

$$m = \frac{(z_3 - z_4) \sqrt{\frac{\pi}{\tau}}}{\ln \frac{A_3}{A_4}} \quad (11)$$

Die Werte für A_3 und A_4 sind durch die Anpassung bekannt. Es sind die Werte der Amplitude in der Tiefe z für den Meßpunkte 3 ($z = 1,15$ m) und den Meßpunkt 4 ($z = 2,35$ m).

Die Berechnungen wurden nun nicht nur mit den Zentralwerten durchgeführt, sondern auch mit den Werten für das 95 %-Vertrauensintervall.

Tabelle 6

Berechnung von m^2 (Temperaturleitfähigkeit) aus der Amplitude A_3 ($z = 1,15$ m) und A_4 ($z = 2,35$ m)

$10^6 m^2$	A_3	6,22	6,50	6,79
A_4				
3,73		0,548	0,465	0,399
3,97		0,711	0,590	0,498
4,21		0,941	0,760	0,627

$$m^2 = [m^2 s^{-1}]$$

Aus dem Zentralwert (Tab. 6) ergibt sich nun $0,59 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ als Wert für die Temperaturleitfähigkeit m^2 . Um das Ergebnis abzuschätzen, wurden auch die Randwerte herangezogen. Für einen Vertrauensbereich von 99,75 % gilt nun

$$0,399 \cdot 10^{-6} < \text{m}^2 < 0,941 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \text{ s}^{-1}]$$

Wird jedoch der Vertrauensbereich mit 95 % angenommen, reduziert sich die wahrscheinliche Abweichung auf

$$0,465 \cdot 10^{-6} < \text{m}^2 < 0,760 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \text{ s}^{-1}]$$

2. Methode

Bei der zweiten Methode wird aus der Phasenverschiebung der Temperaturverläufe der Wert für die Temperaturleitfähigkeit bestimmt. Wählt man den Nulldurchgang der Sinus-Funktion so gilt

$$\frac{2\pi}{\tau} t_i - z_i \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} - \epsilon = 0 \quad \begin{array}{l} i = 3,4 \\ z_3 < z_4 \end{array} \quad (12)$$

Es ergeben sich somit für die zwei Meßtiefen 3 und 4 zwei Gleichungen. Subtrahiert man die eine von der anderen, erhält man für m:

$$m = \frac{(z_3 - z_4)}{(t_3 - t_4)} \sqrt{\frac{\tau}{4\pi}} \quad (13)$$

Die Differenz $(t_3 - t_4)$ ist die Phasenverschiebung der beiden Anpassungen für die Meßpunkte 3 und 4.

In der Tabelle 7 werden nun die möglichen Phasenverschiebungen $\Delta t_{3,4}$ aus den Randwerten sowie dem Zentralwert der Zeitpunkte t_3 und t_4 berechnet.

Tabelle 7

Phasenverschiebung $\Delta t_{3,4}$ aus den Werten t_3 und t_4

$t_{3,4}$	t_3	45,4	48,6	51,8	$\Delta t_{3,4} = [d]$
t_4					
20,7		24,7	27,9	31,1	
23,8		21,6	<u>24,8</u>	28,0	
26,9		18,5	21,7	24,9	

Aus dem Zentralwert (Tabelle 7) ergibt sich nun für m^2 ein Wert von $0,787 \cdot 10^{-6}$. Betrachtet man wieder die Randwerte, so ergeben sich folgende Abweichungen vom Zentralwert, die von der Strenge des Vertrauensbereiches abhängen.

Für den Vertrauensbereich von 99,75 % lautet die Grenze

$$0,501 \cdot 10^{-6} < m^2 < 1,414 \cdot 10^{-6}$$

Erweitert man den Vertrauensbereich auf 95 % so ergibt sich

$$0,617 \cdot 10^{-6} < m^2 < 1,037 \cdot 10^{-6}$$

Um die Ergebnisse aus den zwei Methoden abzuschätzen, werden beide direkt miteinander verglichen. Aus der Gleichung (11) und der Gleichung (13) ergibt sich

$$\ln \frac{A_4}{A_3} = \frac{2\pi}{\tau} (t_3 - t_4) \quad (14)$$

Nun wurde zuerst die linke Seite, also das Verhältnis der Amplitude, aus den Werten der Tabelle 7 berechnet.

Dabei zeigt sich, daß sich die Werte weit aus der Vertrauensgrenze von 95 % bei der Anpassung von den Meßpunkten 3 und 4 heraus bewegen.

Berechnet man jedoch aus dem Verhältnis der Amplitude (A_4/A_3) die Phasenverschiebung ($t_3 - t_4$), so ergeben sich weit bessere Werte.

Aus diesem Grund wird dem Ergebnis aus der ersten Methode mehr Glauben geschenkt.

Der Wert für die Temperaturleitfähigkeit wird durch zwei Methoden berechnet und durch den Vergleich der beiden bestimmt.

Der Wert lautet:

$$m^2 = 0,59 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

5.2.1.2 Amplitude (A_0)

Der nächste zu bestimmende Parameter ist die Amplitude A_0 an der Oberfläche ($z = 0$).

Der Wert der Amplitude wird ebenfalls mit zwei Methoden berechnet. Die erste zieht nur die Tiefenabhängigkeit heran, während die zweite Methode den Wert für A_0 aus beiden Meßpunkten bestimmt.

1. Methode

Die für die Berechnung herangezogene Tiefenabhängigkeit der Amplitude lautet

$$A_i = A_o \exp \left(-z_i \cdot \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \right) \quad i = 3, 4$$

Aus dieser Gleichung wird A_o explizit dargestellt

$$A_o = A_i \exp \left(z_i \cdot \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \right) \quad (15)$$

Bei dieser Methode wird bereits der im vorangegangenen Teil berechnete Wert m eingesetzt. Für die Meßpunkte 3 und 4 (A_3, A_4) lauten nun die Ergebnisse

$$z_3 = 1,15 \text{ m und } A_3 = 6,5^\circ\text{C}$$

$$\underline{A_o = 10,43^\circ\text{C}}$$

und für

$$z_4 = 2,35 \text{ m und } A_4 = 4,0^\circ\text{C}$$

$$\underline{A_o = 10,50^\circ\text{C}}$$

2. Methode

Bei der zweiten Methode wird die Amplitude aus den zwei Meßpunkten bestimmt. Der Vorteil ist, daß die Temperaturleitfähigkeit m^2 somit nicht in die Gleichung eingeht. Das ist eine weitere Prüfung für die Güte der Abschätzung von m^2 .

Für die beiden Meßpunkte ergibt sich nach Gl.(15) je eine Gleichung. Durch Subtraktion der beiden wird A_o explizit dargestellt und lautet

$$\ln A_o = \frac{z_4 \ln A_3 - z_3 \ln A_4}{z_4 - z_3} \quad (16)$$

Tabelle 8
Werttabelle für die Amplitude A_0 berechnet nach Gl. (16)
aus den Amplituden A_3 und A_4 (alle Werte in $^{\circ}\text{C}$)

	A_3	6,22	6,50	6,79
A_4				
3,73		10,15	11,07	12,06
3,97		9,56	<u>10,43</u>	11,36
4,12		9,24	10,06	10,95

Vergleicht man den Zentralwert aus Tab. 8 mit dem Ergebnis der ersten Methode, so zeigt sich eine völlige Übereinstimmung.

Als Ergebnis für die Amplitude A_0 wird daher ein Wert von 10,43 $^{\circ}\text{C}$ festgelegt.

Die Übereinstimmung der beiden Methoden ergibt, daß der angenommene Wert für die Temperaturleitfähigkeit den Meßergebnissen weitestgehend entspricht.

5.2.1.3 Mitteltemperatur ($T_m(0)$)

Für die Bestimmung der Mitteltemperatur werden die Mitteltemperaturen für die Tiefen $z_3 = 1,15$ m und $z_4 = 2,35$ m herangezogen.

Die Werte lauten:

$$T_{m,3} = 8,8^{\circ}\text{C} \pm 0,23^{\circ}\text{C}$$

$$T_{m,4} = 8,9^{\circ}\text{C} \pm 0,18^{\circ}\text{C}$$

Da sich die Vertrauensgrenzen für 95 % jedoch überschneiden, wird eine Mitteltemperatur T_m von $8,85^{\circ}\text{C}$ angenommen.

Die Änderung der Mitteltemperatur mit der Tiefe wird 0 gesetzt.

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta z} = 0$$

5.2.1.4 Phasenverschiebung

Der Parameter ϵ ist ein geometrischer Faktor, der durch die Nullpunktwahl der Zeitachse t gegeben ist. Während für die Anpassung der Temperaturgleichung an die Meßpunkte 3 und 4 die Zeitkoordinaten für den 1. Juli gleich Null ist ($t = 0$), wird für die Raum-Zeit-Verteilung der 1. Jänner als Nullpunkt gewählt.

Die Phasenverschiebung ϵ wird aus den beiden Phasenverschiebungen der Anpassung φ_3 und φ_4 berechnet.

Das Argument der Winkelfunktion aus Gl. (9) lautet

$$\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - z \cdot \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} - \epsilon \quad (17)$$

Bei der Anpassung der Meßpunkte 3 und 4 werden die letzten zwei Terme der Gleichung zusammengefaßt

$$\varphi_i = - z_i \cdot \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} - \epsilon \quad i = 3 \text{ oder } 4$$

Aus den beiden Phasenverschiebungen φ_3 und φ_4 ergibt sich für ϵ' (Nullpunkt der Zeitachse ist der 1. Juli)

$$\epsilon' = 1,3435 \quad [\text{rad}]$$

Bei diesem Wert ist die Nullpunktverschiebung vom 1. Juli auf den 1. Jänner noch nicht berücksichtigt; man hat noch zu addieren

$$\epsilon'' = \frac{2\pi}{\tau} \cdot 180$$

Für die Phasenverschiebung erhält man somit:

$$\underline{\epsilon = \epsilon' + \epsilon'' = 4,4421}$$

5.2.1.5 Literaturübersicht über den täglichen und den jährlichen Verlauf von Bodentemperaturen

In dieser Arbeit wird ein anderer Weg für die Berechnung der Temperaturverteilung beschritten. Aus diesem Grund wird ein Vergleich der Methoden, aber auch der Werte mit der Literatur durchgeführt.

Der Unterschied der Methode bei der Bestimmung der Parameter liegt vor allem im Datenmaterial. Zwei wesentliche Unterschiede gegenüber der Literatur liegen vor:

- .) Die Dauer der vorliegenden Meßreihe ist wesentlich kürzer.
- .) Die Meßpunkte liegen wesentlich tiefer als bei herkömmlichen Stationen.

Die in der Literatur angeführten Berechnungen des jährlichen Ganges der Bodentemperatur beruhen zumeist auf langjährigen Beobachtungsreihen (SCHUBERT, 1930; DI GLERIA et al, 1962; KERNER-MARILAUN, 1942).

Durch langjährige Reihen werden zufällige Einflüsse ausgeschlossen und somit eine gute Mittelung erzielt.

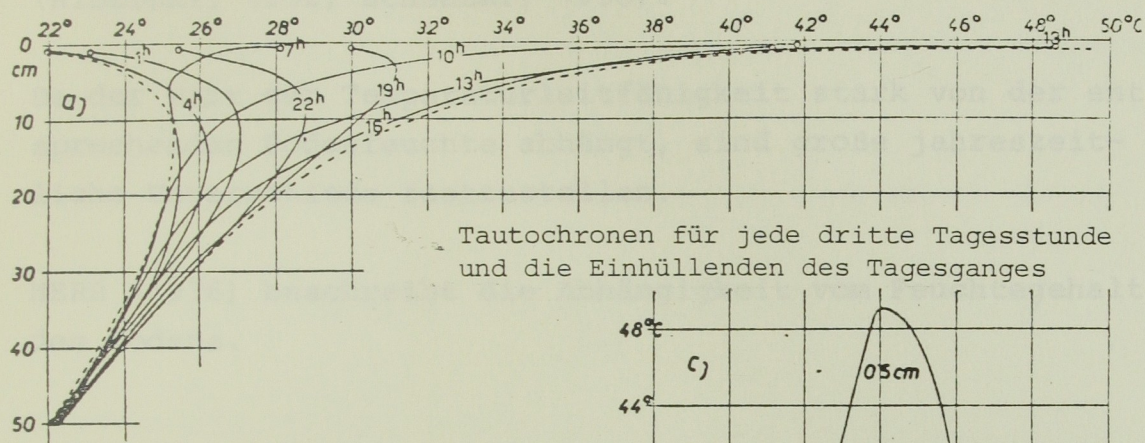
Da bei dieser Messung jedoch weder eine langjährige noch eine vollständige Meßreihe zur Verfügung steht, mußte eine alternative Methode angewendet werden.

So wird durch Funktionsanpassung eine schwankungsfreie Meßreihe simuliert. Diese Meßreihe hat den gleichen zeitlichen Verlauf wie die vollständige Temperaturverteilungsgleichung. Diese Möglichkeit, eine vollständige Meßreihe zu simulieren, ergibt sich jedoch erst dadurch, daß die Meßpunkte so tief liegen, daß ausgeschlossen werden kann, daß zufällige Witterungseinflüsse die Meßdaten beeinflussen können.

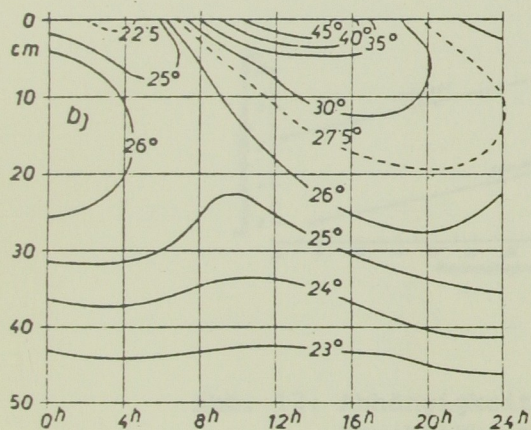
Abb. 11 zeigt die Abnahme der Amplitude mit der Tiefe für Tagesschwankungen der Bodentemperatur. Wie in dieser Abb. zu ersehen ist, sind die Einflüsse von kurzperiodigen Schwankungen ($\tau = 365$) nunmehr bis zu einer Tiefe von 0,5 m zu erkennen. Da jedoch die Meßpunkte in jedem Fall tiefer als 1 m liegen, können diese Einflüsse unberücksichtigt bleiben.

Aus diesem Grund ist der Einfluß der Bodenkonstante - der Temperaturleitfähigkeit - von weit größerer Bedeutung.

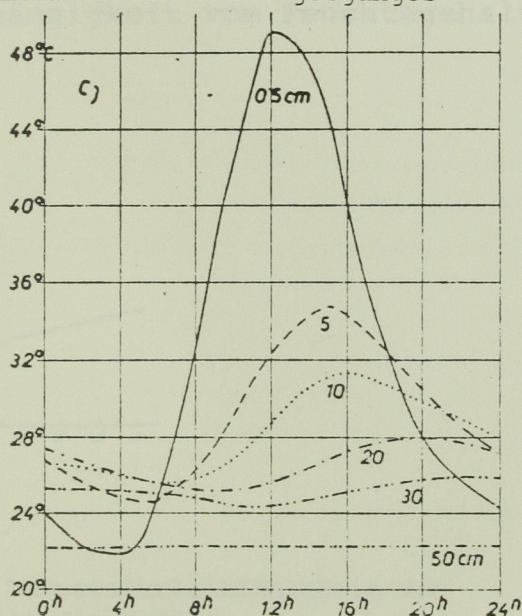
Tagesgang



Tautochronen für jede dritte Tagesstunde
und die Einhüllenden des Tagesganges



Tiefenwanderung der
Isothermen



Tagesgang in verschiedenen
Tiefen

Abb. 11: Verlauf der Bodentemperatur eines heißen Sommertages (in verschiedenen Darstellungen)

(aus: Klimatographie von Österreich, Bd. 3, 1960)

Temperaturleitfähigkeit des Bodens

Die Temperaturverteilungsgleichung bietet zwei Wege an, die Bodenkongstante zu bestimmen. Beide Methoden müßten zu einem gleichwertigen Resultat führen. Die auftretenden Abweichungen der beiden Werte sind vor allem auf die inhomogene Bodenschichtung zurückzuführen. Zumeist werden bei der Berechnung der Bodenkongstante Meßpunkte herangezogen,

die sich in der obersten Bodenschicht (bis 1 m) befinden (NIDETZKY, 1952; SCHUBERT, 1930).

Da der Wert der Temperaturleitfähigkeit stark von der entsprechenden Bodenfeuchte abhängt, sind große jahreszeitliche Unterschiede festzustellen.

HERR (1936) beschreibt die Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Bodens.

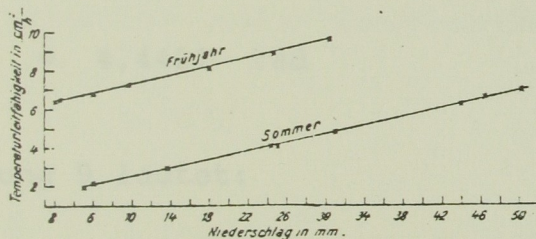


Abb. 12: Abhängigkeit der Temperaturleitfähigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt des Bodens
(Temperaturleitfähigkeit: $\text{m}^2 [\text{cm}^2 \text{h}^{-1}]$
Feuchteparameter: Niederschlag [mm]) nach HERR, 1936

Bei NIDETZKY (1952) sind die in der Literatur angeführten Werte der Temperaturleitfähigkeit zusammengefaßt. Der Zusammenhang zwischen der Bodenzusammensetzung und der Bodenkonzstante wird jedoch nicht streng untersucht. Daraus ergeben sich für die Abschätzung der Gültigkeit nur sehr weite Grenzen wie sie auch bei HARTGE (1979) angegeben werden.

5.2.2 Erstellung der Temperaturverteilung

Um die Güte der Parameter zu überprüfen, wird die Temperaturverteilung an den Meßwerten geprüft.

Die Parameter für die Gleichung lauten nach Punkt 5.2.1

$$T_m = 8,85^{\circ}\text{C} \quad \frac{\Delta T_m}{\Delta z} = 0$$

$$A_o = 10,43^{\circ}\text{C}$$

$$m^2 = 0,59 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\epsilon = 4,4421 \text{ rad}$$

Die Gleichung 9 lautet:

$$T_B(z, t) = T_m(0) + \frac{\Delta T_m}{\Delta z} \cdot z + A_o \exp(-z \cdot K) \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t - zK - \epsilon\right)$$

$$K = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}}$$

$$z \dots \text{in } [\text{m}]$$

$$t \dots \text{in } [\text{d}]$$

$$\tau \dots 365 [\text{d}]$$

Die parallele Verwendung der Einheit Tag [d] und Sekunde [s] ist wegen der größeren Übersichtlichkeit der Parameter zweckmäßig.

Aus der Gl. (9) wird der zeitliche Temperaturverlauf für $z_3 = 1,15 \text{ m}$ und $z_4 = 2,35 \text{ m}$ berechnet. Diese beiden Funktionsverläufe entsprechen den Anpassungen (nach Gl. (7)) für die zwei Meßpunkte.

Die Differenz dieser beiden Funktionspaare ist der Fehler der Temperaturverteilung, unter der Annahme, daß die Anpassungen (Meßpunkte 3 und 4) den Messungen entsprechen. Der Fehler hat wieder einen sinus-förmigen Verlauf mit der Periode τ von 365 Tagen (Abb. 13).

Aus diesen beiden Fehlerkurven werden die Parameter der Temperaturverteilung verbessert, sodaß der Fehler reduziert werden kann. Es werden jedoch nur die Werte für die Mitteltemperatur und für den Gradienten $\frac{\Delta T_m}{\Delta z}$ verändert.

Für diese Parameter gelten folgende Werte

$$T_m = 8,70^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta z} = 0,108^{\circ}\text{C m}^{-1}$$

Durch die Änderung konnte der Fehler der Temperaturverteilung wesentlich verkleinert werden. Für die korrigierten Werte sind die Fehlerkurven in Abb. 14 zu sehen.

Die Fehler der Temperaturverteilung liegen in einer Größenordnung, in der sich auch die Fehler der Anpassung bewegt haben. Es erscheint deshalb durchaus sinnvoll, mit dieser Gleichung die Bodentemperatur im Bereich des Speichers zu berechnen.

Die Temperaturverteilung wird durch die sogenannte isotherme Darstellung veranschaulicht (Abb. 15). In diesem Fall wird auf der Abszisse die Zeit t , auf der Ordinate die Tiefe z aufgetragen. Die Darstellung der Temperatur erfolgt durch kontinuierliche Kurven mit einem Abstand von 1°C . Bei der Isothermendarstellung ist das Verhalten der Temperaturverteilung gut zu erkennen:

- 1) die Phasenverschiebung mit der Tiefe durch die Neigung der Kurvenschar
- 2) die Amplitudenabnahme mit der Tiefe durch die geringere Kurvendichte in größeren Tiefen.

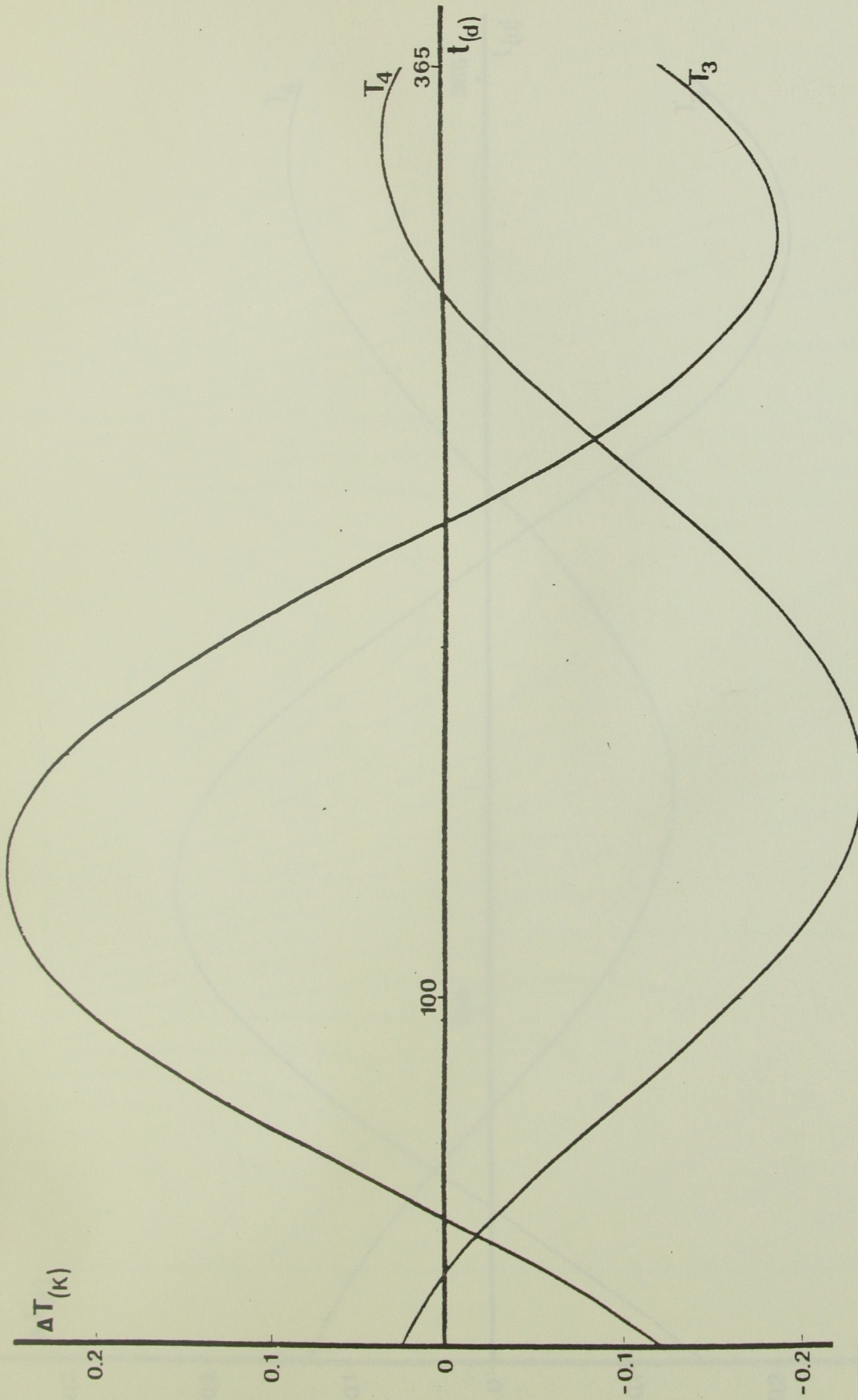


Abb. 13: Fehlerfunktion. Abweichung der Anpassung für die Meßpunkte 3 und 4 von der Temperaturverteilung
 $T'_i(z, t) - T_i = T'_i - T_i \quad i = 3, 4$

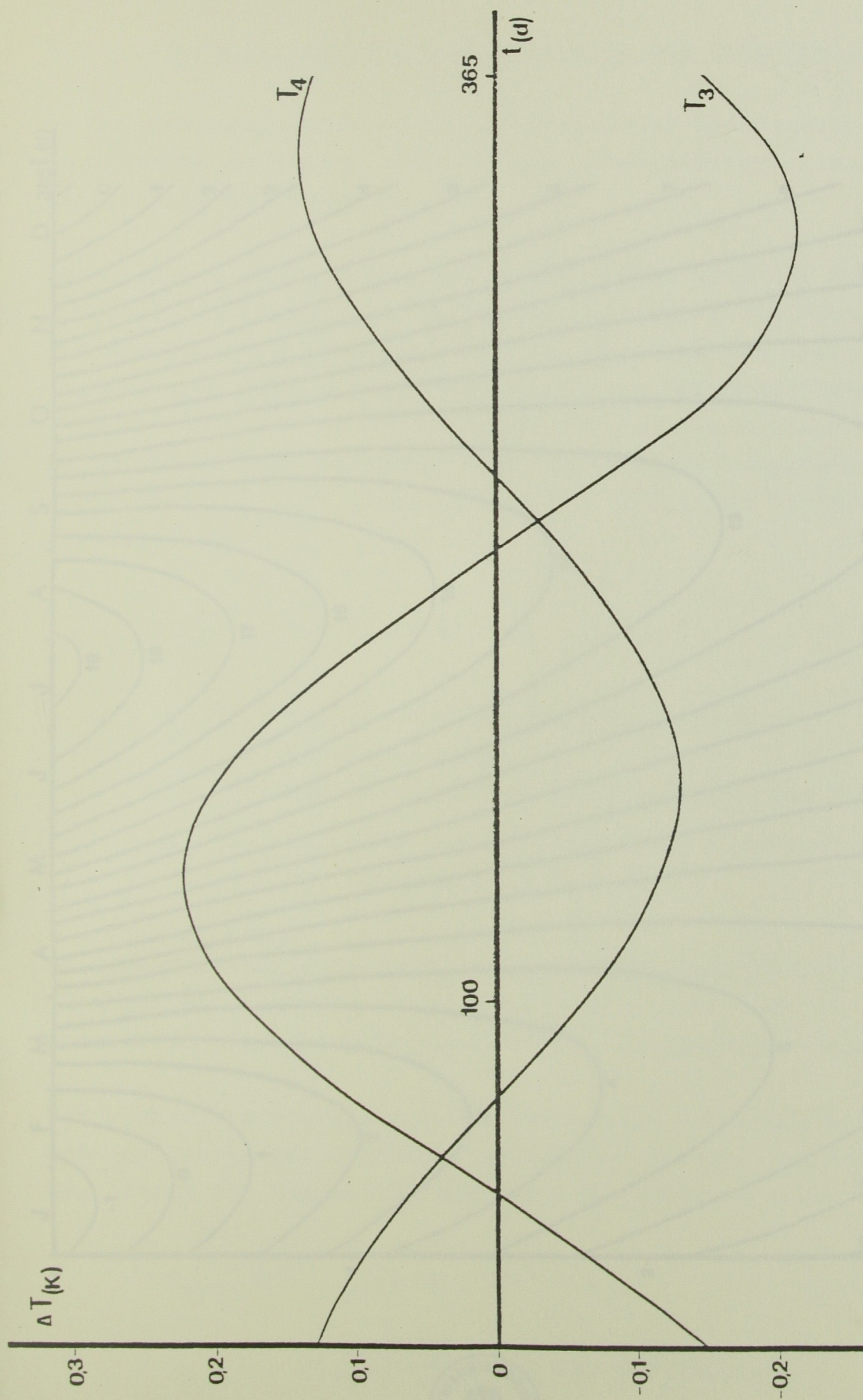


Abb. 14: Fehlerfunktion. Abweichung der Anpassung für die Meßpunkte 3 und 4 von der verbesserten Temperaturverteilung $T(z, t)$

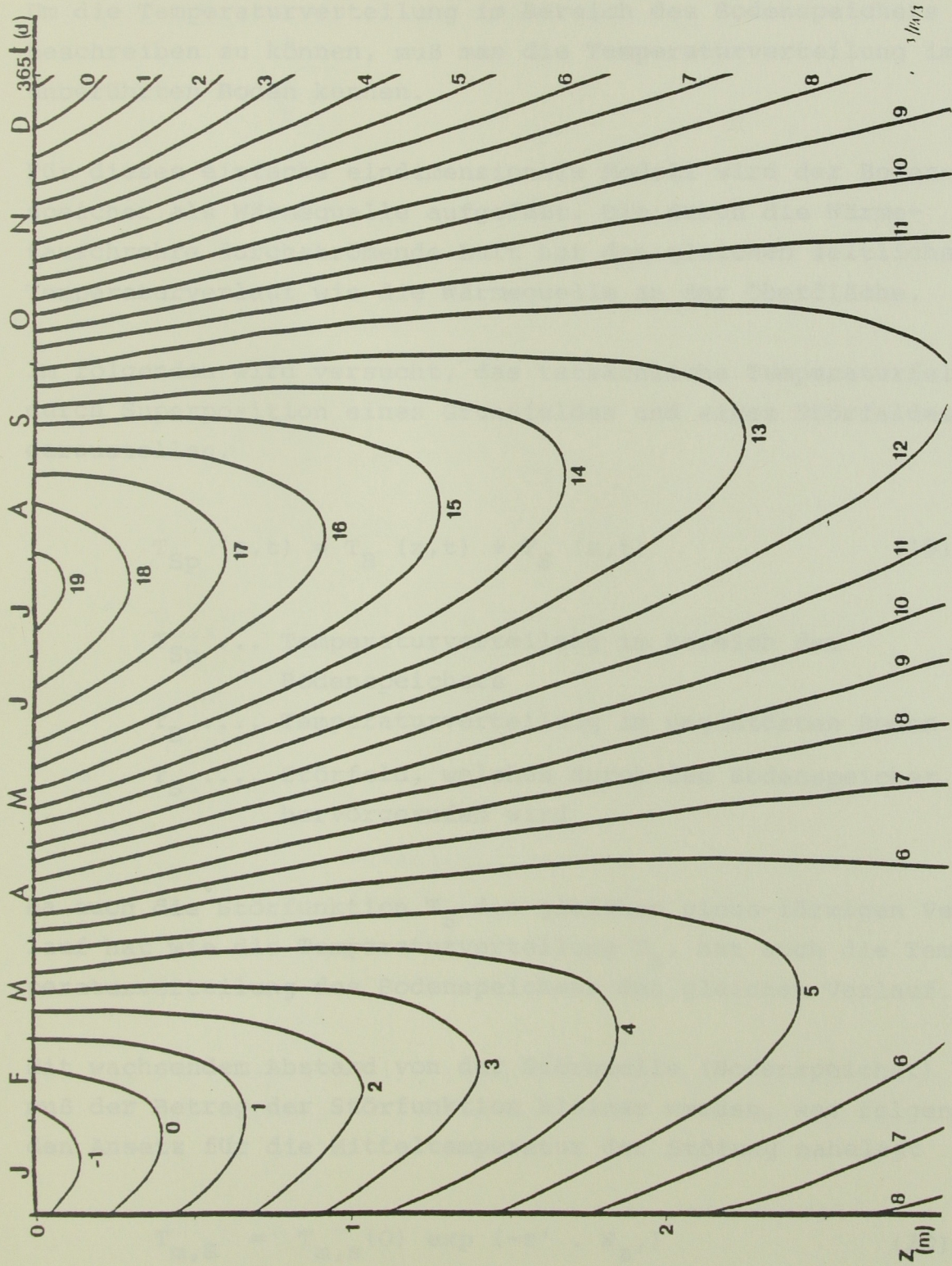


Abb. 15: Temperaturverteilung. Isothermendarstellung der räumlichen und zeitlichen Veränderungen. Brechnet aus den Meßpunkten 3 und 4.

5.3 Temperaturverteilung im Bereich des Bodenspeichers

Um die Temperaturverteilung im Bereich des Bodenspeichers beschreiben zu können, muß man die Temperaturverteilung im unberührten Boden kennen.

Für dieses einfache eindimensionale Modell wird der Bodenspeicher als Wärmequelle aufgefaßt. Die durch die Wärmetauschrohre durchströmende Luft hat den gleichen zeitlichen Temperaturverlauf wie die Wärmequelle an der Oberfläche.

Im folgenden wird versucht, das tatsächliche Temperaturfeld durch Superposition eines Grundfeldes und eines Störfeldes darzustellen.

$$T_{Sp} (z,t) = T_B (z,t) + T_S (z,t) \quad (19)$$

T_{Sp} ... Temperaturverteilung im Bereich des Bodenspeichers

T_B Temperaturverteilung im ungestörten Boden

T_S Störfeld, welches durch den Bodenspeicher hervorgerufen wird

Da auch die Störfunktion T_S den gleichen sinus-förmigen Verlauf hat wie die Temperaturverteilung T_B , hat auch die Temperaturverteilung des Bodenspeichers den gleichen Verlauf.

Mit wachsendem Abstand von der Störquelle (Bodenspeicher) muß der Betrag der Störfunktion kleiner werden, was folgenden Ansatz für die Mitteltemperatur der Störung nahelegt

$$T_{m,S} = T_{m,S}(0) \exp (-z' \cdot K_z) \quad (20)$$

$T_{m,S}$... Mitteltemperatur der Störfunktion

z' Abstand von der Störquelle

Der Koeffizient $K_{z'}$ wird genauso angesetzt wie der Koeffizient für die Amplitudendämpfung in Gl. (18) (Abschnitt 5.2.2 Erstellung der Temperaturverteilung)

$$K_{z'} = \sqrt{\frac{\pi}{\tau m^2}}$$

Die Störfunktion hat nun folgende Form:

$$T_S(z', t) = T_{m,S}(0) \cdot f_1(z') + A_S(0) \cdot f_1(z') \cdot f_2(z', t) \quad (21)$$

$$f_1(z') = \exp(-z' \cdot K_{z'})$$

$$f_2(z', t) = \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - z' K_{z'} - \epsilon_S\right)$$

$T_{m,S}(0)$... Mittlere Temperatur der Störfunktion für $z' = 0$

$A_S(0)$ Amplitude für $z' = 0$

$$K_{z'} \dots\dots\dots \sqrt{\frac{\pi}{\tau m^2}}$$

ϵ_S Phasenverschiebung der Störfunktion (abhängig von der Wahl des Nullpunktes $t=0$ der Zeitzählung)

z' Abstand von der Störquelle

Für die Störfunktion wird angenommen, daß sie symmetrisch in z zu den Wärmetauschrohren verläuft, d.h. nur abhängt vom Betrag

$$z' = |z_{Sp} - z|$$

z' Abstand von der Störquelle (Wärmetauschrohr)

z_{Sp} ... Tiefe der Störquelle (Wärmetauschrohr)

Die Gleichung der Störfunktion T_s erfüllt somit folgende Forderungen:

- 1) Gleicher zeitlicher Verlauf der Störfunktion wie die Bodentemperatur
- 2) Abklingen der Störfunktion mit dem Abstand (z') von den Wärmetauschrohren
- 3) symmetrisches Verhalten der Störfunktion in der z' -Achse.

5.3.1 Berechnungen der Störfunktion im Bereich der Meßpunkte 1 und 2

Die Berechnung der Störfunktion wird auf die gleiche Weise durchgeführt wie die Temperaturverteilung im ungestörten Boden ($T_B(z,t)$).

Im Bereich des Bodenspeichers befinden sich die zwei Meßpunkte 1 und 2 in jeweils 1,25 m und 1,85 m Tiefe. An die Meßwerte dieser beiden Meßpunkte werden die gleichen Temperaturfunktionen wie an die Meßpunkte 3 und 4 angepaßt, und zwar in der Form der Gl. (7).

$$T_z(t) = T_{m,z} + A_z \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t + \varphi_z\right)$$

Für die Anpassung steht das gleiche Datenmaterial zur Verfügung. Die Güte der Anpassung der Parameter ist vergleichbar.

Die Anpassung wird wieder mit Hilfe des Programmpakets SPSS-Nonlinear durchgeführt. Die in der folgenden Tabelle verwendeten Bezeichnungen für die Parameter sind

$$\begin{aligned} B1 &= T_{m,z} [^{\circ}\text{C}] \\ B2 &= A_z [^{\circ}\text{C}] \\ B3 &= \varphi_z [\text{rad}] \end{aligned}$$

Die Periode der Anpassung ist 365 Tage. Im folgenden sind die Ergebnisse der Anpassung für die Meßpunkte 1 und 2 angeführt.

Die Abschätzung, ob die Form der Anpassung den Daten gerecht werden, wird durch die "singular values" durchgeführt (Tab. 9).

Tabelle 9:

Auszug aus dem SPSS-Nonlinear.

Werte für die "singular values" für die Meßpunkte 1 und 2

Meßpunkt 1

S I N G U L A R V A L U E S

SING. VALUES			2.5846190E+01	5.9779955E+00	4.0864401E+00
PAR.	1	B1	-.0142225	-.8926432	.4505394
	2	B2	.0053687	.4505104	.8927551
	3	B3	.9995844	-.0151160	.0016151

Meßpunkt 2

S I N G U L A R V A L U E S

SING. VALUES			2.2856662E+01	5.9231233E+00	3.8901406E+00
PAR.	1	B1	-.0301422	.8787595	.4763121
	2	B2	.0091826	-.4762651	.8792538
	3	B3	.9995034	.0308764	.0062863

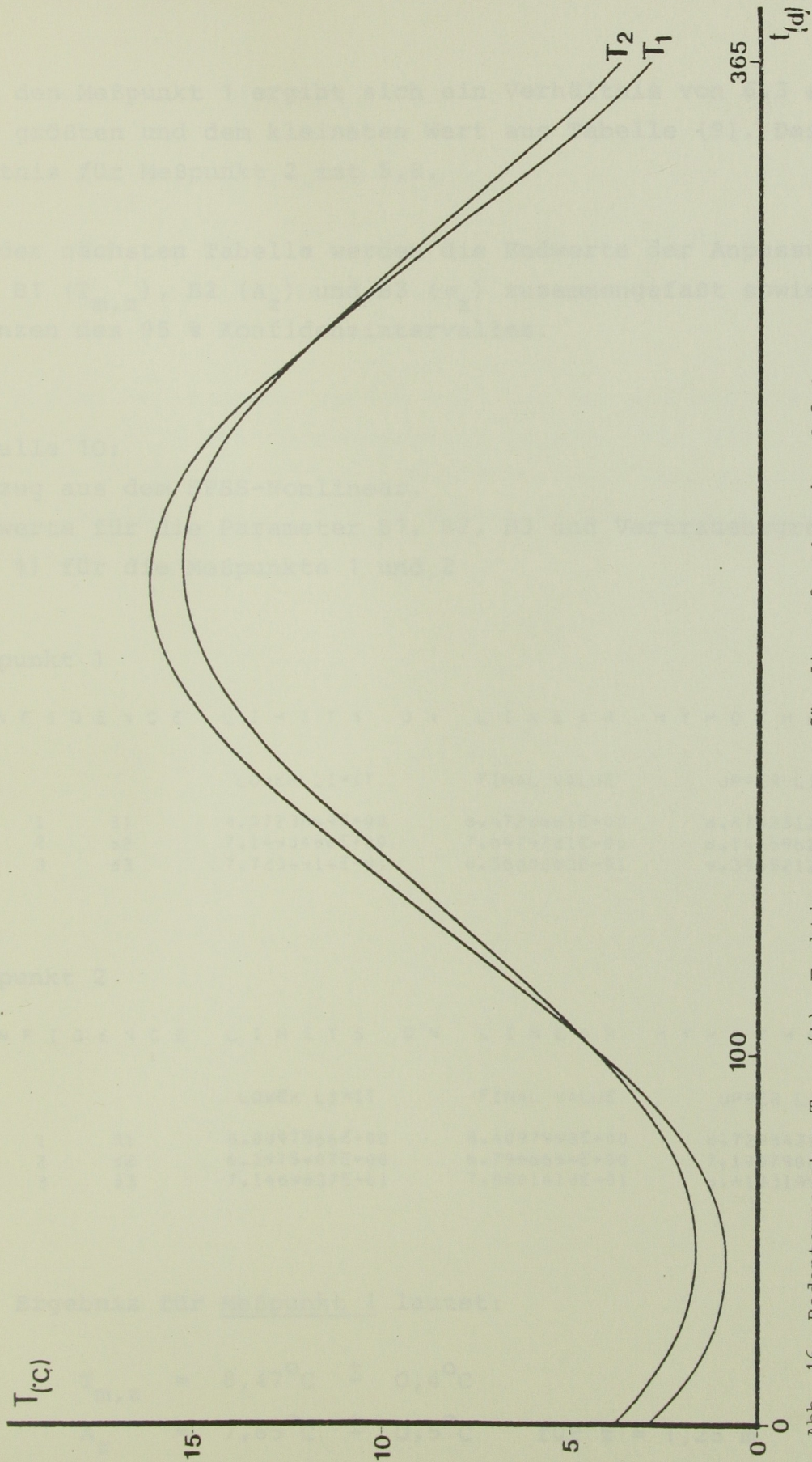


Abb. 16: Bodentemperatur $T_{1,2}$ (t). Funktionsanpassung für die Meßpunkte 1 und 2 im Bereich des Bodenspeichers ($x = 15,5$ m)

Für den Meßpunkt 1 ergibt sich ein Verhältnis von 6,3 aus dem größten und dem kleinsten Wert aus Tabelle (9). Das Verhältnis für Meßpunkt 2 ist 5,8.

In der nächsten Tabelle werden die Endwerte der Anpassung für B1 ($T_{m,z}$), B2 (A_z) und B3 (φ_z) zusammengefaßt sowie die Grenzen des 95 % Konfidenzintervalles.

Tabelle 10:

Auszug aus dem SPSS-Nonlinear.

Endwerte für die Parameter B1, B2, B3 und Vertrauensgrenze (95 %) für die Meßpunkte 1 und 2

Meßpunkt 1

			CONFIDENCE LIMITS ON LINEAR HYPOTHESIS		
			LOWER LIMIT	FINAL VALUE	UPPER LIMIT
PAR.	1	B1	8.0723849E+00	8.4728681E+00	8.8733512E+00
	2	B2	7.1493480E+00	7.6479721E+00	8.1465962E+00
	3	B3	7.7234914E-01	8.5600063E-01	9.3965212E-01

Meßpunkt 2

			CONFIDENCE LIMITS ON LINEAR HYPOTHESIS		
			LOWER LIMIT	FINAL VALUE	UPPER LIMIT
PAR.	1	B1	8.0897566E+00	8.4097998E+00	8.7298430E+00
	2	B2	6.3975407E+00	6.7966654E+00	7.1957900E+00
	3	B3	7.1469637E-01	7.8801418E-01	8.6133199E-01

Das Ergebnis für Meßpunkt 1 lautet:

$$\begin{aligned} T_{m,z} &= 8,47^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C} \\ A_z &= 7,65^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C} \quad \text{für } z = 1,25 \text{ m} \\ \varphi_z &= .856^{\circ}\text{C} \pm 0,084 \quad [\text{rad}] \end{aligned}$$

Das Ergebnis für Meßpunkt 2 lautet:

$$\begin{aligned} T_{m,z} &= 8,41^{\circ}\text{C} \pm 0,32^{\circ}\text{C} \\ A_z &= 6,80^{\circ}\text{C} \pm 0,40^{\circ}\text{C} \quad \text{für } z = 1,85 \text{ m} \\ \varphi_z &= .788^{\circ}\text{C} \pm 0,073 \quad [\text{rad}] \end{aligned}$$

Die beiden Anpassungen werden wie auch für die Meßpunkte 3 und 4 durch die Standardabweichung geprüft (Gl. (8)).

In der Tabelle 11 sind die Abweichungen für beide Meßpunkte zu ersehen.

Tabelle 11

Auszug aus SPSS-Nonlinear.

Funktionswert (prediction), Meßwert (observation) und Abweichung (residual) für die Meßpunkte 1 und 2

Meßpunkt 1

FINAL FUNCTION VALUES AND RESIDUALS

ROOT MEAN SQUARE RESIDUAL = 1.0748029E+00
THIS IS THE SCALE UNIT IN THE GRAPH OF THE RESIDUALS. D.F. = 29

CASE	VAR	PREDICTION	OBSERVATION	RESIDUAL
1	1	1.5449412E+01	1.5800000E+01	3.5058762E-01
2	1	1.5775505E+01	1.6400000E+01	6.2449537E-01
3	1	1.5849390E+01	1.6200000E+01	3.5060951E-01
4	1	1.5914534E+01	1.6400000E+01	4.8546629E-01
5	1	1.5995590E+01	1.6300000E+01	3.0430993E-01
6	1	1.6113625E+01	1.7100000E+01	9.8637529E-01
7	1	1.6039568E+01	1.6800000E+01	7.5043189E-01
8	1	1.3705734E+01	1.4200000E+01	4.9426648E-01
9	1	1.2337481E+01	1.0800000E+01	-1.5374811E+00
10	1	8.5747179E+00	6.2000000E+00	-2.3747179E+00
11	1	7.6547134E+00	5.4000000E+00	-2.2547134E+00
12	1	5.8634708E+00	4.2000000E+00	-1.6634708E+00
13	1	4.2230510E+00	5.2000000E+00	9.7694901E-01
14	1	3.6921760E+00	4.4000000E+00	7.0782398E-01
15	1	2.6539549E+00	5.1000000E+00	2.4460151E+00
16	1	2.1732938E+00	3.9000000E+00	1.7267062E+00
17	1	1.5975595E+00	2.0000000E+00	3.0233053E-01
18	1	1.2747518E+00	1.6000000E+00	3.2524819E-01
19	1	1.0465564E+00	7.0000000E-01	-1.4686636E-01
20	1	9.3846655E-01	1.2000000E+00	2.6153335E-01
21	1	8.2953609E-01	1.4000000E+00	5.7046391E-01
22	1	8.9687622E-01	1.4000000E+00	5.0312379E-01
23	1	9.6101270E-01	1.4000000E+00	4.3898730E-01
24	1	1.0776475E+00	1.3000000E+00	2.2235250E-01
25	1	1.3180980E+00	1.2000000E+00	-1.1809797E-01
26	1	1.7367616E+00	1.2000000E+00	-5.5675158E-01
27	1	1.9545713E+00	1.2000000E+00	-7.5457128E-01
28	1	2.5497414E+00	2.0000000E+00	-6.4994144E-01
29	1	3.4847978E+00	3.0000000E+00	-4.8479777E-01
30	1	4.3273915E+00	3.8000000E+00	-5.2789149E-01
31	1	6.6125331E+00	5.4000000E+00	-1.2125331E+00
32	1	9.3564320E+00	5.8000000E+00	-5.5643201E-01

Tabelle 11 (Fortsetzung)

Meßpunkt 2

Einheit der Abweichung (residual) = 1,06°C

FINAL FUNCTION VALUES AND RESIDUALS

ROOT MEAN SQUARE RESIDUAL = 8.3195290E-01 D.F. = 28
THIS IS THE SCALE UNIT IN THE GRAPH OF THE RESIDUALS.

CASE	VAR	PREDICTION	OBSERVATION	RESIDUAL
1	1	1.4747398E+01	1.5100000E+01	3.5250214E-01
2	1	1.4829165E+01	1.5100000E+01	2.7183534E-01
3	1	1.4901324E+01	1.5400000E+01	4.9867557E-01
4	1	1.4995614E+01	1.5500000E+01	5.0338629E-01
5	1	1.5164314E+01	1.6100000E+01	9.3568583E-01
6	1	1.5185838E+01	1.6000000E+01	8.1416162E-01
7	1	1.3386171E+01	1.3700000E+01	3.1382908E-01
8	1	1.2234743E+01	1.1100000E+01	-1.1347427E+00
9	1	8.9617878E+00	7.0000000E+00	-1.9617878E+00
10	1	9.1434705E+00	6.3000000E+00	-1.8434705E+00
11	1	6.5302349E+00	5.5000000E+00	-1.0302349E+00
12	1	5.0255380E+00	5.8000000E+00	7.7436203E-01
13	1	4.5314683E+00	5.3000000E+00	7.6853175E-01
14	1	3.5502030E+00	4.9000000E+00	1.3497970E+00
15	1	3.0861889E+00	3.7000000E+00	6.1381107E-01
16	1	2.6163675E+00	2.8000000E+00	1.8313248E-01
17	1	2.1837141E+00	2.5000000E+00	3.1628591E-01
18	1	1.9353494E+00	2.2000000E+00	2.6415056E-01
19	1	1.8083075E+00	2.0000000E+00	1.9119247E-01
20	1	1.6490315E+00	2.2000000E+00	5.5096852E-01
21	1	1.5294576E+00	2.2000000E+00	5.7054242E-01
22	1	1.6627477E+00	2.1000000E+00	4.3720226E-01
23	1	1.7352134E+00	2.0000000E+00	2.6478660E-01
24	1	1.9030013E+00	2.0000000E+00	9.6998718E-02
25	1	2.2341829E+00	2.0000000E+00	-2.3418293E-01
26	1	2.3889325E+00	1.9000000E+00	-4.8893247E-01
27	1	2.9475408E+00	2.2000000E+00	-7.4764081E-01
28	1	3.5371933E+00	3.4000000E+00	-2.3719326E-01
29	1	4.3465835E+00	3.8000000E+00	-5.4668354E-01
30	1	6.3125035E+00	5.4000000E+00	-9.1250347E-01
31	1	8.7345653E+00	7.8000000E+00	-9.3456534E-01

Tabelle 12 (Fortsetzung)

Auszug aus SPSS-Nonlinear.

Graphische Darstellung der Abweichung für alle Meßwerte
der Meßpunkte 1 und 2

Meßpunkt 1 Einheit der Abweichung (residual) = 1,08°C

GRAPH OF RESIDUALS

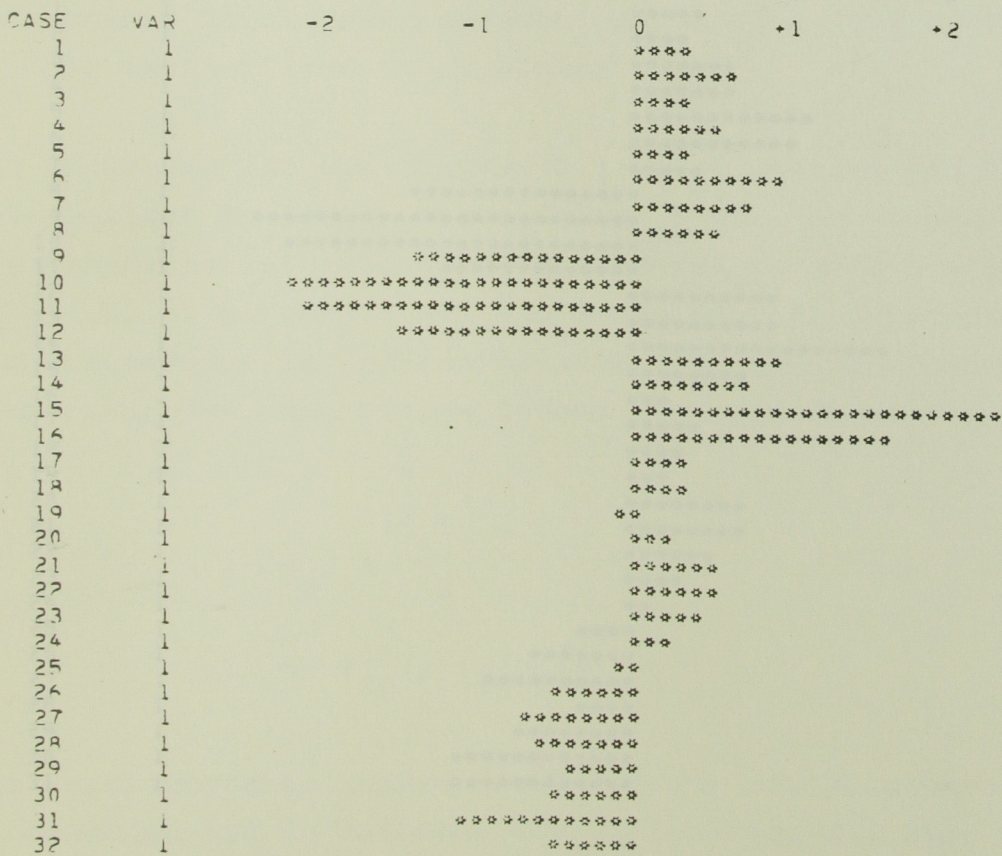
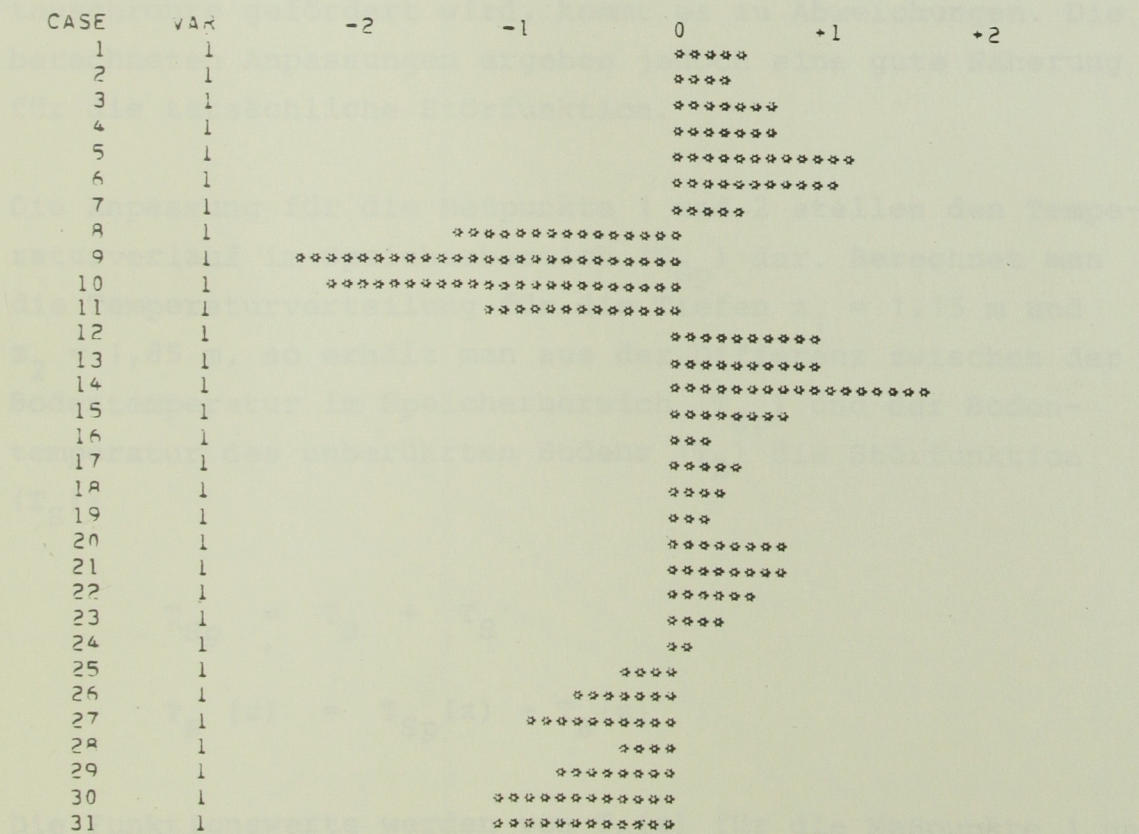


Tabelle 12 (Fortsetzung)

Meßpunkt 2 Einheit der Abweichung (residual) = 0,83°C

GRAPH OF RESIDUALS



Für s' (Standardabweichung nach der Gl. (8)) ergeben sich höhere Werte als für die Meßpunkte 3 und 4:

$$s'_1 = 1,08^{\circ}\text{C}$$

$$s'_2 = 0,83^{\circ}\text{C}$$

Die größere Abweichung liegt daran, daß die Störfunktion idealisiert dargestellt wird. Der sinus-förmige Verlauf der Störfunktion entspricht nicht vollständig den Meßwerten. Durch den unregelmäßigen Volumensstrom, der durch die Wärmetauschrohre gefördert wird, kommt es zu Abweichungen. Die berechneten Anpassungen ergeben jedoch eine gute Näherung für die tatsächliche Störfunktion.

Die Anpassung für die Meßpunkte 1 und 2 stellen den Temperaturverlauf im Speicherbereich (T_{Sp}) dar. Berechnet man die Temperaturverteilung für die Tiefen $z_1 = 1,15$ m und $z_2 = 1,85$ m, so erhält man aus der Differenz zwischen der Bodentemperatur im Speicherbereich (T_{Sp}) und der Bodentemperatur des unberührten Bodens (T_B) die Störfunktion (T_S):

$$T_{Sp} = T_B + T_S$$

$$T_S(z) = T_{Sp}(z) - T_B(z)$$

Die Funktionswerte werden von $T_S(z)$ für die Meßpunkte 1 und 2 berechnet und in der Abb. 17 als Funktion der Zeit dargestellt.

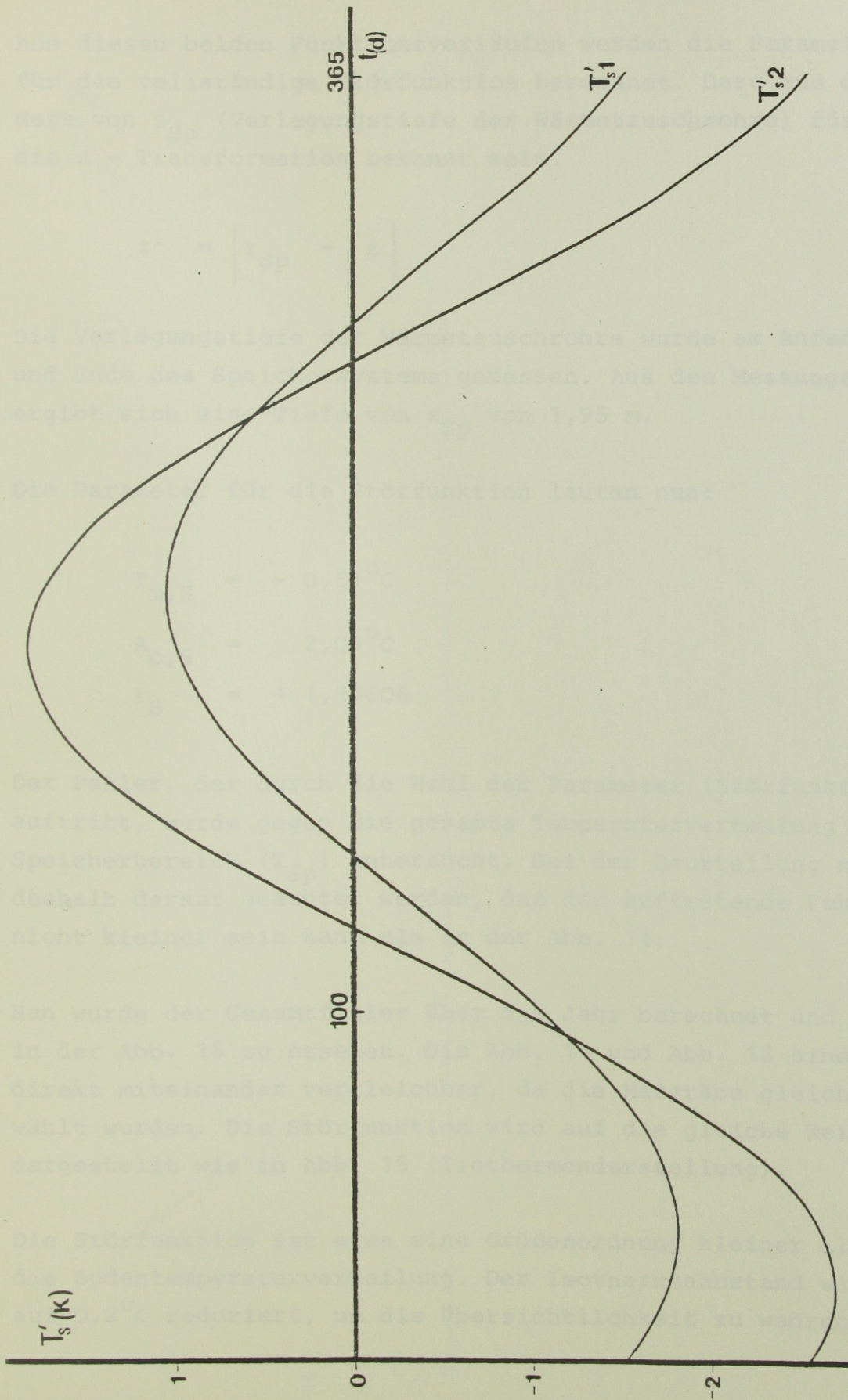


Abb. 17: Störfunktion. Verlauf der Störfunktion für die Meßpunkte 1 und 2, berechnet aus der Anpassung für beide Meßpunkte und der Temperaturverteilung $T(z,t)$. $T'_{S,i} = T_i - T(z,t)$, $i = 1,2$

Aus diesen beiden Funktionsverläufen werden die Parameter für die vollständige Störfunktion berechnet. Dazu muß der Wert von z_{Sp} (Verlegungstiefe der Wärmetauschrohre) für die z - Transformation bekannt sein.

$$z' = \left| z_{Sp} - z \right|$$

Die Verlegungstiefe der Wärmetauschrohre wurde am Anfang und Ende des Speichersystems gemessen. Aus den Messungen ergibt sich eine Tiefe von z_{Sp} von 1,95 m.

Die Parameter für die Störfunktion lauten nun:

$$T_{m,S} = - 0,51^{\circ}\text{C}$$

$$A_{o,S} = 2,09^{\circ}\text{C}$$

$$\epsilon_S = + 1,94606$$

Der Fehler, der durch die Wahl der Parameter (Störfunktion) auftritt, wurde gegen die gesamte Temperaturverteilung im Speicherbereich (T_{Sp}) untersucht. Bei der Beurteilung muß deshalb darauf geachtet werden, daß der auftretende Fehler nicht kleiner sein kann als in der Abb. 14.

Nun wurde der Gesamtfehler über das Jahr berechnet und ist in der Abb. 18 zu sehen. Die Abb. 14 und Abb. 18 sind direkt miteinander vergleichbar, da die Maßstäbe gleich gewählt wurden. Die Störfunktion wird auf die gleiche Weise dargestellt wie in Abb. 15 (Isothermendarstellung).

Die Störfunktion ist etwa eine Größenordnung kleiner als die Bodentemperaturverteilung. Der Isothermenabstand wird auf $0,2^{\circ}\text{C}$ reduziert, um die Übersichtlichkeit zu wahren.

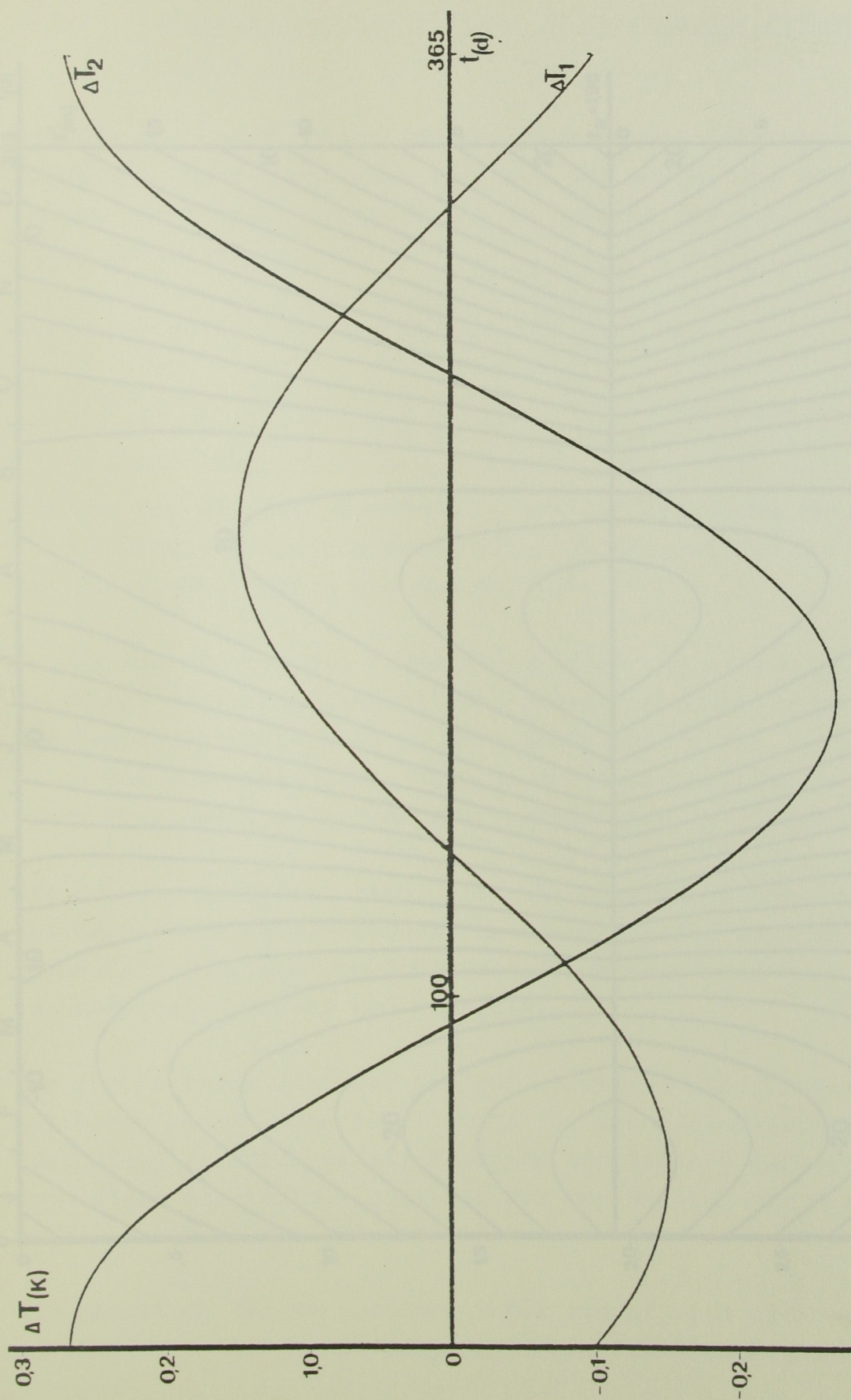


Abb. 18: Fehlerfunktion. Abweichung der Anpassungen für die Meßpunkte 1 und 2 von der Temperaturverteilung im Speicherbereich $T_{Sp}(z, t) \cdot \Delta T_i = T_{Sp} - T_i$, $i = 1, 2$

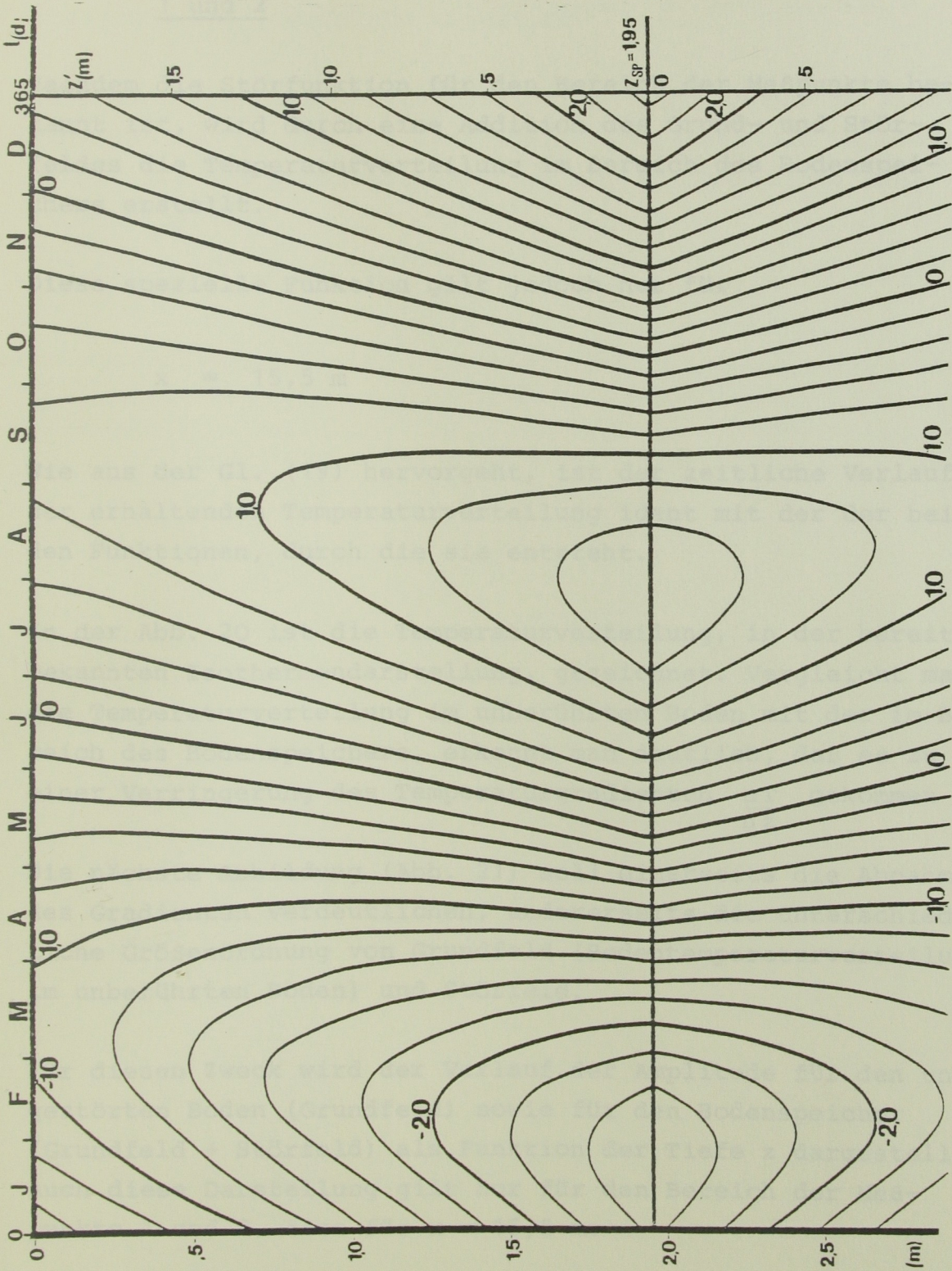


Abb. 19: Störfunktion. Isothermendarstellung der räumlichen und zeitlichen Veränderung. Berechnet aus den Meßpunkten 1 und 2 sowie der Bodentemperatur T_B .

5.3.2 Bodentemperaturverteilung im Bereich der Meßpunkte 1 und 2

Nachdem die Störfunktion für den Bereich der Meßpunkte bekannt ist, wird durch eine Addition des Grund- und Störfeldes die Temperaturverteilung im Bereich des Bodenspeichers erstellt.

Diese spezielle Funktion gilt jedoch nur für

$$x = 15,5 \text{ m}$$

Wie aus der Gl. (19) hervorgeht, ist der zeitliche Verlauf der erhaltenden Temperaturverteilung ident mit der der beiden Funktionen, durch die sie entsteht.

In der Abb. 20 ist die Temperaturverteilung, in der bereits bekannten Isothermendarstellung, gezeichnet. Vergleicht man die Temperaturverteilung im unberührten Boden mit der im Bereich des Bodenspeichers, erkennt man deutlich, daß es zu einer Verringerung des Temperaturgradienten $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ gekommen ist.

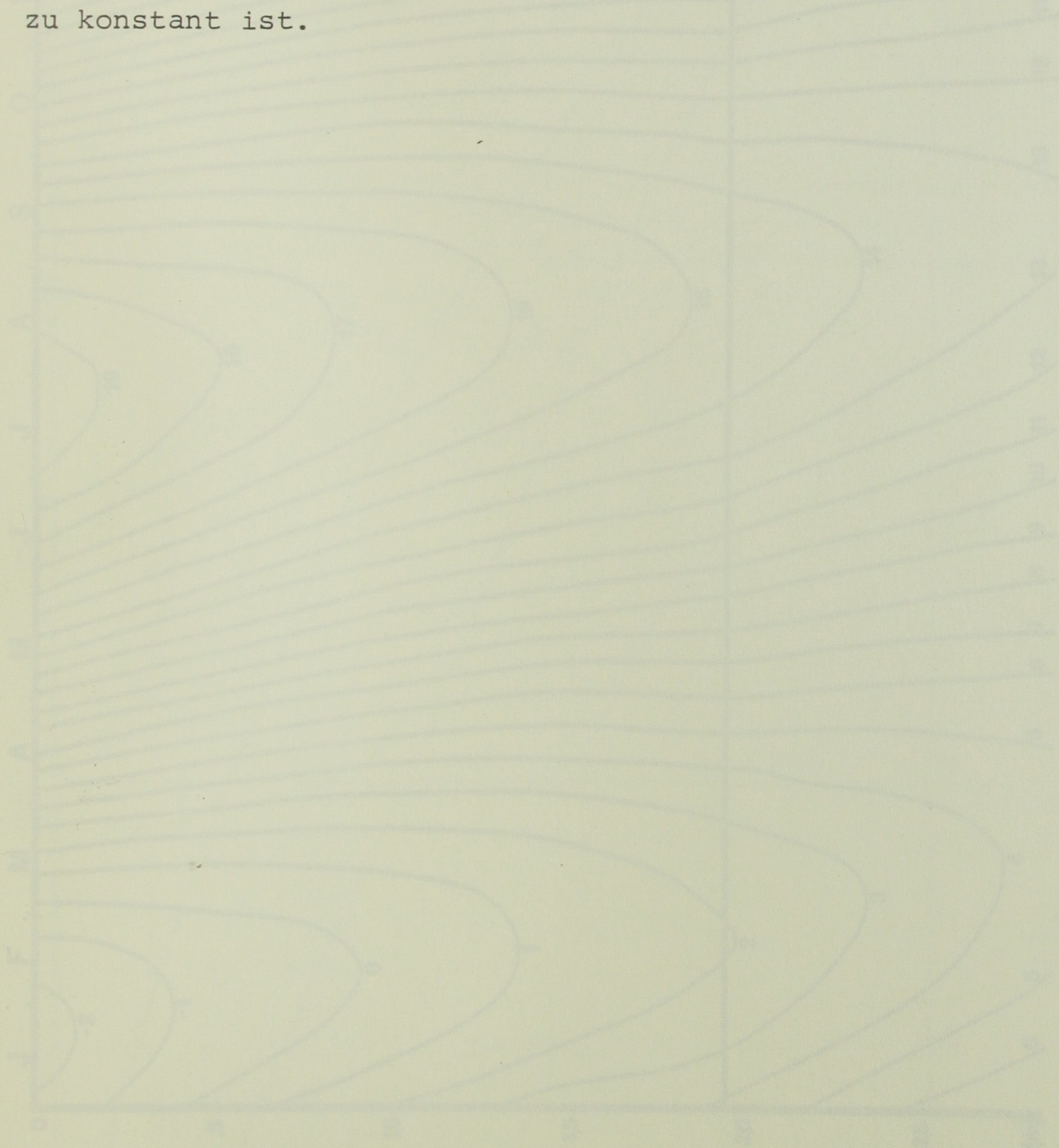
Die nächste Abbildung (Abb. 21) soll einerseits die Abnahme des Gradienten verdeutlichen, andererseits die unterschiedliche Größenordnung von Grundfeld (Bodentemperaturverteilung im unberührten Boden) und Störfeld.

Für diesen Zweck wird der Verlauf der Amplitude für den ungestörten Boden (Grundfeld) sowie für den Bodenspeicher (Grundfeld + Störfeld) als Funktion der Tiefe z dargestellt. Auch diese Darstellung gilt nur für den Bereich der Meßpunkte 1 und 2, also für $x = 15,5 \text{ m}$.

Die Amplitude für den Bodenspeicher ergibt sich nicht aus der Addition der beiden ursprünglichen Funktionen, da diese

zueinander phasenverschoben sind. Die Berechnung für die Amplitude (A_{Sp}) erfolgte numerisch.

Vergleicht man den Verlauf der beiden Amplituden, so sieht man, daß der Betrag der Störfunktion zwischen der Verlegungstiefe des Bodenspeichers und der Erdoberfläche nahezu konstant ist.



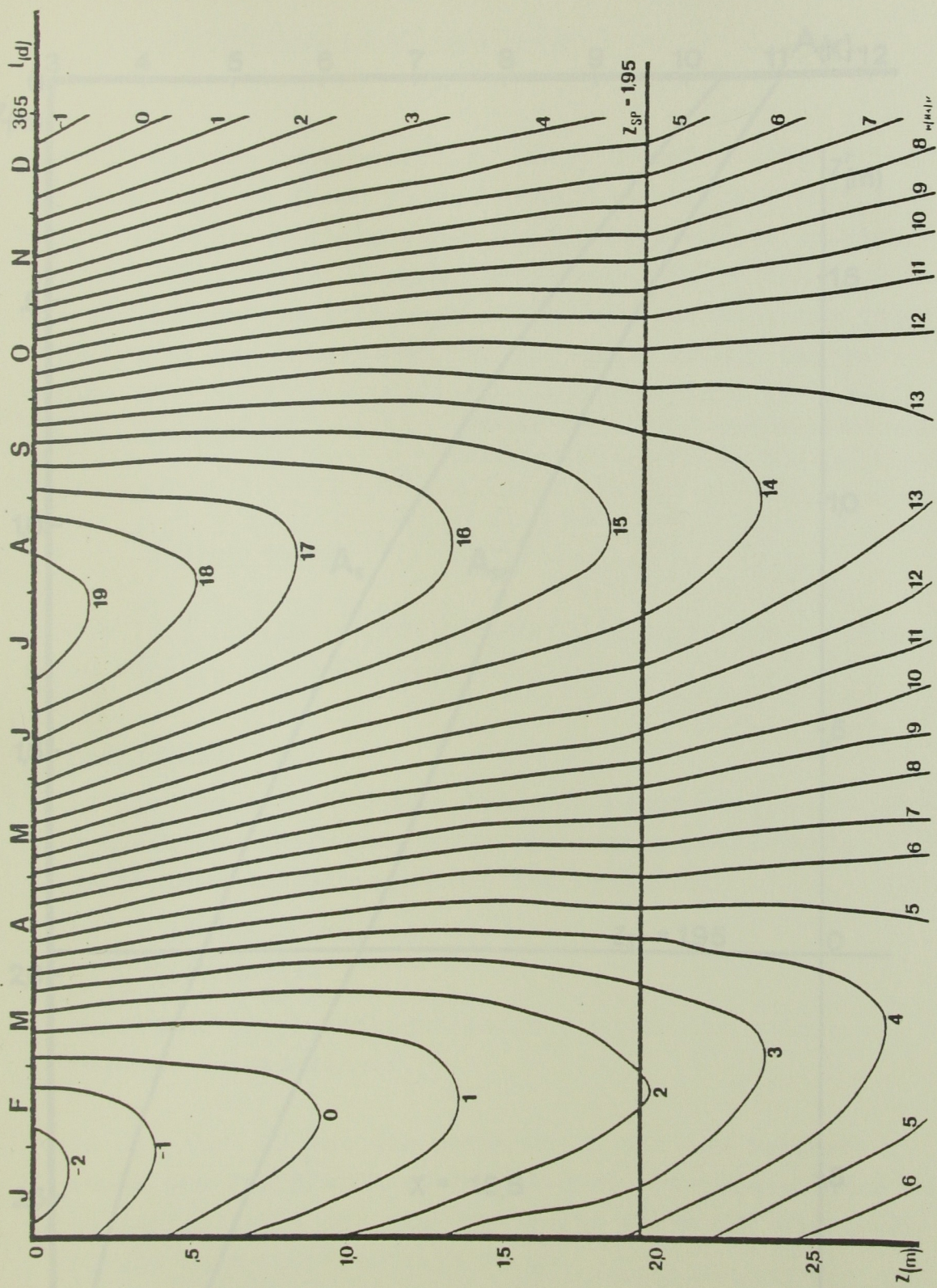


Abb. 20: Bodentemperaturverteilung im Speicherbereich. Isothermendarstellung der räumlichen und zeitlichen Veränderung. Berechnet aus der Störfunktion T_{SP} und T_B .

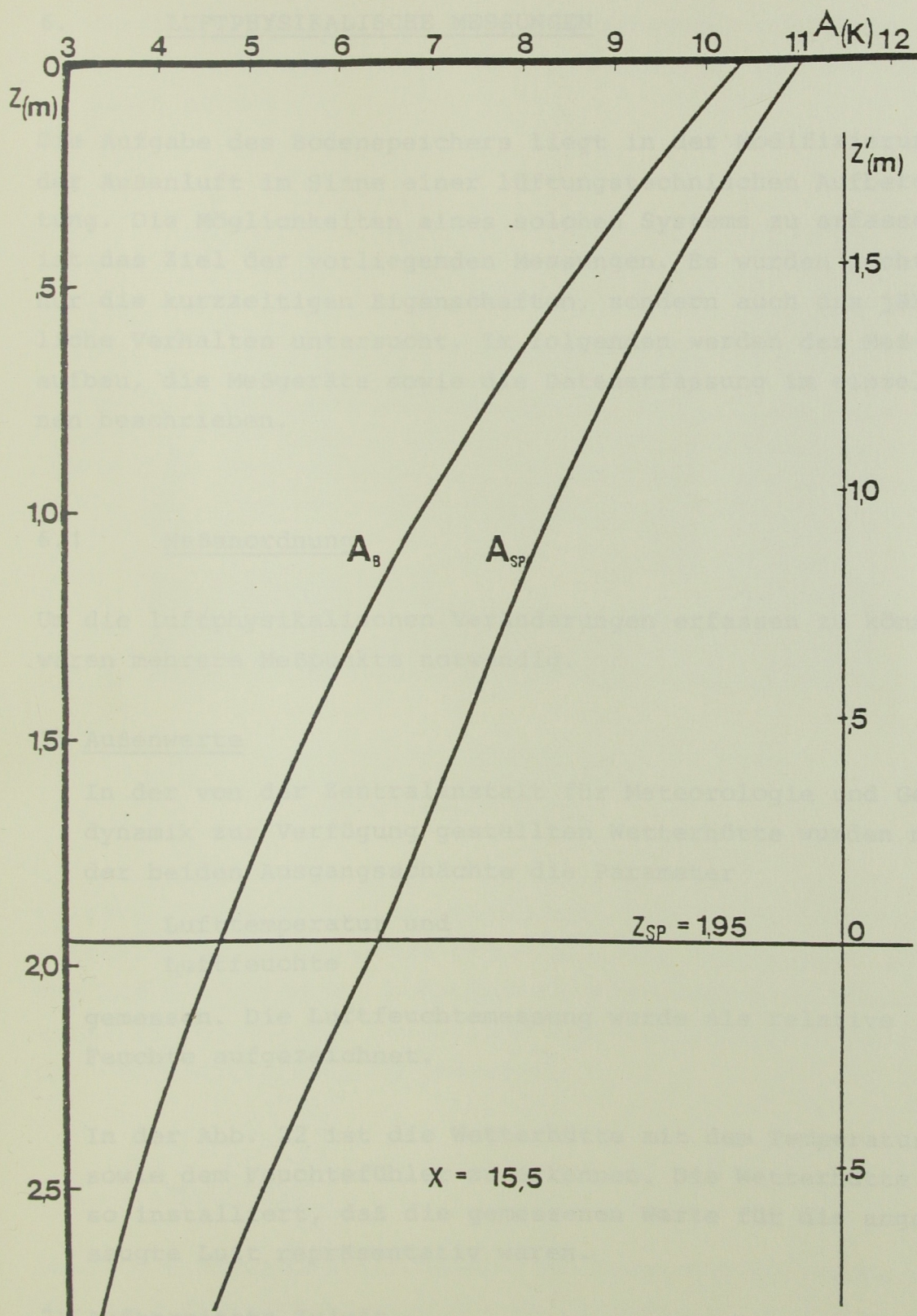


Abb. 21: Amplitudenverlauf mit der Tiefe z für Bodentemperatur T_B und die Bodentemperatur im Speicherbereich T_{SP} ($x = 15,5$ m).

6. LUFTPHYSIKALISCHE MESSUNGEN

Die Aufgabe des Bodenspeichers liegt in der Modifizierung der Außenluft im Sinne einer Lüftungstechnischen Aufbereitung. Die Möglichkeiten eines solchen Systems zu erfassen ist das Ziel der vorliegenden Messungen. Es wurden nicht nur die kurzzeitigen Eigenschaften, sondern auch das jährliche Verhalten untersucht. Im folgenden werden der Meßaufbau, die Meßgeräte sowie die Datenerfassung im einzelnen beschrieben.

6.1 Meßanordnung

Um die luftphysikalischen Veränderungen erfassen zu können, waren mehrere Meßpunkte notwendig.

1) Außenwerte

In der von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik zur Verfügung gestellten Wetterhütte wurden nahe der beiden Ausgangsschächte die Parameter

Lufttemperatur und
Luftfeuchte

gemessen. Die Luftfeuchtemessung wurde als relative Feuchte aufgezeichnet.

In der Abb. 22 ist die Wetterhütte mit dem Temperatur- sowie dem Feuchtefühler zu erkennen. Die Wetterhütte wurde so installiert, daß die gemessenen Werte für die angesaugte Luft repräsentativ waren.

2) Aufbereitete Zuluft

Der zweite Meßpunkt erfaßte die gleichen Parameter wie

der Meßpunkt 1 (Außenluft). Die Messungen erfolgten nach dem Sammelkanal bzw. in der Vorkammer, in die der Sammelkanal mündet.

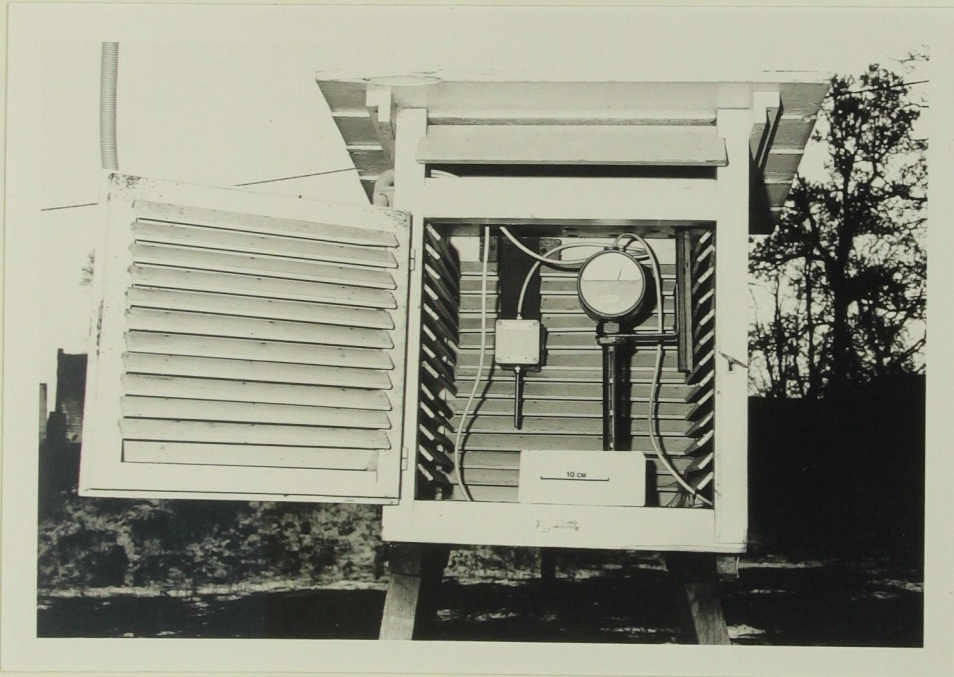


Abb. 22: Wetterhütte. Meßpunkt für die Außenwerte
(links: Temperaturfühler,
rechts: Feuchtefühler)

Weiters wurden in beiden Stallräumen auch beide Parameter erfaßt. Doch wurden diese Meßwerte nicht ausgewertet. Um die Energiebilanz des Bodenspeichers berechnen zu können, wurde in der zweiten Meßperiode auch die Luftmenge über die Ventilatorsteuerung gemessen.

6.2 Meßgeräte

Durch die unterschiedliche Art der Meßwertaufzeichnung ergab sich eine Zweiteilung der Meßperiode.

Während in der ersten Periode die Meßwerterfassung mit herkömmlichen Wochenschreibern durchgeführt wurde, stand in

der zweiten Periode ein elektronisches Registriergerät zur Verfügung. Dadurch bestand auch die Möglichkeit, zusätzlich die Luftmengen, die durch den Bodenspeicher geführt werden, zu registrieren.

Das thermische Verhalten der Luft in den Wärmetauschrohren wurde kurzfristig mit Hilfe eines 6-Kanal-Punktdruckers aufgezeichnet, wobei als Temperaturfühler gewickelte Widerstandsthermometer dienten (Pt 100).

Eine Verbesserung der Registrierung stellte die Umstellung von Wochenschreiber (Thermo-Hygrographen) auf einen 6-Kanal-Punktdrucker dar.

Technische Daten der Wochenschreiber:

Vorschub (Registrierpapier): 1,6 mm / h

Skalenteilung: Hygrograph: 0,88 mm / % (in Skalenmitte)
nicht linear

Thermograph: 1,03 mm/ K linear

Durch die Montage des 6-Kanal-Punktdruckers der Fa. Schenk konnte nicht nur die Kontinuität der Messung erhöht werden, sondern auch das Auflösungsvermögen.

Vergleicht man die technischen Daten der beiden Registrierungssysteme (Wochenschreiber - Punktdrucker), so war eine Vergrößerung der zeitlichen Auflösung um etwa den Faktor 12,5 zu erreichen.

Die Temperatur- bzw. Feuchteskala konnte nicht wesentlich gedehnt werden, doch war ein Auflösungsvermögen von 0,5 K für die geforderte Meßgenauigkeit ausreichend.

Eine wesentliche Verbesserung war die Aufzeichnung der Luftmenge über ein kodiertes Signal am gleichen Registrierungssystem. Dadurch wurde die Auswertung der Registrierung we-

sentlich vereinfacht.

Technische Daten des 6-Kanal-Punktdruckers:

Drehspulmeßwerk

Vorschub: 20 mm / h

Skalenteilung: (abhängig vom Meßbereich)

Meßbereich 1: (-10°C - 50°C) 2 mm / K

Meßbereich 2: (-30°C - 30°C) 2 mm / K

Meßbereich 3: (10°C - 40°C) 4 mm / K

Meßbereich 4: (-5°C - 25°C) 4 mm / K

Meßbereich 5: (10 % - 100 %) 1,33 mm / %

Durch die Konzeption des Meßgerätes (Drehspule) war keine Skala linear. Da jedoch keine maschinelle Auswertung vorgesehen war, konnte dieser Mangel in Kauf genommen werden.

Punktefolge: 20 s

Diese Punktefolge von 2 min je Kanal entsprach nahezu einer kontinuierlichen Messung (1 Punkt / 0,67 mm).

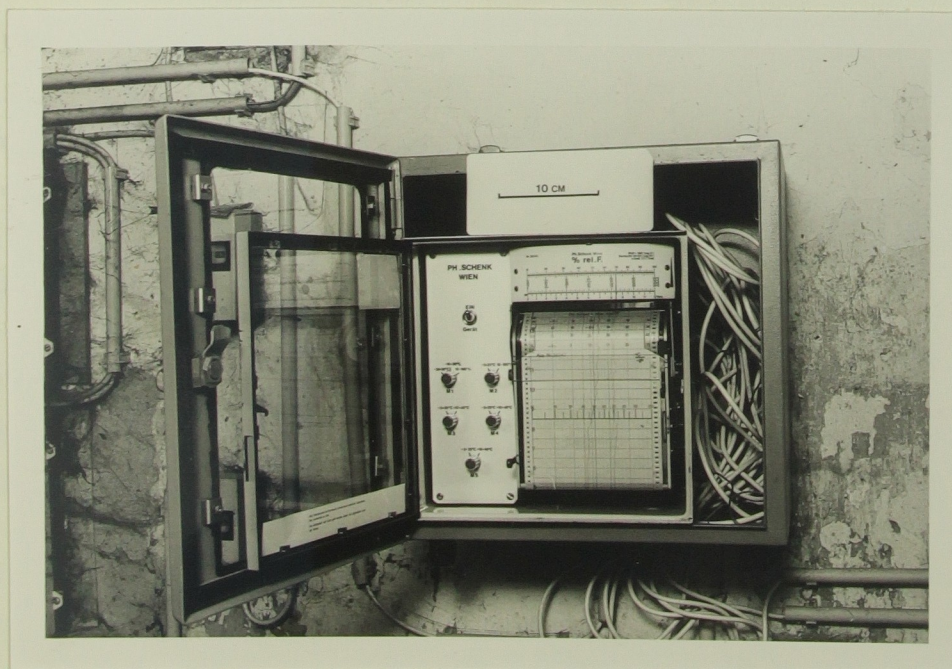


Abb. 23: 6-Kanal-Punktdrucker

Die Abb. 23 zeigt den in der zweiten Meßperiode verwendeten 6-Kanal-Punktendrucker. Die Montage erfolgte in der Vorkammer, von wo die Verteilung der Zuluft in die beiden Stallräume durchgeführt wird. Als Meßfühler für dieses Gerät wurden für die Temperaturregistrierung herkömmliche Widerstandsthermometer verwendet.

Die Feuchteregistrierung wurde mit einem Pernix-Hygrometer durchgeführt.

Beide Meßfühler sind in der Abb. 22 (Wetterhütte) zu sehen.

Die Steuerung der Zuluftmenge für beide Stallräume erfolgte über einen 3-Punkte-Thermostat. Über ein kodiertes Spannungssignal wird die geförderte Luftmenge an einem Kanal registriert. Dadurch konnte die Zuluftmenge für jeden Stallraum separat ausgewertet werden.

6.3 Prüfung der Meßpunkte

Um beurteilen zu können, ob die Wahl der Meßpunkte repräsentative Ergebnisse für die angeführten Parameter ergeben, wurde eine Kontrollmessung durchgeführt. Für die Durchführung der Kontrolle wurde nur die Lufttemperatur herangezogen, da dieser Wert mit den vorhandenen Mitteln leichter erfaßbar war.

Darüber hinaus wirken sich Ungenauigkeiten bei der Temperaturmessung bei der Berechnung des Energieinhaltes der Luft stärker aus, als Fehler der Luftfeuchtheitsmessung.

Als Meßfühler wurden Widerstandsthermometer verwendet, die frei gewickelte Platindrähte besitzen.

Die Kontrolle wurde für beide Meßpunkte durchgeführt.

1) Außentemperatur

Für diesen Meßpunkt mußte gesichert werden, daß die in der Wetterhütte gemessenen Parameter denen der angesaugten Luftmasse entsprachen. Die Wetterhütte hatte einen Abstand von 2 m vom Erdboden, während die Ausgangschächte (A bzw. B) die Luft in etwa 0,5 m angesaugt haben.

Es wurde die Lufttemperatur von 3 Meßstellen miteinander verglichen

- a) Wetterhütte
- b) Ansaugschacht A
- c) Ansaugschacht B

Die Abb. 24 zeigt den Verlauf der Temperaturregistrierung dieser 3 Meßstellen. Es ist zu erkennen, daß die Abweichung der Temperatur zwischen den beiden Ansaugschächten und der Wetterhütte gering war. So hat sich gezeigt, daß die Abweichung im Mittel etwa $0,5^{\circ}\text{C}$ betragen hat. Bei dieser Meßperiode (August 1980) kam es zu einer Unterbewertung der Außenlufttemperatur.

2) Speichertemperatur

Die Kontrolle dieser Parameter war umfangreicher, da weit mehr Fehlermöglichkeiten bestanden.

Erstens war zu prüfen, ob die einzelnen Wärmetauschrohre ein thermisch-homogenes Verhalten haben. Durch Messung der Temperatur am Ende von zwei zufällig ausgewählten Wärmetauschrohren, konnte gezeigt werden, daß die Vereinfachung der Berechnung auf nur eine horizontale Ortskoordinate (homogenes Verhalten der Wärmetauschrohre) sinnvoll und möglich ist (Abb. 24).

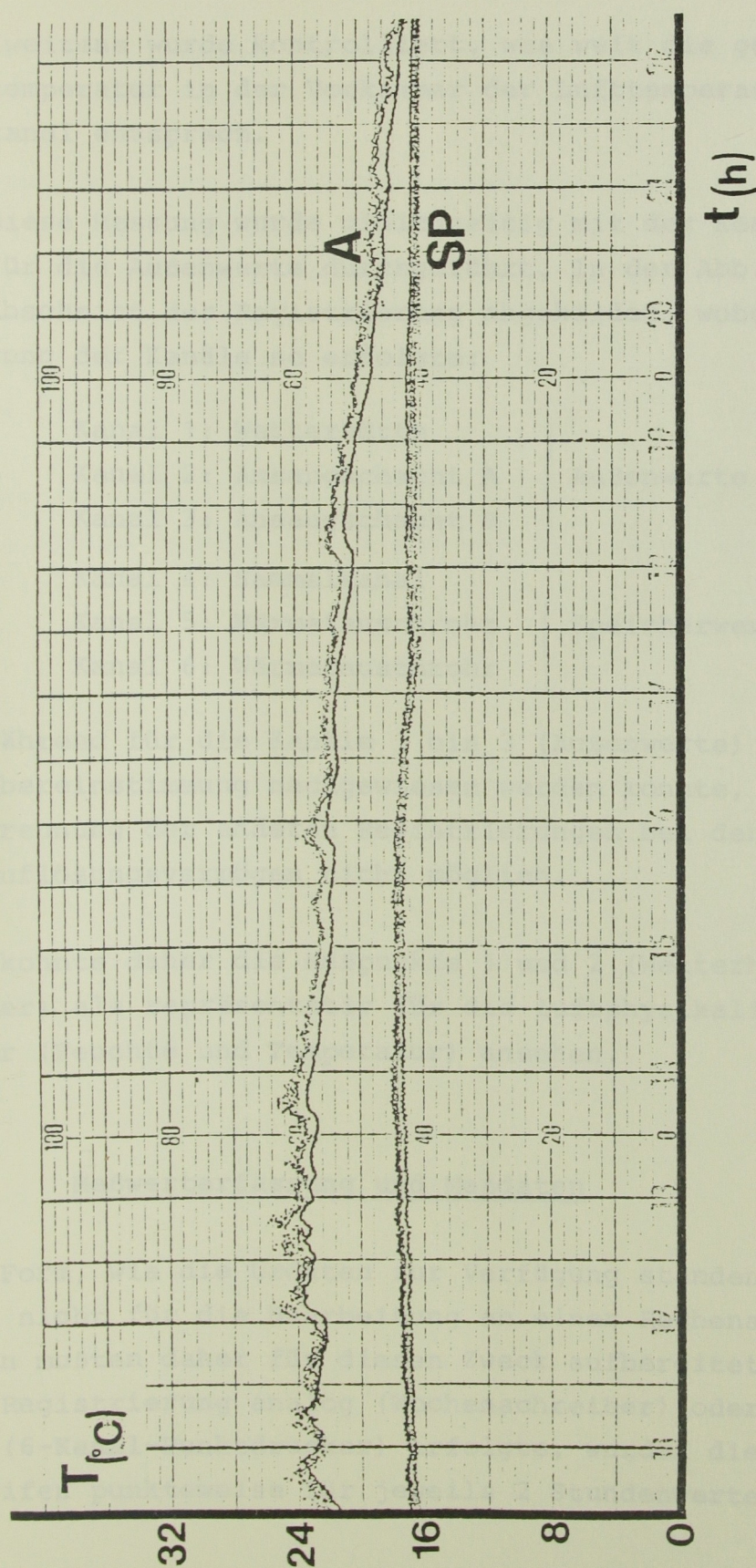


Abb. 24: Kontrollmessung A (Außenwerte), SP (Speicherwerte)

Zweitens wurde kontrolliert, wie weit die gemessene Lufttemperatur in der Vorkammer der Lufttemperatur im Sammelkanal entsprach.

Diese Messung wurde gleichzeitig mit der Kontrollmessung für die Außenwerte durchgeführt. In der Abb. 24 ist ein Abschnitt der Registrierung abgebildet, wobei die Belegung der Kanäle so erfolgte:

Kanal 1: Wetterhütte	}	Außenwerte
Kanal 2: Ansaugschacht A		
Kanal 3: Ansaugschacht B		
Kanal 4: Sammelkanal	}	Speicherwerte
Kanal 5: Wärmetauschröhr		
Kanal 6: Wärmetauschröhr		

Während für die Kanäle 1 bis 3 (Außenwerte) keine völlige Übereinstimmung nachgewiesen werden konnte, war eine Trennung der anderen Registrierungen bei den gegebenen Auflösungsvermögen nicht möglich.

Man konnte daher die Meßpunkte 1 und 2 (Wetterhütte, Vorkammer) als repräsentativ für die luftphysikalischen Parameter (Feuchte und Temperatur) ansehen.

6.4 Meßwerterfassung und Meßdaten

Die Form, wie die Urdaten zur Verfügung standen, eignete sich nicht für die Bearbeitung an einer Rechenanlage. Die Daten mußten daher für diesen Zweck aufbereitet werden. Da die Registrierung analog (Wochenschreiber) oder nahezu analog (6-Kanal-Punktendrucker) erfolgte, wurden die Registrierstreifen punktweise für jeweils 2 Stundenwerte ausgewertet.

Die Urdaten standen für etwa 160 Tage zur Verfügung. Somit lagen für die Untersuchungen 1800 Einzelwerte vor.

Für langfristige Veränderungen war das zeitliche Auflösungsvermögen von 2 Stunden jedoch nicht erforderlich, sodaß aus dem vorhandenen Datenmaterial Tagesmittelwerte berechnet wurden. Die Auswertung aus den Urdaten erfolgte für die Temperatur mit einer Genauigkeit von 1°C und bei der relativen Feuchte von 1 %.

In den folgenden Tabellen ist jeweils ein Ausschnitt aus den 2 Stunden-Daten sowie aus den Tagesmittelwerten angeführt.

Tabelle 13

Auszug aus der Datenliste: Tagesmittelwert

V1, V2, V3 = Jahr, Monat, Tag; V4 = T_A^+ ; V5 = f_A ; V6 = T_{Sp}^+ ; V7 = f_{Sp} ; DAT = t

V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	DAT
79.	3.	16.	8.5	80.	3.6	93.	75.
79.	3.	17.	3.0	70.	2.5	87.	76.
79.	3.	18.	5.2	76.	2.6	88.	77.
79.	3.	19.	6.8	57.	3.0	84.	78.
79.	3.	20.	5.7	74.	2.7	85.	79.
79.	3.	21.	7.5	65.	3.0	86.	80.
79.	3.	22.	5.7	77.	2.8	84.	81.
79.	3.	24.	4.5	49.	2.8	67.	83.
79.	3.	25.	4.2	73.	2.6	77.	84.
79.	3.	26.	6.7	80.	3.6	93.	85.
79.	3.	27.	5.3		4.2	92.	86.
79.	3.	28.	8.0		3.9	91.	87.
79.	3.	29.	3.2		3.7	90.	88.
79.	3.	30.	1.0		3.0	81.	89.
79.	3.	31.	1.7		3.0	78.	90.
79.	4.	8.	1.7	82.	4.0	77.	98.
79.	4.	9.	2.2	81.	3.9	75.	99.
79.	4.	10.	5.4	80.	3.6	83.	100.
79.	4.	11.	7.1	65.	4.1	80.	101.
79.	4.	12.	7.8	69.	4.5	85.	102.
79.	4.	13.	9.9	66.		91.	103.
79.	4.	14.	8.0			82.	104.
79.	4.	15.	11.3	59.	5.5	85.	105.
79.	4.	16.	11.0	61.	5.6	85.	106.
79.	4.	17.	7.4	88.	5.6	94.	107.
79.	4.	18.	1.4	80.	4.3	74.	108.
79.	4.	19.	1.8	69.	4.0	61.	109.
79.	4.	20.	5.1	62.	4.4	63.	110.
79.	4.	21.	4.8	82.	5.0	80.	111.
79.	4.	22.	6.3	65.	5.3	76.	112.

Tabelle 14

Auszug aus der Datenliste: 2-Stundenwerte

V1, V2, V3 = Jahr, Monat, Tag; V4 = Uhrzeit; V5 = T_A^+ ; V6 = f_A ; V7 = T_{Sp}^+ ; V8 = f_{Sp} ; DAT = t

V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	DAT
79.	3.	16.	12.	13.0	65.	4.0	95.	75.
79.	3.	16.	14.	14.0	60.	4.0	93.	75.
79.	3.	16.	16.	13.0	75.	4.0	93.	75.
79.	3.	16.	18.	6.0	90.	4.0	93.	75.
79.	3.	16.	20.	3.0	95.	3.0	92.	75.
79.	3.	16.	22.	2.0	95.	3.0	92.	75.
79.	3.	17.	0	2.0	85.	3.0	92.	76.
79.	3.	17.	2.	2.0	80.	3.0	91.	76.
79.	3.	17.	4.	1.0	90.	3.0	91.	76.
79.	3.	17.	6.	1.0	80.	3.0	91.	76.
79.	3.	17.	8.	2.0	75.	3.0	90.	76.
79.	3.	17.	10.	4.0	55.	2.0	88.	76.
79.	3.	17.	12.	5.0	50.	2.0	83.	76.
79.	3.	17.	14.	6.0	45.	2.0	82.	76.
79.	3.	17.	16.	7.0	50.	2.0	81.	76.
79.	3.	17.	18.	3.0	70.	3.0	83.	76.
79.	3.	17.	20.	2.0	78.	2.0	84.	76.
79.	3.	17.	22.	1.0	80.	2.0	84.	76.
79.	3.	18.	0	2.0	76.	2.0	83.	77.
79.	3.	18.	2.	2.0	80.	2.0	84.	77.
79.	3.	18.	4.	1.0	90.	2.0	84.	77.
79.	3.	18.	6.	1.0	90.	2.0	84.	77.
79.	3.	18.	8.	5.0	63.	2.0	85.	77.
79.	3.	18.	10.	8.0	60.	3.0	85.	77.
79.	3.	18.	12.	9.0	55.	3.0	90.	77.
79.	3.	18.	14.	10.0	60.	3.0	90.	77.
79.	3.	18.	16.	9.0	70.	3.0	92.	77.
79.	3.	18.	18.	7.0	80.	3.0	93.	77.
79.	3.	18.	20.	5.0	90.	3.0	93.	77.
79.	3.	18.	22.	3.0	93.	3.0	92.	77.

7. LANGZEITVERHALTEN

Um an die bodenphysikalischen Ergebnisse des vorangegangenen Abschnittes anschließen zu können, wird vorerst das langfristige Verhalten des Bodenspeichers analysiert.

Für das langfristige Verhalten werden kurzperiodische (d.h. hochfrequente) Störungen (z.B. Tagesschwankungen) vernachlässigt. Die Daten werden wie durch einen Tiefpaßfilter betrachtet, wodurch der dominierende Anteil - die Jahreschwankungen - betrachtet werden kann.

Anhand der luftphysikalischen Werte, die für die Anlage vorhanden sind, wird das jährliche Verhalten nicht nur der Luftaufbereitung selbst, sondern auch der Speichermasse untersucht. Anschließend daran wird die Wechselbeziehung zwischen Luft und Boden diskutiert.

7.1 Luftphysik

Die Untersuchungen der Luftphysik, die sich mit dem jährlichen Verhalten befassen, wird ähnlich denen der Bodentemperaturmessungen durchgeführt. Das hat vor allem den Vorteil, daß Ähnlichkeiten leichter festzustellen waren.

Die Meßreihen der luftphysikalischen Parameter sind nicht vollständig über das Jahr vorhanden, daher werden wieder Funktionsanpassungen durchgeführt.

Die Funktionen, an die die Meßwerte angepaßt werden, hatten die Form der Gl. (7).

$$T_i^+(t) = T_{m,i}^+ + A_i^+ \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t + \varphi_i^+ \right) \quad (22)$$

i Index für den Meßpunkt
i = A Außenwert
i = S_p ... Speicherwert
T_m⁺ ... mittlere, jährliche Lufttemperatur [°C]
A⁺ ... Amplitude [°C]
τ Periode (365 Tage) [d]
φ⁺ ... Phasenverschiebung [rad]
t Zeit (1,2,3 ... 365 Tage) [d]

Für diese Untersuchung werden Perioden mit einer Periodendauer von weniger als einem Jahr (365 Tage) nicht berücksichtigt.

Die Anpassung selbst wird wieder mit der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt (SPSS-Subprogram-Nonlinear, 1977).

Bei der Berechnung mußten die einzelnen Parameter, für die die Anpassung durchgeführt wird, anders bezeichnet werden. Sie lauten:

$$B(1) = T_m^+$$

$$B(2) = A^+$$

$$B(3) = \varphi^+$$

Um den direkten Vergleich Luft - Boden zu ermöglichen, wird die Zeitachse so gewählt, daß der 0-Punkt auf den ersten Jänner fällt.

Auf einen Auszug aus den Computerausdrucken muß verzichtet werden, da sie für diese Anpassung sehr umfangreich waren.

Die Anzahl der Stützstellen ist bei dieser Anpassung etwa 5 mal größer als bei der Bodentemperatur.

In den folgenden Tabellen werden lediglich die Ergebnisse der Anpassung für Außentemperatur T_A^+ und die Speichertemperatur T_{Sp}^+ zusammengefaßt. Die Vertrauensgrenze (confidence limits) liegt bei 95 %, wieder unter der Annahme, daß die beiden anderen Parameter (B (1), B (2) oder B (3)) konstant sind (das entspricht wieder einer Irrtumswahrscheinlichkeit α von 0,05).

Für T_A^+ lauten die Ergebnisse für die drei angepaßten Parameter:

$$T_{m,A}^+ = (7,58 \pm 0,88) ^\circ\text{C}$$

$$A_A^+ = (-9,01 \pm 1,21) ^\circ\text{C}$$

$$\varphi_A^+ = 1,3586 \pm 0,0927 \hat{=} (78,9 \pm 5,4) \text{ d}$$

Für T_{Sp}^+ :

$$T_{m,Sp}^+ = (7,47 \pm 0,36) ^\circ\text{C}$$

$$A_{Sp}^+ = (-7,75 \pm 0,47) ^\circ\text{C}$$

$$\varphi_{Sp}^+ = 1,0430 \pm 0,0491 \hat{=} (60,6 \pm 2,9) \text{ d}$$

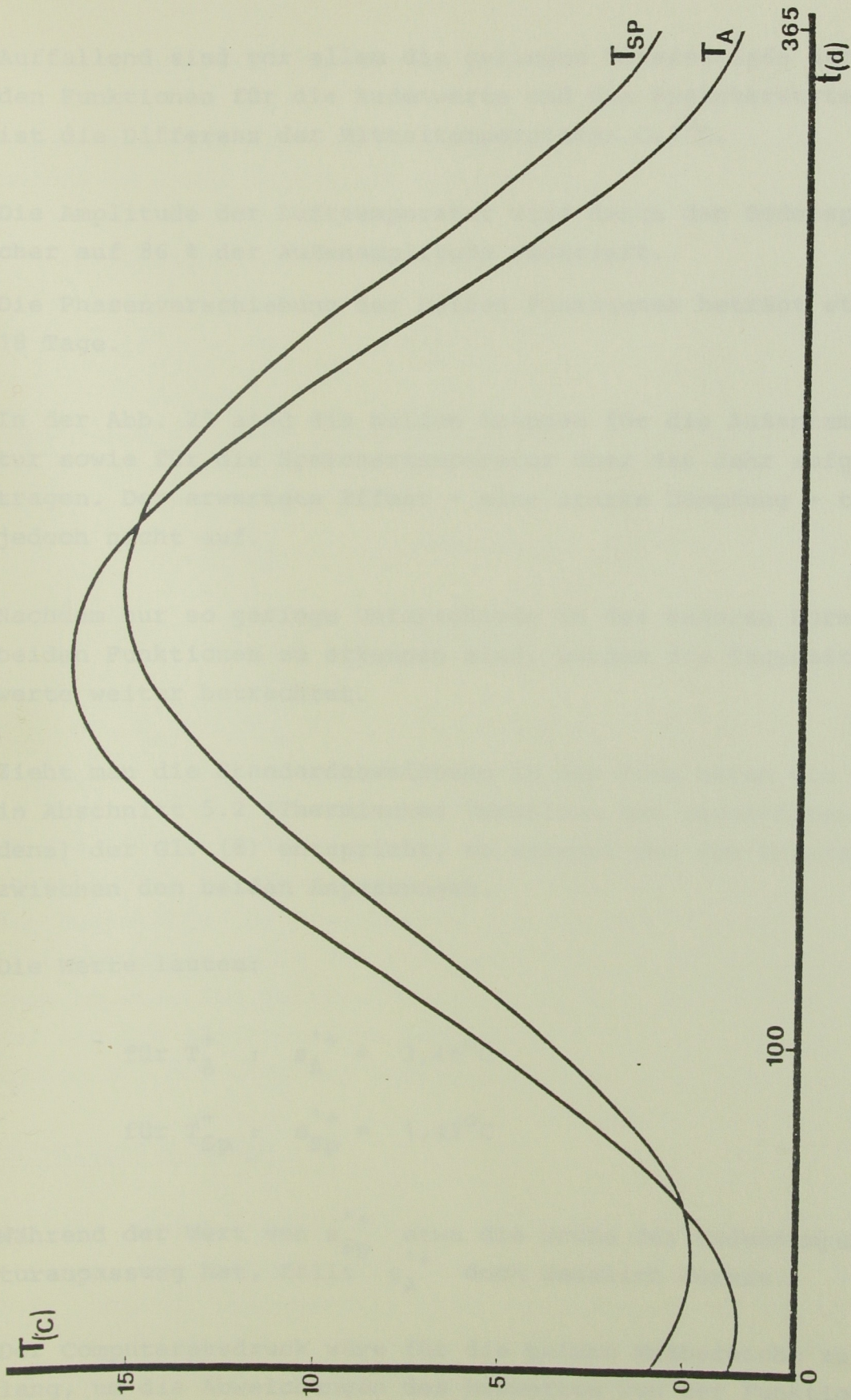


Abb. 25: Lufttemperatur. Anpassungsfunktion für den Außenwert T_A^+ und den Speicherwert T_{sp}^+

Auffallend sind vor allem die geringen Unterschiede der beiden Funktionen für die Außenwerte und die Speicherwerte. So ist die Differenz der Mitteltemperaturen $0,1^{\circ}\text{C}$.

Die Amplitude der Lufttemperatur wird durch den Bodenspeicher auf 86 % der Außenamplitude reduziert.

Die Phasenverschiebung der beiden Funktionen beträgt etwa 18 Tage.

In der Abb. 25 sind die beiden Graphen für die Außentemperatur sowie für die Speichertemperatur über das Jahr aufgetragen. Der erwartete Effekt - eine starke Dämpfung - tritt jedoch nicht auf.

Nachdem nur so geringe Unterschiede in der äußeren Form der beiden Funktionen zu erkennen sind, werden die Tagesmittewerte weiter betrachtet.

Zieht man die Standardabweichung in der Form heran wie sie in Abschnitt 5.2 (Thermisches Verhalten des ungestörten Bodens) der Gl. (8) entspricht, so erkennt man den Unterschied zwischen den beiden Anpassungen.

Die Werte lauten:

$$\text{für } T_A^+ : s_A'^+ = 3,46^{\circ}\text{C}$$

$$\text{für } T_{Sp}^+ : s_{Sp}'^+ = 1,42^{\circ}\text{C}$$

Während der Wert von $s_{Sp}'^+$ etwa die Größe der Bodentemperaturanpassung hat, fällt $s_A'^+$ doch deutlich heraus.

Der Computerausdruck wäre für die beiden Meßbereiche zu lang, um die Abweichungen des Meßwertes von der Funktion

darzustellen (vgl. Tab. 4 und Tab. 5).

Daher wird eine Häufigkeitsaufzählung für beide Meßbereiche in einem Histogramm dargestellt.

Die Abweichungen werden wie folgt formuliert:

$$\Delta T_A^+ = T_{A,M} - T_A^+(t) \quad (23)$$

$$\Delta T_{Sp}^+ = T_{Sp,M} - T_{Sp}^+(t)$$

$$\Delta T_A^+, \Delta T_{Sp}^+ \dots\dots\dots \text{Abweichung (residual)} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$T_{A,M}, T_{Sp,M} \dots\dots \text{Meßwerte (observation)} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$T_A(t), T_{Sp}(t) \dots \text{Funktionswert (prediction)} \quad [^\circ\text{C}]$$

In der Abb. 26 erkennt man die Unterschiede zwischen den Abweichungen der Außenwerte und der Speicherwerte. Während die Außenwerte (A) Abweichungen bis zu 10°C von der Funktion aufweisen, wird diese Differenz durch den Bodenspeicher um etwa den Faktor 3 verringert. Das läßt den Schluß zu, daß die Möglichkeiten des Bodenspeichers im wesentlichen bei der Dämpfung kurzperiodischer Störungen liegen.

ENERGIEBETRACHTUNG

Weiters wird der Energieumsatz durch den Bodenspeicher berechnet. Die Differenz zwischen dem Energieinhalt der Außenluft und der Speicherluft wird herangezogen, um die Wärmeab- bzw. Wärmeaufnahme zwischen Speichermasse und Luft zu berechnen. Für diese Abschätzung mußten weitere Annahmen getroffen werden.

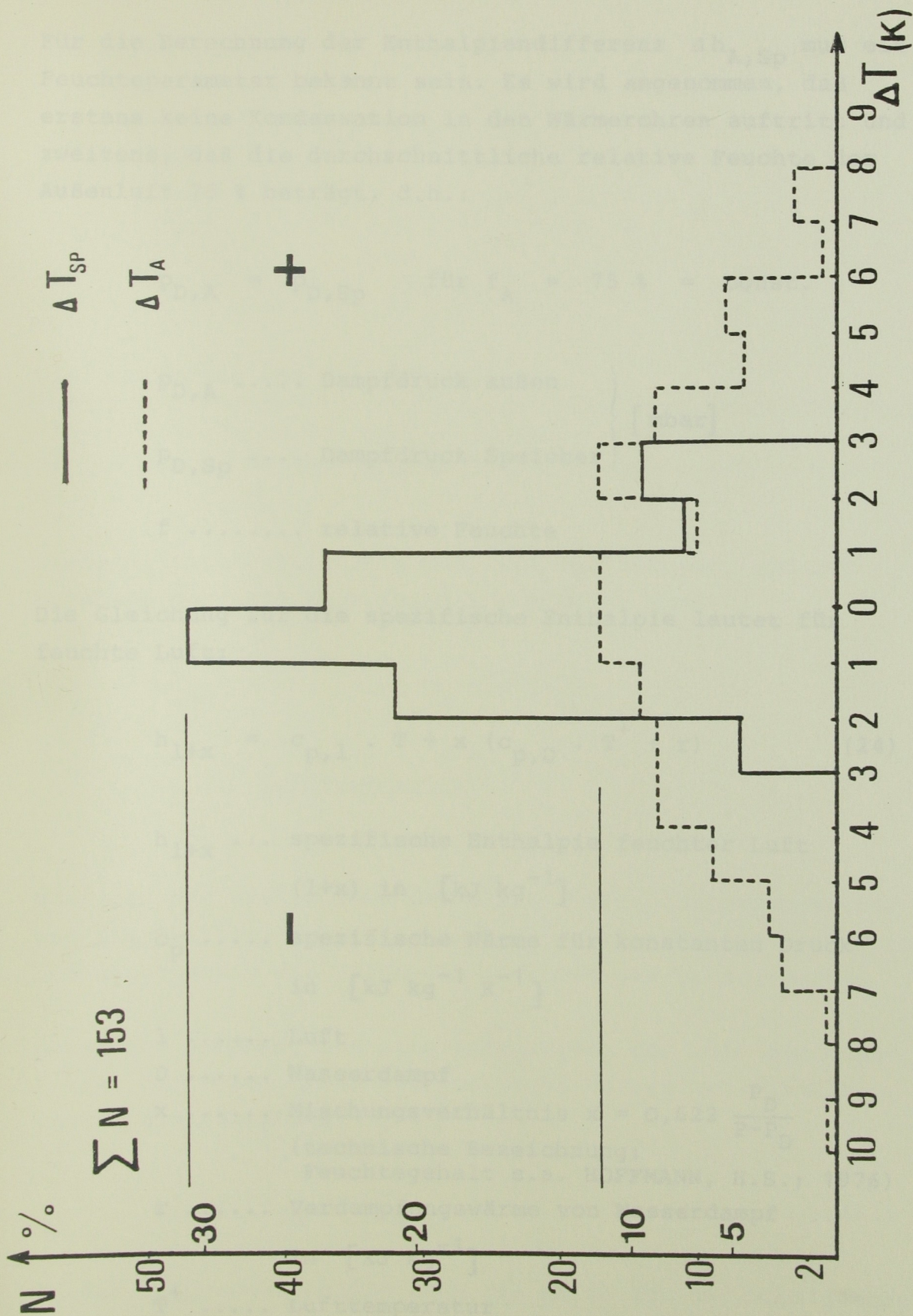


Abb. 26: Tagesmitteltemperatur. Histogramm der Abweichungen der Tagesmitteltemperatur von der jeweiligen Anpassungsfunktion $\Delta T_A = T_{A,M} - T_A(t)$ $\Delta T_{sp} = T_{sp,M} - T_{sp}(t)$

Für die Berechnung der Enthalpiendifferenz $\Delta h_{A,Sp}$ muß ein Feuchteparameter bekannt sein. Es wird angenommen, daß erstens keine Kondensation in den Wärmerohren auftritt und zweitens, daß die durchschnittliche relative Feuchte der Außenluft 75 % beträgt, d.h.:

$$p_{D,A} = p_{D,Sp} \quad \text{für } f_A = 75 \% = \text{const.}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_{D,A} \dots\dots \text{Dampfdruck außen} \\ p_{D,Sp} \dots\dots \text{Dampfdruck Speicher} \end{array} \right\} [\text{mbar}]$$

f relative Feuchte

Die Gleichung für die spezifische Enthalpie lautet für feuchte Luft:

$$h_{l+x} = c_{p,l} \cdot T + x (c_{p,D} \cdot T^+ + r) \quad (24)$$

h_{l+x} ... spezifische Enthalpie feuchter Luft
(l+x) in $[\text{kJ kg}^{-1}]$

c_p spezifische Wärme für konstanten Druck
in $[\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$

l Luft

D Wasserdampf

x Mischungsverhältnis $x = 0,622 \frac{p_D}{p - p_D}$
(technische Bezeichnung:
Feuchtegehalt s.a. HOFFMANN, H.S.; 1976)

r Verdampfungswärme von Wasserdampf
in $[\text{kJ kg}^{-1}]$

T^+ Lufttemperatur

Die Werte lauten:

$$c_{p,l} = 1,006 \left[\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1} \right]$$

$$c_{p,D} = 1,86 \left[\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1} \right]$$

$$r = 2500 \left[\text{kJ kg}^{-1} \right]$$

Die Umrechnung von J in Wh lautet

$$J = \text{Ws} = \frac{1}{3600} \text{Wh}$$

Die spezifische Enthalpie wird auf 0°C bezogen, wodurch durchaus negative Energieinhalte möglich sind:

$$h_{1+x} = 0 \quad \text{für } T_1 = 0^\circ\text{C}$$

T_1 ... Lufttemperatur

Nun wird die spezifische Enthalpie für die Außentemperatur und die Speichertemperatur nach den obenstehenden Gleichungen berechnet sowie die Differenz zwischen den beiden Werten.

Unter der Annahme, daß eine Wärmeabgabe der Luft ein negatives, die Wärmezufuhr ein positives Vorzeichen enthält, lautet die Beziehung

$$\Delta h = h_{Sp} - h_A \quad (25)$$

In der folgenden Tabelle sind die Werte für die spezifische Enthalpie (h_A , h_{Sp}) sowie der Differenz Δh als Funktion der Zeit t berechnet worden.

Tabelle 15 Spezifische Enthalpie.

Berechnet aus den Tagesmittelwerten der Temperaturanpassungsfunktion (T_A^+ , T_{Sp}^+), Annahme: $f_A = 75 \% = \text{const.}$

Die Zahl in der Klammer gibt die entsprechende Gleichung an.

t	h_A (24)	h_{Sp} (24)	h (25)
0	+ 5.25	+ 7.30	+ 2.04
10	+ 4.96	+ 6.63	+ 1.66
20	+ 5.07	+ 6.31	+ 1.23
30	+ 5.57	+ 6.34	+ .76
40	+ 6.47	+ 6.74	+ .27
50	+ 7.74	+ 7.50	- .23
60	+ 9.38	+ 8.64	- .74
70	+11.35	+10.12	- 1.22
80	+13.64	+11.96	- 1.68
90	+16.19	+14.10	- 2.08
100	+18.97	+16.53	- 2.43
110	+21.90	+19.17	- 2.72
120	+24.90	+21.98	- 2.92
130	+27.90	+24.85	- 3.04
140	+30.78	+27.69	- 3.08
150	+33.42	+30.39	- 3.03
160	+35.72	+32.83	- 2.89
170	+37.55	+34.88	- 2.66
180	+38.83	+36.46	- 2.36
190	+39.48	+37.48	- 2.00
200	+39.47	+37.89	- 1.57
210	+38.79	+37.68	- 1.10
220	+37.49	+36.88	- .61
230	+35.63	+35.54	- .09
240	+33.32	+33.74	+ .41
250	+30.67	+31.57	+ .90
260	+27.78	+29.15	+ 1.37
270	+24.79	+26.57	+ 1.78
280	+21.78	+23.93	+ 2.15
290	+18.85	+21.30	+ 2.44
300	+16.09	+18.75	+ 2.66
310	+13.54	+16.35	+ 2.80
320	+11.27	+14.12	+ 2.85
330	+ 9.31	+12.13	+ 2.82
340	+ 7.68	+10.38	+ 2.69
350	+ 6.42	+ 8.92	+ 2.49
360	+ 5.54	+ 7.76	+ 2.21

Um die Wärmemenge berechnen zu können, die vom Luftvolumen aufgenommen bzw. abgegeben wird, ist es notwendig, den Volumenstrom als Funktion der Zeit zu parametrisieren. Der Volumenstrom wurde durch folgende Funktion angesetzt

$$\frac{dV}{dt} = 3500 - 3000 \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t + 1,05 \right)$$

in $[m^3 h^{-1}]$ (26)

Die angenommene Phasenverschiebung entspricht der Lage des Maximums der Anpassungsfunktion der Speichertemperatur. Da die Steuerung der Luftmenge über einen Raumthermostat erfolgt, wird angenommen, daß das Zuluftverhalten (Speicher), eine gute Näherung für die tatsächliche Luftmenge ist.

Die abgegebene bzw. aufgenommene Wärmemenge je Zeiteinheit ergibt sich wie folgt:

$$P_J(t) = \Delta h \cdot \bar{\rho} \cdot \frac{dV}{dt} \quad [kJ h^{-1}]$$

bzw.

$$P_W(t) = \frac{1}{3600} P_J \quad [kW]$$

Durch Integration der Funktion $P(t)$ über die Zeit ergibt sich die entsprechende Wärmemenge. Die numerische Integration wurde für $\Delta h < 0$ (Wärmeabgabe der Luft an den Bodenspeicher) und $\Delta h > 0$ (Wärmeaufnahme der Luft aus dem Bodenspeicher) durchgeführt. Das unterschiedliche Temperaturniveau von Speichermasse und Luft, welches sich durch die verschiedenen Mitteltemperaturen des Jahresverhaltens zeigt ($T_{m,B} = 8,70^\circ C$ und $T_{m,A}^+ = 7,5^\circ C$), erzeugt die Asymmetrie in der Wärmeabgabe. Die Berechnung der Wärmemenge ergibt für die Sommerperiode (Wärmeabgabe der Luft an die Speichermasse) bzw. für die Winterperiode (Wärmeaufnahme)

eine Wärmemenge von

$$\Delta Q^+ = \pm 10200 \text{ kWh}$$

7.2 Speichermasse

Um Aussagen über das Verhalten der Speichermasse - den Erdboden - machen zu können, ist es notwendig, die gesamte Störfunktion zu kennen.

Die bisher bekannte Störfunktion, wie sie bereits für $x = 15,5 \text{ m}$ berechnet wurde, muß nun auch auf eine x -Abhängigkeit erweitert werden und lautet nunmehr:

$$T = f(x, z, t)$$

Nach den Angaben von DULOSY sind die einzelnen Wärmetauschröhre gleichmäßig im Boden angeordnet (vgl. Abb. 5 - Grundriß). Um dies zu bestätigen, wurden vergleichende Messungen durchgeführt, die zeigen, daß die einzelnen Wärmetauschröhre ein homogenes Verhalten haben. Dadurch war es möglich, die y -Abhängigkeit der Funktion zu vernachlässigen.

Weiters wurden auch die einzelnen Wärmetauschröhre (20) vernachlässigt.

Die durch die Röhre entstehende Wärmequelle wird in der Form geometrisch vereinfacht, daß eine homogene Wärmequelle angesetzt wird. Es entsteht eine analoge Wärmequelle, mit einem ähnlichen zeitlichen Verhalten wie an der Oberfläche, in der Tiefe z .

Für die geometrischen Randbedingungen - die Begrenzung des

Bodenspeichers - werden keine Annahmen getroffen.

Die Parameter der Störfunktion, wie sie im Abschnitt 5.3 über das thermische Verhalten des Bodenspeichers berechnet wurden, werden für den Vergleich mit der jetzt berechneten Störfunktion herangezogen.

Als erster Ansatz für die gesamte Störfunktion $T_S(x,z)$ wird die Lufttemperatur T_A^+ und T_{Sp}^+ verwendet.

Die Annahme lautet

$$\begin{aligned} \text{für } x = 0 \quad T_{Sp} &= T_A^+ \quad \text{und} \\ \text{für } x = x_0 \quad T_{Sp} &= T_{Sp}^+ \end{aligned} \quad (28)$$

Da die Bodentemperatur im Speicherbereich durch die Gl. (19) gegeben ist,

$$T_S = T_{Sp} - T_B$$

ergeben sich die Ansätze der Störfunktionen für $x = 0$ und $x = x_0$, durch folgende Differenzen:

$$\begin{aligned} x = 0 \quad \Delta T_A &= T_A^+ - T_B \\ x = x_0 \quad \Delta T_{Sp} &= T_{Sp}^+ - T_B \end{aligned} \quad (29)$$

T_A^+ Lufttemperatur außen (Funktion)

T_{Sp}^+ ... Lufttemperatur Speicher (Funktion)

T_B Bodentemperatur (ungestört)

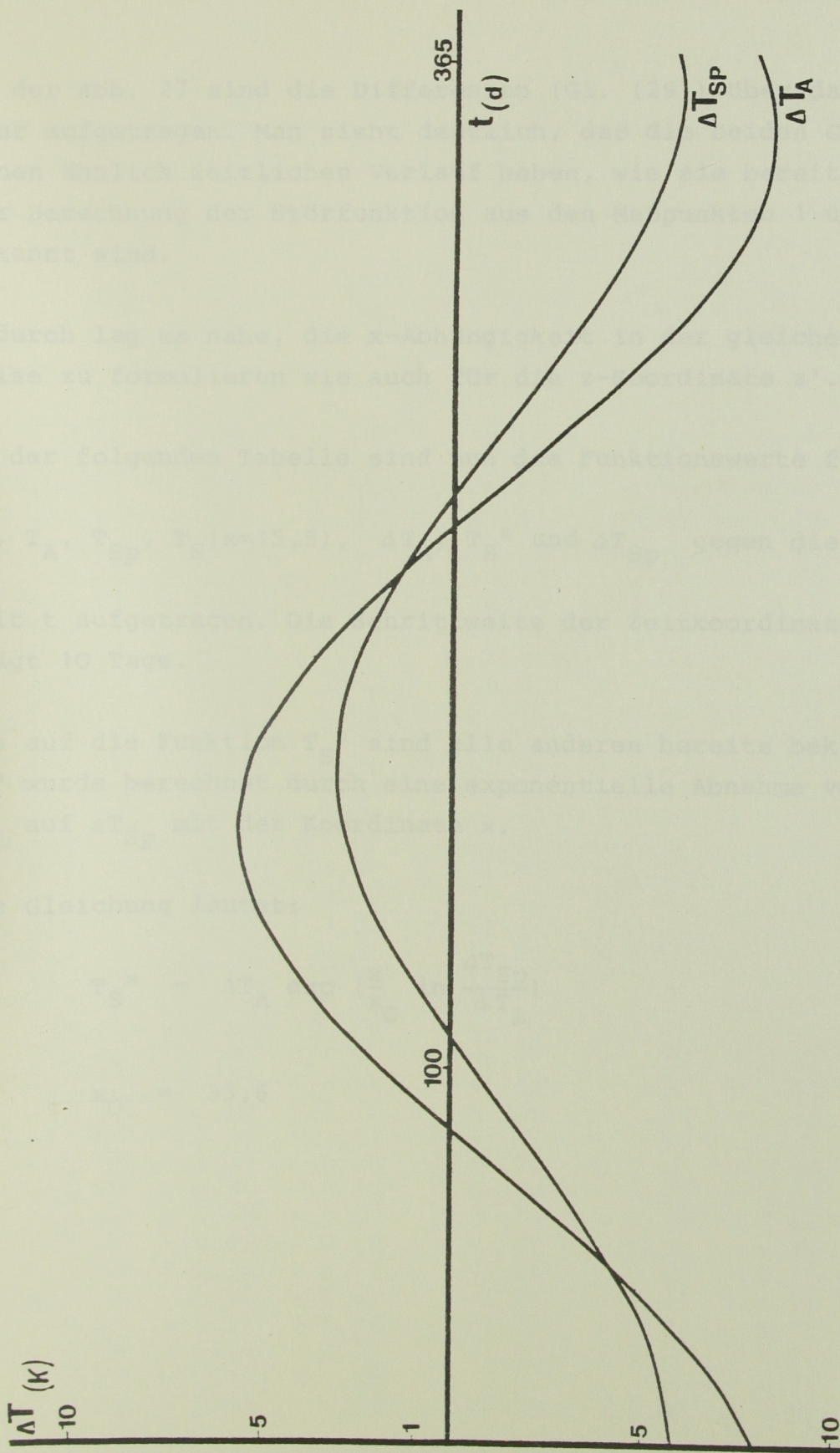


Abb. 27: Störfunktion. Verlauf der Störfunktion für $x = 0$ (ΔT) und $x = x_0$ (ΔT_{SP}). Berechnet aus der Bodentemperatur T_B und der Lufttemperatur T_A^+ bzw. T_{SP}^+ .

In der Abb. 27 sind die Differenzen (Gl. (29)) über das Jahr aufgetragen. Man sieht deutlich, daß die beiden Graphen einen ähnlich zeitlichen Verlauf haben, wie sie bereits aus der Berechnung der Störfunktion aus den Meßpunkten 1 und 2 bekannt sind.

Dadurch lag es nahe, die x-Abhängigkeit in der gleichen Weise zu formulieren wie auch für die z-Koordinate z'.

In der folgenden Tabelle sind nun die Funktionswerte für

T_B , T_A , T_{Sp} , $T_S(x=15,5)$, ΔT_A , T_S'' und ΔT_{Sp} gegen die

Zeit t aufgetragen. Die Schrittweite der Zeitkoordinate beträgt 10 Tage.

Bis auf die Funktion T_S'' sind alle anderen bereits bekannt. T_S'' wurde berechnet durch eine exponentielle Abnahme von ΔT_A auf ΔT_{Sp} mit der Koordinate x.

Die Gleichung lautet:

$$T_S'' = \Delta T_A \exp \left(\frac{x}{x_0} \ln \frac{\Delta T_{Sp}}{\Delta T_A} \right) \quad (30)$$

$$x_0 = 33,6$$

Tabelle 16

Funktionswerte für die Berechnung der Störfunktion

(alle Werte in $[^{\circ}\text{C}]$)

Die Zahl in den Klammern gibt die entsprechende Gleichung an

t	T_B (9)	T_A^+ (22)	T_{Sp}^+ (22)	T_S (21)	ΔT_A (29)	T_S'' (30)	ΔT_{Sp} (29)
0	+ 6.66	- 1.25	+ .77	-2.45	- 7.92	- 6.98	- 5.89
10	+ 5.99	- 1.44	+ .20	-2.55	- 7.44	- 6.68	- 5.79
20	+ 5.41	- 1.37	- .14	-2.59	- 6.78	- 6.22	- 5.56
30	+ 4.93	- 1.03	- .27	-2.58	- 5.97	- 5.62	- 5.21
40	+ 4.56	- .44	- .17	-2.49	- 5.01	- 4.89	- 4.74
50	+ 4.33	+ .38	+ .14	-2.35	- 3.95	- 4.06	- 4.18
60	+ 4.23	+ 1.42	+ .68	-2.16	- 2.81	- 3.15	- 3.54
70	+ 4.27	+ 2.64	+ 1.43	-1.92	- 1.62	- 2.18	- 2.84
80	+ 4.44	+ 4.01	+ 2.35	-1.63	- .43	- 1.19	- 2.09
90	+ 4.75	+ 5.48	+ 3.42	-1.31	- .73	- .21	- 1.32
100	+ 5.18	+ 7.02	+ 4.61	- .97	- 1.83	+ .72	- .56
110	+ 5.72	+ 8.57	+ 5.89	- .62	+ 2.84	+ 1.61	+ .17
120	+ 6.35	+10.09	+ 7.21	- .26	+ 3.73	+ 2.41	+ .85
130	+ 7.06	+11.54	+ 8.54	+ .09	+ 4.47	+ 3.09	+ 1.47
140	+ 7.83	+12.87	+ 9.84	+ .42	+ 5.04	+ 3.64	+ 2.01
150	+ 8.62	+14.04	+11.07	+ .73	+ 5.41	+ 4.04	+ 2.44
160	+ 9.43	+15.02	+12.19	+1.00	+ 5.59	+ 4.29	+ 2.76
170	+10.22	+15.79	+13.17	+1.22	+ 5.56	+ 4.36	+ 2.95
180	+10.97	+16.30	+13.99	+1.39	+ 5.33	+ 4.26	+ 3.02
190	+11.66	+16.57	+14.61	+1.51	+ 4.90	+ 4.00	+ 2.95
200	+12.26	+16.56	+15.02	+1.57	+ 4.29	+ 3.58	+ 2.75
210	+12.77	+16.29	+15.20	+1.56	+ 3.51	+ 3.01	+ 2.43
220	+13.17	+15.76	+15.16	+1.50	+ 2.59	+ 2.31	+ 1.99
230	+13.44	+14.99	+14.89	+1.37	+ 1.55	+ 1.50	+ 1.45
240	+13.57	+14.00	+14.40	+1.19	+ .42	+ .61	+ .83
250	+13.57	+12.82	+13.71	+ .96	+ .74	- .33	+ .14
260	+13.43	+11.48	+12.83	+ .69	- 1.94	- 1.32	- .59
270	+13.15	+10.03	+11.79	+ .37	- 3.11	- 2.30	- 1.36
280	+12.75	+ 8.51	+10.63	+ .04	- 4.24	- 3.26	- 2.12
290	+12.24	+ 6.96	+ 9.37	- .31	- 5.28	- 4.16	- 2.87
300	+11.62	+ 5.42	+ 8.05	- .67	- 6.20	- 4.99	- 3.57
310	+10.93	+ 3.95	+ 6.72	-1.02	- 6.98	- 5.70	- 4.21
320	+10.18	+ 2.59	+ 5.41	-1.36	- 7.59	- 6.29	- 4.76
330	+ 9.39	+ 1.37	+ 4.16	-1.67	- 8.01	- 6.73	- 5.22
340	+ 8.58	+ .34	+ 3.01	-1.95	- 8.24	- 7.01	- 5.57
350	+ 7.79	- .47	+ 1.99	-2.19	- 8.26	- 7.13	- 5.80
360	+ 7.03	- 1.05	+ 1.13	-2.38	- 8.08	- 7.07	- 5.89

Um einen Vergleich zwischen der bekannten Störfunktion T_S und nun berechneten T_S'' durchführen zu können, wird für $x = 15,5$ m gewählt (Lage der Meßpunkte 1 und 2) nach Gl. (30)).

Tabelle 17

Quotient der Störfunktion T_S'' mit T_S

$$\alpha = \frac{T_S''}{T_S}$$

α max	0,3785
α min	0,3702
α mittel	0,3744

Die Lage der Maxima wurde bei jeder Funktion durch unterstreichen hervorgehoben (Tab. 16).

Da die Bildung der Funktionswerte ΔT_A und ΔT_{Sp} durch Differenzbildung von sinus-förmigen Funktionen entsteht, wirken sich geringe Unterschiede in der Phasenlage unverhältnismäßig stark aus.

Für das einheitliche Modell Luft - Boden wird die zeitliche Lage der Störfunktion $T_S(x,z)$ so gewählt, daß es zu einer Übereinstimmung mit den Messungen der Bodenphysik kommt (T_S) (nach Gl. (21)).

Weiters wurden die Beträge der Maxima und Minima der Störfunktion T_S (nach Gl. (21)) mit der Funktion T_S'' (nach Gl. (30)) verglichen. Die Quotienten aus beiden Funktionen sind in der obenstehenden Tabelle zusammengefaßt worden (Tab. 17).

Der physikalische Inhalt des dimensionslosen Faktors liegt im Ansatz der Wärmequelle.

Der Wärmeübergang Luft - Boden wird durch die Lufttemperatur im Wärmetauschrohr und der Bodentemperatur angesetzt. Die Fläche, die für den Wärmeübergang zur Verfügung steht, ist die Oberfläche der Wärmetauschrohre.

Die Gleichung der Fläche lautet:

$$F_R = 2 r_R x_O I \quad (31)$$

r_R = 0,10 m ... Radius der Wärmetauschrohre

x_O = 33,6 m ... Länge der Wärmetauschrohre

I = 20 Anzahl der Wärmetauschrohre

Die Fläche, die für den Wärmeübergang zur Verfügung steht, beträgt somit 422 m^2 .

Für die Störfunktion wurde die Wärmequelle, jedoch als Fläche, angesetzt. Diese Fläche, die ein symmetrisches Verhalten in z hat, wurde über den gesamten Bereich des Bodenspeichers angenommen.

Die Gleichung für die Störfunktion lautet:

$$F_S = x_O \cdot y_O \cdot 2 \quad (32)$$

x_O = 33,6 m ... Länge des Bodenspeichers

y_O = 20 m Breite des Bodenspeichers

Der Faktor 2 ergibt sich durch die Symmetrieannahme der Störfunktion. Die Fläche F_S beträgt somit 1344 m^2 .

Der dimensionslose Faktor ergibt sich als Quotient aus der Fläche F_R zur Fläche F_S :

$$\alpha_F = \frac{F_R}{F_S} = \frac{422 \text{ m}^2}{1344 \text{ m}^2} = 0,314 \quad (33)$$

Im Vergleich mit dem Quotienten α_F beträgt der Faktor, der sich aus dem Verhältnis der Störfunktion des Bodens zur Störfunktion aus der Luft ergibt 0,374 (Tab. 17).

Würde man den Faktor berücksichtigen, der sich aus dem Verhältnis der Flächen ergibt, würde die Störfunktion um 6 % überschätzt werden. Dieser Fehler ist vor allem durch die Randbedingungen gegeben, da die Speichermasse als streng begrenzt angesehen wird.

Weiters müßte die Störfunktion in Zylinderkoordinaten gegeben sein, die erst in größerer Entfernung vom Wärmetausrohr in ein kartesisches Koordinatensystem übergeht.

Aus den Eigenschaften des Faktors α folgt, daß für den Ansatz der Störfunktion die Lufttemperatur im Wärmetausrohr angesetzt werden kann.

Da auch für die Dämpfung der Amplitude des Außenwertes auf den Speicherwert eine exponentielle Abnahme angenommen wurde, wird dies analog für die Störfunktion durchgeführt.

Der Ansatz für die x-Abhängigkeit lautet:

$$T_S \Big|_z = T_m \Big|_z + A_O(z) \cdot \exp(-x K'_x) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - x K''_x - \epsilon\right) \quad (34)$$

$T_S \Big|_z$ Störfunktion für $z = \text{constant}$

$T_m \Big|_z$ Mitteltemperatur der Störfunktion für
 $z = \text{constant}$

$A_O(z)$... Amplitude der Störfunktion für z

Berechnet man nun die Faktoren für die Amplitudendämpfung K'_x und die Phasenverschiebung K''_x so zeigt sich eine überraschende Übereinstimmung. Somit werden die beiden Faktoren gleichgesetzt und die x -Abhängigkeit lautet völlig analog zur z -Abhängigkeit

$$K'_x = K''_x = K_x$$

Der Ansatz für die zweidimensionale Störfunktion $T_S(x, z)$ lautet nunmehr vollständig:

$$T_S(x, z, t) = \alpha \left\{ T_{m,s} \cdot \exp(-z' \cdot K_z) + A_{O,s} \cdot \exp(-x K_x - z' K_z) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - x K_x - z' K_z - \epsilon\right) \right\} \quad (35)$$

Für die einzelnen Parameter ergeben sich nun folgende Werte:

$$\alpha = 0,374$$

$$T_{m,s} = -1,40^\circ\text{C}$$

$$A_{O,s} = +6,95^\circ\text{C}$$

$$K_x = 0,01328 \text{ m}^{-1}$$

$$K_z = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} = 0,41091 \text{ m}^{-1}$$

$$\epsilon = 1,2437$$

Vergleicht man K_x und K_z miteinander, so erkennt man, daß der Faktor K_x etwa eine Größenordnung kleiner ist als für z .

Für eine Periode τ von 365 Tagen ergibt sich für die Amplitude in Abhängigkeit von x eine Halbwertsschicht von 52 m (x = Koordinate = Länge der Wärmetauschrohre) und in Abhängigkeit von der Tiefe z ein Betrag von 1,7 m.

Um die Eigenschaften der gesamten Störfunktion $T_s(x, z, t)$ anschaulich zu machen, wurde der Amplitudenverlauf mit der Tiefe für den Anfangspunkt $x = 0$ und der Endpunkt $x = 33,6$ der Wärmetauschrohre berechnet und in der Abb. 28 dargestellt.

Deutlich sind die geringen Unterschiede von Kurve II und III zu erkennen.

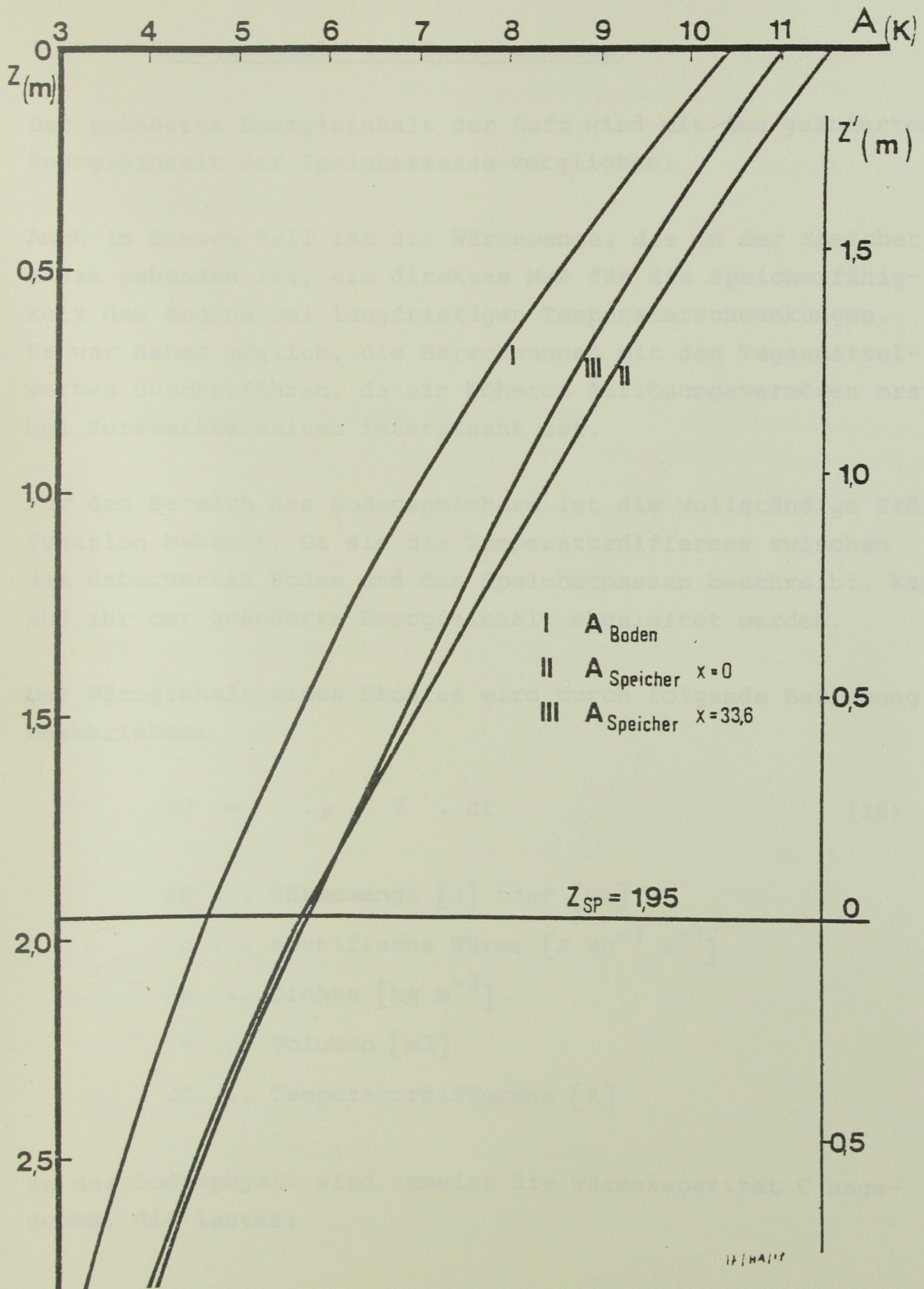


Abb. 28: Amplitudenverlauf mit der Tiefe z

7.3 Energieinhalt der Speichermasse

Der geänderte Energieinhalt der Luft wird mit dem geänderten Energieinhalt der Speichermasse verglichen.

Auch in diesem Fall ist die Wärmemenge, die in der Speichermasse gebunden ist, ein direktes Maß für die Speicherfähigkeit des Bodens bei langfristigen Temperaturschwankungen. Es war daher möglich, die Berechnungen mit den Tagesmittelergebnissen durchzuführen, da ein höheres Auflösungsvermögen erst bei Kurzzeitverhalten interessant ist.

Für den Bereich des Bodenspeichers ist die vollständige Störfunktion bekannt. Da sie die Temperaturdifferenz zwischen dem unberührten Boden und den Speichermassen beschreibt, kann aus ihr der geänderte Energieinhalt abgeleitet werden.

Der Wärmeinhalt eines Stoffes wird durch folgende Beziehung beschrieben:

$$\Delta Q = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad (36)$$

ΔQ ... Wärmemenge [J] oder [Wh]

c ... spezifische Wärme [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

ρ ... Dichte [kg m^{-3}]

V ... Volumen [m^3]

ΔT ... Temperaturdifferenz [K]

In der Bodenphysik wird zumeist die Wärmekapazität C angegeben, die lautet:

$$C = c \cdot \rho$$

C ... Wärmekapazität je Volumeneinheit [$\text{kJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$]

Um den Wärmehalt der Speichermasse berechnen zu können, ist es notwendig, die weiteren Bodenkosten abzusätzen. Die Temperaturleitfähigkeit m^2 ist die einzig bekannte Materialkonstante. Die Beziehungen zwischen den einzelnen Bodenkosten lautet (Gl. 2):

$$m^2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

m^2 ... Temperaturleitfähigkeit [$m^2 s^{-1}$]

λ ... Wärmeleitfähigkeit [$W m^{-2} K^{-1}$]

c ... spezifische Wärmekapazität [$J kg^{-1} K^{-1}$]

ρ ... Dichte [$kg m^{-3}$]

Bei der Dichtebestimmung des Bodens unterscheidet man

- Dichte der festen Substanz und
- Lagerungsdichte.

Da für alle Untersuchungen jedoch nur die Lagerungsdichte von Interesse ist, wird bei dem Begriff "Dichte" im folgenden die Lagerungsdichte verstanden.

Die Werte für die weiteren Bodenkosten wurden aus der Literatur entnommen und in der Tab. 18 in konzentrierter Form aufbereitet.

Die Werte für die spezifische Wärme bzw. für die Wärmekapazität wurden aus MICHEJEW, M.A., (1960) gewählt, da für Sand (feucht) der Parameter der Temperaturleitfähigkeit m^2 am ähnlichsten dem berechneten Wert von $0,59 \cdot 10^{-6} m^2 s^{-1}$ kam.

Tabelle 18

Bodenkonstante: Dichte (ρ), Wärmeleitfähigkeit (λ), Temperaturleitfähigkeit (m^2) spezifische Wärme (c), Wärmekapazität (C)

Autor	Stoff	ρ ($kg\ m^{-3}$)	λ ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	$10^6 \cdot m^2$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	c ($Wh\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	C ($kWh\ m^{-3}\ K^{-1}$)
SCHUBERT, S (1930)	<u>Erboden</u>	1690	---	---	0,268	0,453
	(Feld) - Eberswald					
	<u>Erboden</u>	---	---	---	---	0,440
	(Feld) -Kur- wien					
MICHEJEW, M.A. (1962)	<u>Erboden</u>	---	---	---	---	0,512
	(Feld) - Fritzen					
	<u>Erde</u>	1700	0,655	0,19	0,557	0,947
	feucht			0,59	0,185	0,309
DUBBEL (1974)	<u>Sand</u>	1650	1,125	0,49	0,580	0,957
	feucht					
	<u>Erdreich</u>	2000	2,32	0,59	0,546	1,092
	lehmig feucht					
	<u>Erdreich</u>	1340	0,522	0,59	0,183	0,246
	lehmig	bis				
	feucht	1900	0,522	0,59	0,129	0,246

1 Tabellenwert

2 Annahme

Nachdem die Bodenkosten bestimmt wurden, kann der geänderte Wärmeinhalt ΔQ_B als Funktion der Zeit wie folgt beschrieben werden:

$$\Delta Q_B(t) = c \int_x \int_y \int_z T_S(x, z, t) dz dy dx \quad (37)$$

Dividiert man das Integral durch das Volumen

$$V = \int_x \int_y \int_z dz dy dx \quad (38)$$

welches durch die Integrationsgrenzen gegeben ist, so erhält man eine Mitteltemperatur über das Volumen

$$\bar{T}_V = \frac{1}{V} \cdot \int_x \int_y \int_z T_S(x, z, t) dz dy dx \quad (39)$$

Die Integration nach x, y und z der Funktion $T_S(x, z, t)$ (Gl. (21)) ergibt:

$$\Delta Q_B = C\alpha \left\{ -\frac{T_{m,s}}{K_z} \cdot x \cdot y \cdot \exp(-z'K_z) - \frac{A_0}{2K_z K_x} \cdot y \cdot \exp \right. \\ \left. (-x K_x - z'K_z) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - x K_x - z'K_z - \epsilon\right) \right\} \quad (40)$$

$$\Delta Q_B = C\alpha \left\{ \frac{T_{m,s}}{K_z} \cdot x^1 \cdot y^1 \cdot (1 - \exp(-z'^1 K_z)) \right. \\ \left. - \frac{A_0}{2K_z K_x} y^1 (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \right\} \quad (40a)$$

$$F_1 = \exp (-x^1 K_x - z'^1 K_z) \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - x^1 K_x - z'^1 K_z - \varphi \right)$$

$$F_2 = -\exp (-z'^1 K_z) \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - z'^1 K_z - \varphi \right)$$

$$F_3 = -\exp (-x^1 K_x) \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - x^1 K_x - \varphi \right)$$

$$F_4 = \cos \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - \varphi \right)$$

Für die Grenzen des Integrals werden die Speichergrenzen angesetzt.

Der gesamte Wärmehalt der Speichermasse ergibt sich durch:

$$\Delta Q_B = Q_1 + Q_2 \quad (41)$$

Für Q_1 ergeben sich die Integrationsgrenzen:

$$x^0 = 0$$

$$x^1 = 33,6$$

$$y^0 = 0$$

$$y^1 = 20$$

$$z'^0 = 0$$

$$z'^1 = 1,95$$

Für Q_2 ergeben sich folgende Grenzen:

$$x^0 = 0$$

$$x^1 = 33,6$$

$$y^0 = 0$$

$$y^1 = 20$$

$$z^0 = 0$$

$$z^1 = 6$$

Das Integral hat als Dimension $[Km^3]$. Da die Konstante C als Wärmekapazität die Dimension $[kWh m^{-3}K^{-1}]$ hat, so ergibt das Produkt die Dimension einer Wärmemenge $[kWh]$.

Für die angegebenen Grenzen hat die Speichermasse ein Volumen von $5342 m^3$. Da die Funktion $\Delta Q_B(t)$ die Wärmemenge beschreibt, die in der Speichermasse gebunden ist, ergibt sich die Wärmemenge, die durch das Luftvolumen an die Speichermasse abgegeben wird, durch:

$$\Delta Q_B = Q_B(\max) - Q_B(\min)$$

Setzt man die Werte ein, die sich aus der Funktion $\Delta Q_B(t)$ ergeben, erhält man:

$$\Delta Q_B = 8200 kWh$$

8. KURZZEITVERHALTEN

In diesem Abschnitt werden die kurzperiodischen Strukturen des Bodenspeicherverhaltens untersucht.

Unter dem Kurzzeitverhalten werden Ereignisse verstanden, die eine Dauer von ein oder mehreren Tagen haben. So fallen nicht nur die täglichen Temperaturschwankungen hinein, sondern auch Kalt- bzw. Warmlufteinbrüche. Diese Betrachtung entspricht einer Filterung der Meßdaten durch einen Hochpaßfilter, wodurch tieffrequente Anteile (Jahresschwankungen) herausfallen.

Auch für diesen Abschnitt wird eine Teilung in die Luftphysik sowie in das Verhalten der Speichermasse durchgeführt.

8.1 Luftphysik

Die geringe Dämpfung der Amplitude der Jahresschwankung durch den Bodenspeicher konnte bereits nachgewiesen werden. Die Abhängigkeit der Dämpfung der Amplitude von der Periode der Störung zeigt sich beim Vergleich des Jahresverhaltens (Abb. 25) mit der folgenden Abb. 29. In der folgenden Abbildung wird die Außentemperatur und die Speichertemperatur über die Zeit aufgetragen.

Es wurde eine typische Sommerwoche herangezogen, in der der zweite Teil der Woche durch Niederschlag deutlich kühler war. Auffallend ist die nahezu völlige Glättung der Tageschwankungen, die eine Periode von 1 Tag haben ($\tau = 1 \text{ d}$). Für eine weitere Untersuchung ist der Energieaustausch Speichermasse - Luft von Interesse.

Für die Berechnung des Energieinhaltes über die spezifische Enthalpie ist es nicht nur notwendig das Temperaturverhalten, sondern auch das Verhalten des Wasserdampfgehaltes zu kennen. Erst dadurch wird es sinnvoll, aus diesen beiden Parametern den Energieinhalt zu berechnen.

Für die Überprüfung des Datenmaterials wird der Wasserdampfgehalt der Außenluft mit dem der Speicherluft verglichen. Es stellte sich die Frage, ob bei einer Abkühlung der Außenluft das kondensierte Wasser im Luftsystem erhalten bleibt, oder ob das Kondenswasser durch die Wärmetauschröhre an die Speichermasse abgegeben wird. Diese Möglichkeit erscheint nicht wahrscheinlich, da aus der Beobachtung der Meßpunkte für die Bodentemperatur bekannt ist, daß der Wassergehalt des Bodens hoch ist. Weiters wurde ein Entwässerungsschacht angelegt, damit das Grundwasser die Wärmetauschröhre nicht verlegen kann.

Für den Vergleich des Wasserdampfgehaltes wird der Dampfdruck (p_D) herangezogen. Aus den 2-Stunden-Daten wurde der Dampfdruck berechnet und eine statistische Untersuchung durchgeführt.

In der Tabelle 19 sind der Mittelwert $\overline{p_D}$ sowie die Grenzen für das 95 % Konfidenzintervall für Außen- und Speicherwert zusammengefaßt.

Tabelle 19

Dampfdruck. Mittelwert und 94 %iges Konfidenzintervall für Außen- und Speicherwert

	untere Grenze	$\overline{p_D}$	obere Grenze	p_D in [mbar]
Außen	9,53	9,68	9,83	
Speicher	9,60	9,74	9,88	

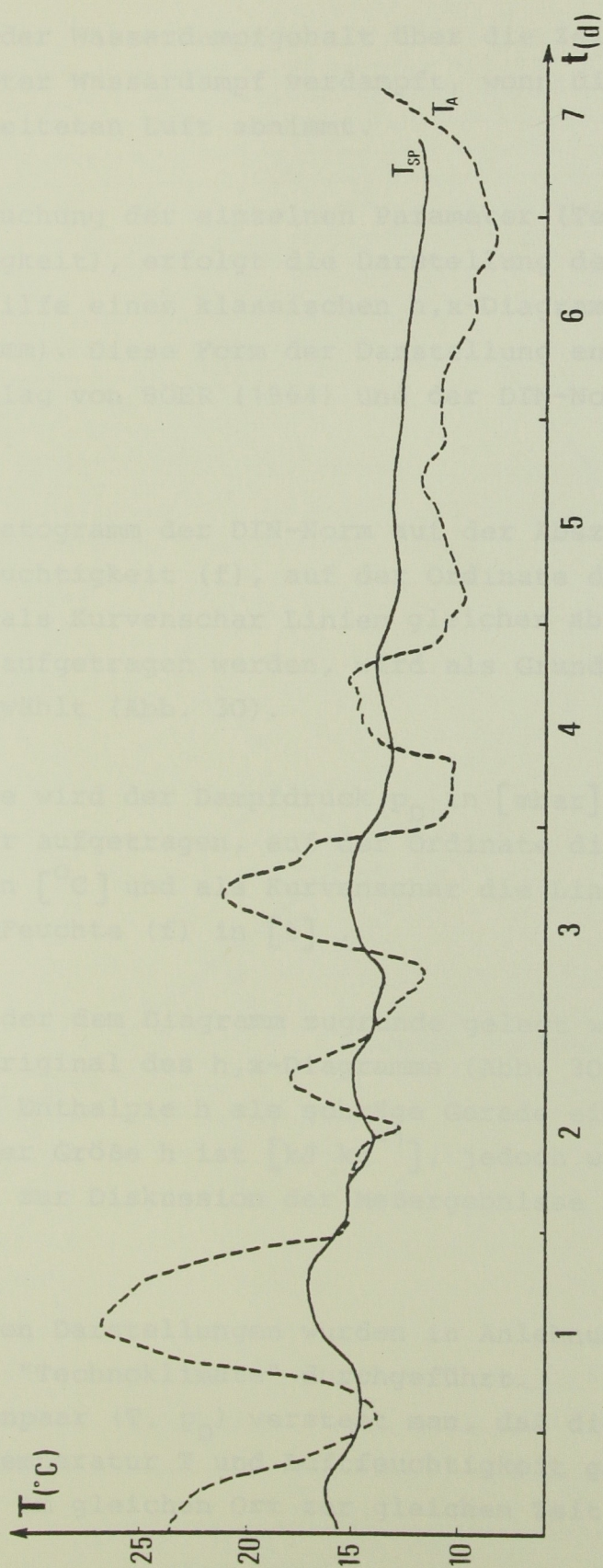


Abb. 29: Temperaturverlauf über eine Woche (12.6.1979 - 19.5.1979)
 Außenwert (T_A), Speicherwert (T_{SP})

Man sieht, daß der Wasserdampfgehalt über die Zeit konstant ist. Kondensierter Wasserdampf verdampft, wenn die Sättigung der aufbereiteten Luft abnimmt.

Nach der Untersuchung der einzelnen Parameter (Temperatur und Luftfeuchtigkeit), erfolgt die Darstellung der Luftaufbereitung mit Hilfe eines klassischen h,x -Diagramms (MOLLIER-Diagramm). Diese Form der Darstellung entspricht auch dem Vorschlag von BÖER (1964) und der DIN-Norm 50 019 "Technoklimate".

Während im Klimatogramm der DIN-Norm auf der Abszisse die relative Luftfeuchtigkeit (f), auf der Ordinate die Lufttemperatur und als Kurvenschar Linien gleicher absoluter Feuchte [gm^{-3}] aufgetragen werden, wird als Grundlage das h,x -Diagramm gewählt (Abb. 30).

Auf der Abszisse wird der Dampfdruck p_D in [mbar] als Feuchteparameter aufgetragen, auf der Ordinate die Lufttemperatur T^+ in [$^{\circ}\text{C}$] und als Kurvenschar die Linien gleicher relativer Feuchte (f) in [%] .

Der Luftdruck, der dem Diagramm zugrunde gelegt wird, ist 1000 mbar. Im Original des h,x -Diagramms (Abb. 30) ist die spezifische Enthalpie h als schräge Gerade eingetragen. Die Dimension der Größe h ist [kJ kg^{-1}], jedoch wird dieser Parameter nicht zur Diskussion der Meßergebnisse herangezogen.

Die zwei weiteren Darstellungen wurden in Anlehnung an die DIN-Norm 50 019 "Technoklimate" durchgeführt.

Unter dem Größenpaar (T, p_D) versteht man, daß die Größe der Werte Lufttemperatur T und Luftfeuchtigkeit gekoppelt auftreten, d.h. am gleichen Ort zur gleichen Zeit.

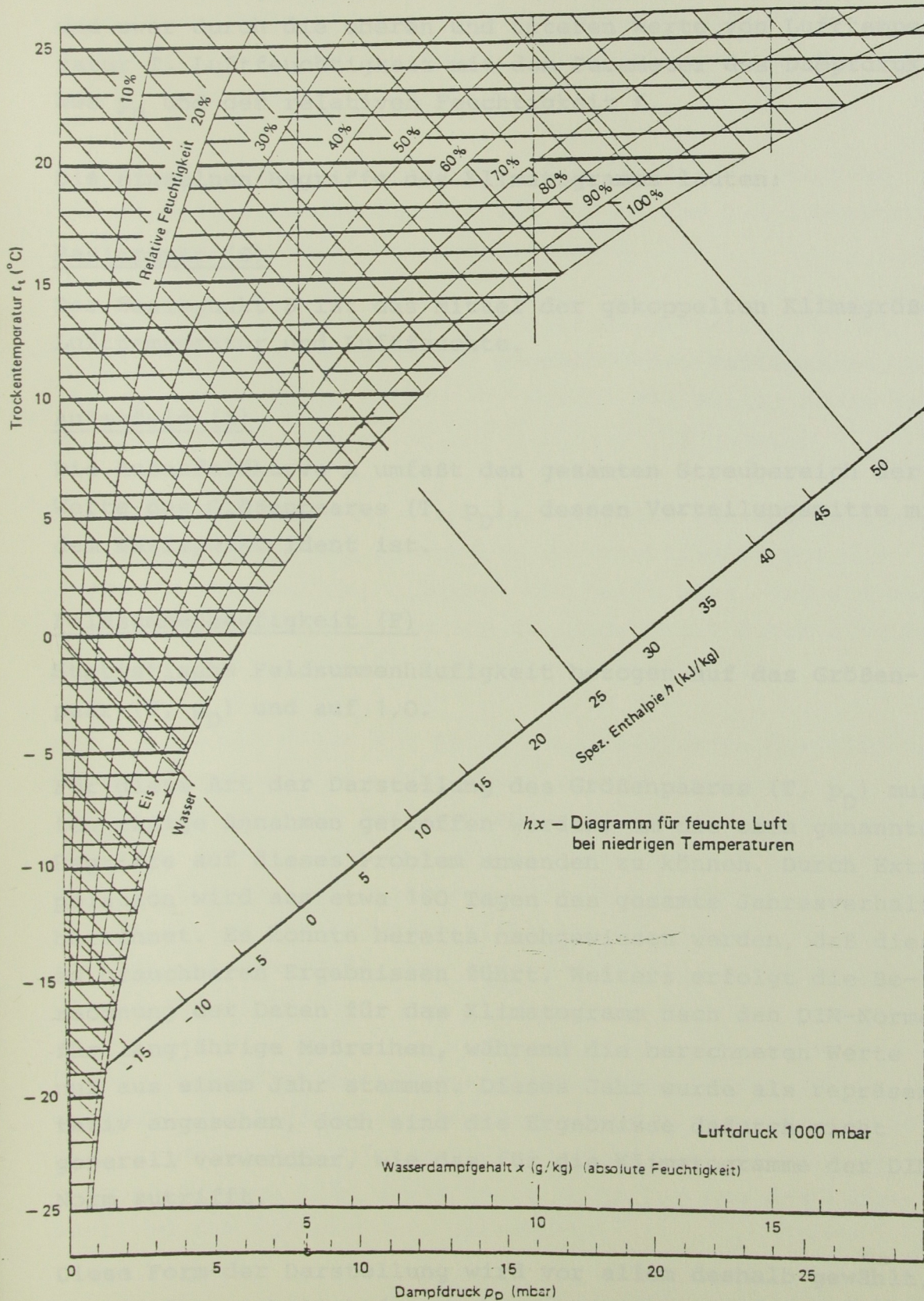


Abb. 30: h, x -Diagramm. Grundlage für die erstellten Klimatogramme

Jedes Klimatogramm ist durch sechs Kurvenstücke begrenzt, und zwar durch die oberen und unteren Werte von Lufttemperatur T , Luftfeuchtigkeit mit dem Parameter des Dampfdruckes p_D und der relativen Feuchtigkeit f .

Die einzelnen Begriffe des Klimatogramms lauten:

Basispunkt (S)

Der Basispunkt S ist das Mittel der gekoppelten Klimagröße Lufttemperatur und Luftfeuchte.

Außenfeld (A)

Die Außenfeldkurve A umfaßt den gesamten Streubereich der Werte des Größenpaares (T, p_D) , dessen Verteilungsmitte mit dem Basispunkt ident ist.

Feldsummenhäufigkeit (F)

Statistische Feldsummenhäufigkeit bezogen auf das Größenpaar (T, p_D) und auf 1,0.

Für diese Art der Darstellung des Größenpaares (T, p_D) mußten einige Annahmen getroffen werden, um die oben genannten Begriffe auf dieses Problem anwenden zu können. Durch Extrapolation wird aus etwa 160 Tagen das gesamte Jahresverhalten berechnet. Es konnte bereits nachgewiesen werden, daß dies zu brauchbaren Ergebnissen führt. Weiters erfolgt die Berechnung der Daten für das Klimatogramm nach den DIN-Normen für langjährige Meßreihen, während die berechneten Werte nur aus einem Jahr stammen. Dieses Jahr wurde als repräsentativ angesehen, doch sind die Ergebnisse dadurch nicht generell verwendbar, wie das für die Klimatogramme der DIN-Norm zutrifft.

Diese Form der Darstellung wird vor allem deshalb gewählt, da sie übersichtlich das Vorkommen von Werten der Luft-

temperatur und Luftfeuchtigkeit angibt. Der Begriff der Feldsummenhäufigkeit ist eine relative Angabe und bezieht sich unter den oben genannten Einschränkungen auf das Jahr mit 8760 Stunden.

In den folgenden Abbildungen werden die Außenfeldkurven für eine relative Häufigkeit von 1,0 in das h, x -Diagramm eingetragen sowie auch die Basispunkte.

In der Abb. 31 ist das gesamte Jahr dargestellt. Um die Unterschiede der Tagesmittel gegenüber den Wertepaaren (T, p_D) vergleichen zu können, werden die Maxima sowie die Minima der Tagesmittel in das Diagramm aufgenommen.

Aus dieser Darstellung wird deutlich, daß der Bodenspeicher die Schwankungen der Außenwerte im wesentlichen auf die Größe der Tagesmittel glättet. Das heißt also, daß die mathematische Mittelbildung für die Außenwerte durch eine tatsächliche, durch den Bodenspeicher, ersetzt wird.

Der Basispunkt S ist für beide Außenfeldkurven der gleiche. Diese Eigenschaft hat sich schon bei der Anpassung von Außentemperatur und Speichertemperatur an die sinusförmige Funktion gezeigt. Der Basispunkt kann auch als Mittelwert für den Energieinhalt angesehen werden, wodurch belegt werden kann, daß der Erdboden nicht als Wärmequelle dient, sondern nur als Puffer für die kurzfristige Aufnahme bzw. Abgabe von Wärme.

Die Eigenschaften der Anlage können dabei besser durch die Änderung der Energieinhalte beschrieben werden als nur durch den Parameter der Lufttemperatur. Deshalb wurde aus den 2-Stunden-Daten die spezifische Enthalpie aus dem Außenwert und dem Speicherwert berechnet.

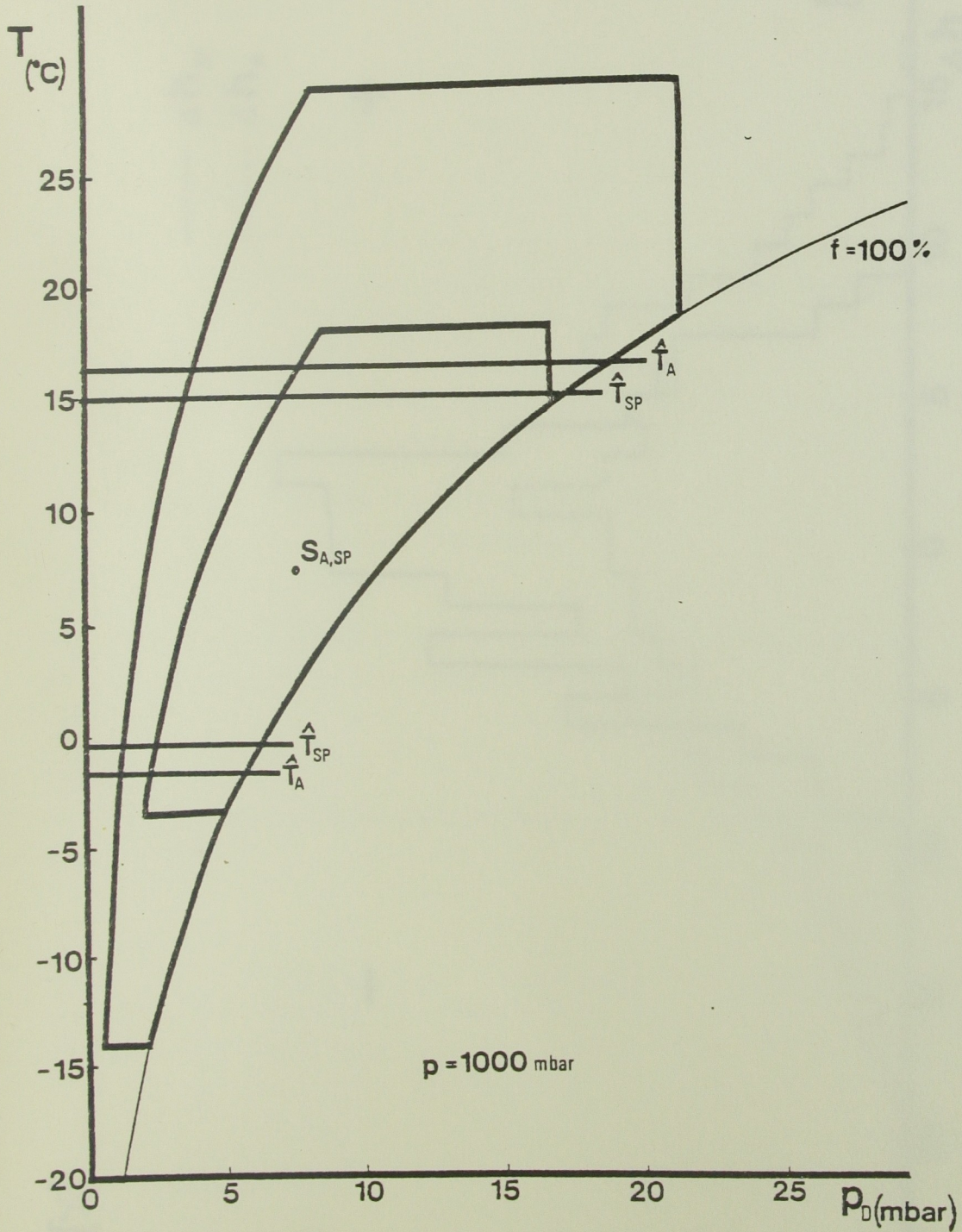


Abb. 31: Klimatogramm. Außenfeld der Außenwerte (A)
(äußere Kurve) und der Speicherwerte (Sp)
(innere Kurve)

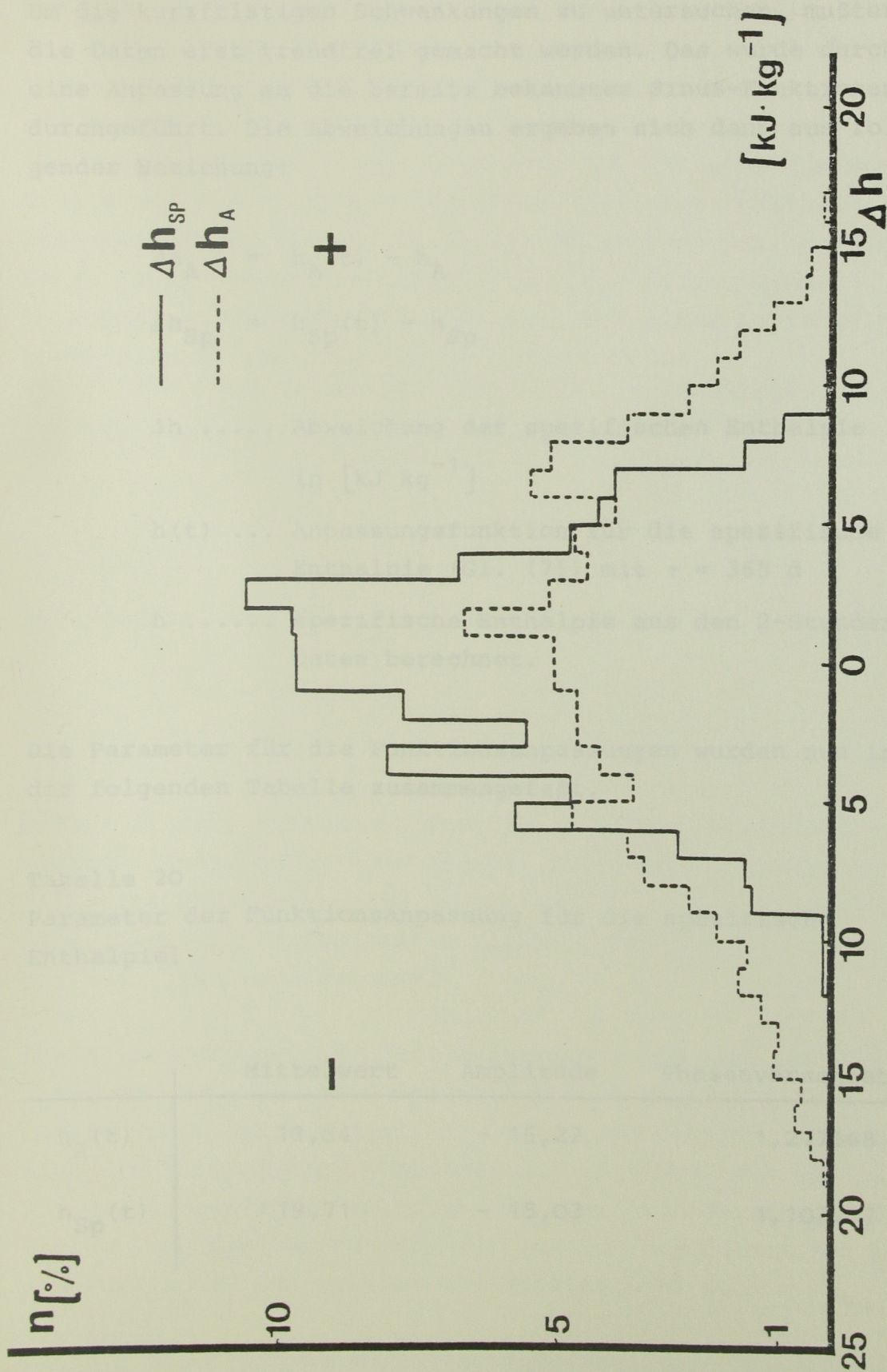


Abb. 32: Enthalpieabweichungen. Histogramm der Abweichungen der spezifischen Enthalpie von der Anpassungsfunktion.

Um die kurzfristigen Schwankungen zu untersuchen, mußten die Daten erst trendfrei gemacht werden. Das wurde durch eine Anpassung an die bereits bekannten Sinus-Funktionen durchgeführt. Die Abweichungen ergeben sich dann aus folgender Beziehung:

$$\Delta h_A = h_A(t) - h_A$$

$$\Delta h_{Sp} = h_{Sp}(t) - h_{Sp}$$

Δh Abweichung der spezifischen Enthalpie
in $[kJ\ kg^{-1}]$

$h(t)$... Anpassungsfunktion für die spezifische
Enthalpie (Gl. (7)) mit $\tau = 365\ d$

h spezifische Enthalpie aus den 2-Stunden-
Daten berechnet.

Die Parameter für die Funktionsanpassungen wurden nun in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Tabelle 20

Parameter der Funktionsanpassung für die spezifische
Enthalpie:

	Mittelwert	Amplitude	Phasenverschiebung
$h_A(t)$	19,54	- 16,22	1,277368
$h_{Sp}(t)$	19,71	- 15,03	1,102237

Die Abweichungen werden als Histogramme dargestellt. Für die kurzzeitigen Abweichungen ergibt sich ein ähnliches Verhalten wie aus dem Histogramm der Tagesmitteltemperatur, die bereits bekannt ist. Für die Abb. 33 wird die relative Häufigkeit der Abweichung berechnet und für eine Klassenbreite von 1 aufgetragen. Um einen möglichen funktionellen Zusammenhang zu finden, wurde die Abweichung der Speicherwerte (Δh_{Sp}) gegen die Außenwerte (Δh_A) aufgetragen. Es konnte ein linearer Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,82 nachgewiesen werden.

Die Gleichung der Regressionsgeraden lautet:

$$\Delta h_{Sp} = a \cdot \Delta h_A + b \quad (41)$$

Die Koeffizienten haben nun folgende Werte:

$$a = - 0,24$$

$$b = 0,468$$

Dieser lineare Zusammenhang ergibt sich aus den trendfreigemachten Daten. Das heißt, daß die auftretenden Störungen alle eine kürzere Periode haben als 365 Tage. Perioden mit einer Dauer von 1 Tag treten sicher gehäuft auf, längere Perioden zunehmend seltener.

Für diese vorgegebene Häufigkeitsverteilung kann der Anstieg der Geraden als Dämpfungsfaktor angesehen werden. Die Abweichungen des Energieinhaltes der Speicherluft reduzieren sich für kurzfristige Störungen auf 47 % des Außenwertes. Für das Jahresverhalten, also für eine Periode von 365 Tagen, ergibt sich der Dämpfungsfaktor aus dem Verhältnis der beiden Amplituden und beträgt zum Vergleich 93 %.

Für die Beschreibung des Luftaufbereitungssystems ist jedoch nicht so sehr die Änderung des Energieinhaltes der Luft von

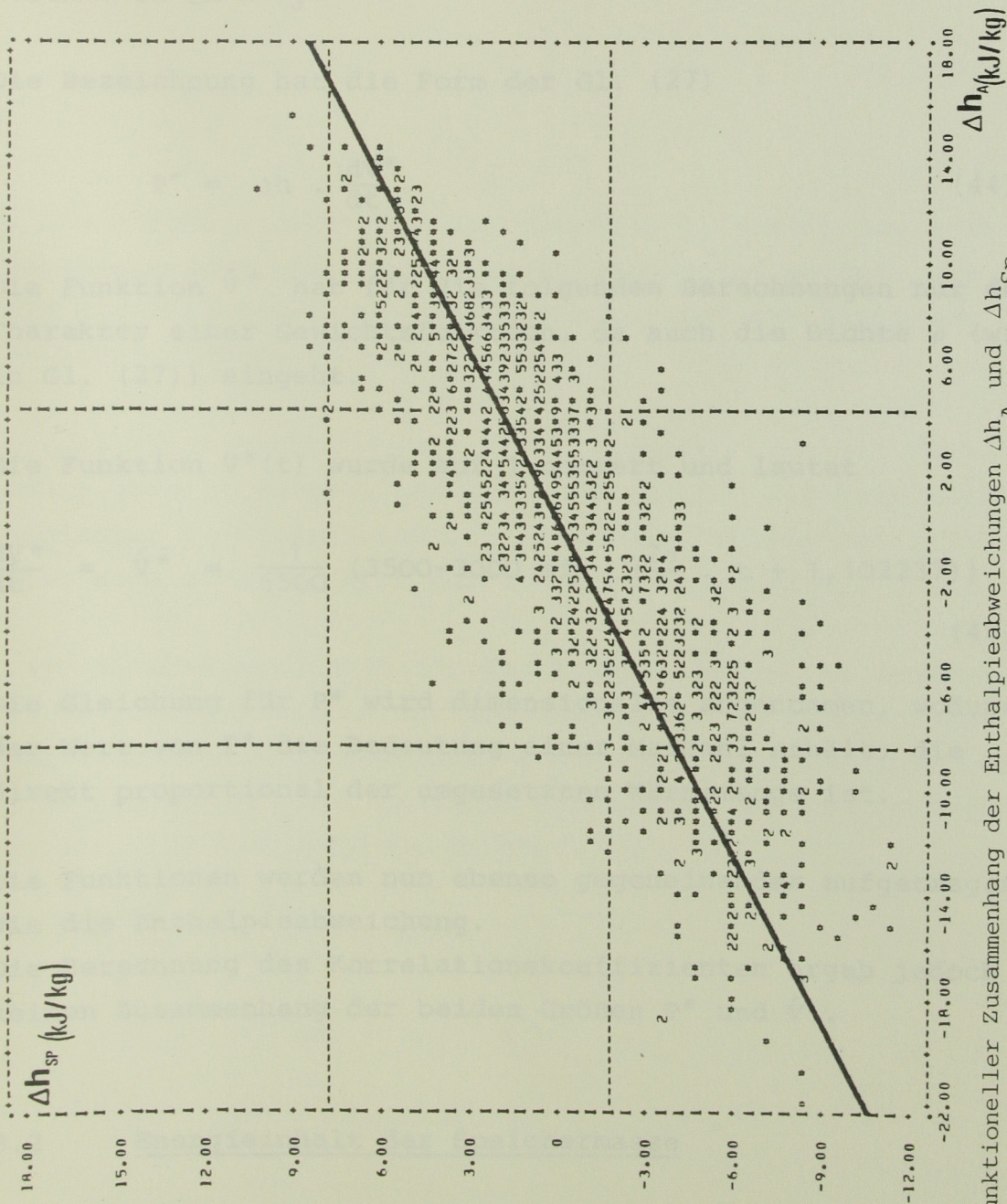


Abb. 33: Funktioneller Zusammenhang der Enthalpieabweichungen Δh_A und Δh_{sp}
 Regressionsgerade: $\Delta h_{sp} = -0,24 + 0,478 \Delta h_A$

Interesse, sondern vielmehr die umgesetzten Energiemengen. Die Wärmemenge selbst ist jedoch nicht nur vom Energieinhalt des Luftvolumens abhängig, sondern auch vom Volumenstrom \dot{V} in $[m^3h^{-1}]$.

Die Bezeichnung hat die Form der Gl. (27)

$$P^* = \Delta h \cdot \frac{dV^*}{dt} \quad (44)$$

Die Funktion \dot{V}^* hat für die folgenden Berechnungen nur den Charakter einer Gewichtsfunktion, da auch die Dichte ρ (wie in Gl. (27)) eingeht.

Die Funktion $V^*(t)$ wurde auf 1 nomiert und lautet

$$\frac{dV^*}{dt} = \dot{V}^* = \frac{1}{6500} (3500 - 3000 \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t + 1,102237 \right)) \quad (45)$$

Die Gleichung für P^* wird dimensionslos angenommen, wodurch der Wert von P^* die Bedeutung einer Maßzahl erhält, die direkt proportional der umgesetzten Wärmemenge ist.

Die Funktionen werden nun ebenso gegeneinander aufgetragen wie die Enthalpieabweichung.

Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten ergab jedoch keinen Zusammenhang der beiden Größen P^* und \dot{V}^* .

8.2 Energieinhalt der Speichermasse

Bereits für das Langzeitverhalten wurde eine Verbindung zwischen dem energetischen Verhalten der Luft und der Speichermasse gesucht. Das wird für die Eigenschaften des Kurzzeitverhaltens analog durchgeführt.

Aus der Gleichung der Temperaturverteilung folgt, daß auch das thermische Verhalten des Bodens von der Periode abhängt. Der Koeffizient der Dämpfung der Amplitude bzw. der Phasenverschiebung lautet:

$$K = \sqrt{\frac{\pi}{\tau \cdot m^2}}$$

Da die x-Abhängigkeit der Störfunktion T_S analog zur z-Abhängigkeit angesetzt wurde, mußte untersucht werden, wie weit die Periodendauer τ einen Einfluß auf das Verhalten des Koeffizienten K_x hat.

Für das Jahresverhalten mit einer Periode τ von 365 Tagen konnte gezeigt werden, daß die Störfunktion als Tagesmitteltemperatur im Wärmetauschrohr angenommen werden kann. Daraus ergab sich auch der Wert für den Koeffizienten K_x .

Diese Annahme wird auch für das Kurzzeitverhalten gemacht. Das Dämpfungsverhalten der Bodenspeicher für kurzperiodische Störungen kann nach den Berechnungen als konstant angesehen werden. Aus der linearen Regression hat sich ein Wert von 0,47 für die Dämpfung ergeben.

Der Koeffizient lautet daher:

$$0,47 = \exp(-x_0 \cdot K_x)$$

$$K_x = - \frac{\ln \cdot 0,47}{x_0} = 0,02247 \text{ m}^{-1}$$

Hätte man den Koeffizienten K_x in der gleichen Art berechnet wie die Periodenabhängigkeit von K_z , so hätte sich ein Dämpfungsfaktor von $0,19 \cdot 10^{-3}$ ergeben. Da das aber nicht den Messungen entspricht, wird der empirisch ermittelte Wert

für die weiteren Berechnungen herangezogen. Der aus der Regressionsgeraden gewonnene Koeffizient gilt aber nicht streng für eine bestimmte Periode τ , sondern für eine mittlere Periode.

Diese mittlere Störperiode wurde mit 3,65 Tagen angenommen, dafür gilt

$$K_z (\tau = 3,65 \text{ d}) = 10 \cdot K_z (\tau = 365)$$

Durch die Änderung der Periode τ ändert sich auch die Eindringtiefe der Störfunktion, wodurch die Vereinfachung der Wärmequelle auf eine Ebene nicht mehr angenommen werden kann.

Für die kurzperiodische Störfunktion wird ein phänomenologischer Ansatz gewählt:

- 1) Die periodische Funktion wird durch eine kurzfristig zeitlich konstante Funktion ersetzt. Diese Funktion T_C hat die Dauer einer halben Periode.
- 2) Die konstante Funktion (Punkt 1) wird analog durch einen exponentiellen Faktor geschwächt. Die Dämpfungsparameter für das kurzzeitige Verhalten sind k_r und k_x .
- 3) Durch den Übergang von der Koordinate z auf den Radius r bzw. r_1 wird ein weiterer Term in der Größenordnung $\frac{1}{r}$ angesetzt.

Die Funktion lautet:

$$T_S^O(r, x) = T_C \frac{r_R}{r+r_R} \exp(-r k_r - x k_x) \quad (46)$$

(1) (3)

(2)

(die Zahlen unter den einzelnen Termen beziehen sich auf die Punkte 1 bis 3 im Text).

Für den Radius r ergeben sich folgende Beziehungen:

$$r_1 = r + r_R$$

r_1 ... Koordinate, für die in Rohrmitte gilt:

$$r_1 = 0$$

r Abstand von der Oberfläche der Wärme-
tauschrohre. Diese Koordinate entspricht
der physikalischen Bedeutung von z' . Für
die Oberfläche der Wärmeaustauschrohre
gilt: $r = 0$

r_R ... Radius der Wärmetauschrohre

Die Funktion muß weiters folgende Bedingungen erfüllen:

$$T_S^0 = T_C \quad \text{für } r = 0 \text{ (bzw. } r_1 = r_R) \\ \text{und } x = 0$$

Am Anfang der Wärmetauschrohre ist die Dämpfung durch den
exponentiellen Term und den $\frac{1}{r}$ - Term gleich 1.

Durch die Einführung von r_1 anstelle von r erhält die
Gleichung die Form:

$$T_S^0(r_1, x) = T_C \frac{r_R}{r_1} \exp(-(r_1 - r_0) k_r - x k_x)$$

Für die Berechnung des Temperaturinhaltes des Bodens wird
die Störfunktion über das Volumen integriert.

$$\Delta Q_{B,R}^0 = C \int_x \int_\varphi \int_{r_1} r_1 \cdot T_S^0(r_1, x) dr_1 d\varphi dx \quad (47)$$

$T_S(r_1, x)$... Störfunktion für $\tau \approx 1d$

r_1 Abstand vom Wärmetauschrohr

x Länge des Wärmetauschrohres

B Boden

R Wärmetauschrohr

Die Wärmemenge $\Delta Q_{B,R}$ ist jene Wärmemenge, die in dem Volumen enthalten ist, welches sich durch die Integrationsgrenzen ergibt.

Die Grenzen lauten:

$$\begin{aligned} x^0 &= 0 \text{ m} \\ x^1 &= 33,6 \text{ m} \\ r_1^0 &= r_R = 0,1 \text{ m} \\ r_1^1 &= 0,5 \text{ m} \\ \varphi^0 &= 0 \\ \varphi^1 &= 2\pi \end{aligned}$$

Länge der Wärmetauschrohre

Die obere Grenze für r_1 wird mit dem halben Abstand der Wärmetauschrohre angenommen. Für die Grenzen lautet das Volumenintegral:

$$V_R^0 = \int_0^{33,6} \int_0^{2\pi} \int_{0,1}^{0,5} r_1 \, dr_1 \, d\varphi \, dx = 25,3 \text{ m}^3$$

Durch die Integration der Störfunktion wird der Wärmehalt beschrieben, der im Erdreich gebunden ist.

Die Bodenkonstante C (Wärmekapazität) wird unverändert beibehalten.

Die Wärmemenge $\Delta Q_{B,R}$ lautet nun:

$$\Delta Q_{B,R}^0 = C \frac{T_C \exp(r_R \cdot k_r)}{k_r k_x} \cdot 2\pi \left\{ \exp(-r_1 k_r - x k_x) \right\}_{x=r_1}^x \quad (48)$$

$$\Delta Q_B^0 = C \frac{T_C \exp(r_R k_r)}{k_r k_x} 2\pi \left\{ \exp(-r_1^1 k_r - x^1 k_x) - \exp(-r_1^0 k_r - x^1 k_x) - \exp(-r_1^1 k_r) + \exp(-r_1^0 k_r) \right\}$$

Für die Konstante T_C wird ein Wert von 7°C angenommen:

Für den Wert der Wärmekapazität (je Volumeneinheit) C wird der gleiche Wert wie beim Langzeitverhalten ($C = 0,95 \text{ kWh m}^{-3} \text{ K}^{-1}$) angenommen.

Der Wärmehalt der im Erdreich um ein Wärmetauschrohr gebundenen Wärme beträgt

$$\Delta Q_{B,R}^0 = 19,52 \text{ kWh} \quad R \dots \text{Wärmetauschrohr}$$

Da von allen 20 Wärmetauschrohren ein identes Verhalten bekannt ist, folgt für die im Erdreich gebundene Wärme des gesamten Bodenspeichers

$$\Delta Q_B^0 = \sum_{i=1}^{20} \Delta Q_{B,R} = 390 \text{ kWh}$$

Diese Wärmemenge wird für eine Aufwärmezeit von einer halben Periode angenommen. Die mittlere Periode ist 3,65 Tage, somit entspricht die Wärmemenge ΔQ_B einer Aufwärmedauer von 43,8 Stunden.

Weiters wird ein Vergleich der Wärmemenge, die im Boden gebunden ist, mit der durch das Luftvolumen abgegebenen Wärmemenge angestellt.

Für die Wärmemenge, die durch die Luft abgegeben wird, werden einige Annahmen getroffen:

$$\frac{dV}{dt} = 6500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = \text{const}$$

$$\bar{\rho} = 1,25 \text{ kg m}^{-3}$$

Die Wärmemenge wird für die gleiche Zeitdauer berechnet wie bei der Speichermasse, nämlich für die halbe Periodendauer. Der Energieinhalt der Luftmasse, die abgegeben wird ist

$$\Delta Q^+ = \Delta t \bar{\rho} \Delta h \cdot \frac{dV}{dt} \quad (49)$$

Δt ... Dauer der Wärmeabgabe für $\tau = 3,65$ Tage ist
 $\Delta t = \tau/2 = 43,8 \text{ h}$

$\bar{\rho}$... mittlere Dichte der Luft

Δh ... Enthalpiedifferenz $\Delta h = \Delta h_{Sp} - \Delta h_A$

$\frac{dV}{dt}$... Volumenstrom $\dot{V} \equiv$ Volumen je Zeiteinheit

Für die Berechnung der Enthalpiedifferenz wird angenommen, daß das Luftvolumen keine Änderung der latenten Wärme erfährt. Somit gilt für eine Temperaturabweichung, wie sie die konstante Temperatur T_C darstellt, daß die Enthalpiedifferenz nur von der Temperatur abhängig ist.

Für $T_C = 7^\circ\text{C}$ ergibt sich eine Enthalpiedifferenz von:

$$\Delta h_A = 7 \text{ kJ kg}^{-1}$$

Die Temperatur T_C wird für den Anfangspunkt des Wärmeaustauschrohres angenommen, d.h. er entspricht einem Außenwert. Da das Dämpfungsverhältnis von Enthalpiedifferenz bekannt ist, ergibt sich die Enthalpiedifferenz der Luft durch die Differenz von Außenwert Δh_A und Speicherwert Δh_{Sp} (nach Gl. (43)).

$$\Delta h = \Delta h_A - \Delta h_{Sp} = \Delta h_A - 0,46 \Delta h_A = 0,52 \Delta h_A$$

Diese Enthalpiedifferenz ($\Delta h_A - \Delta h_{Sp}$) wird von der Luftmasse an den Boden abgegeben. Nach Gl. (49) ergibt sich eine Wärmemenge von

$$\Delta Q^+ = 360 \text{ kWh}$$

Diese gute Übereinstimmung der beiden Wärmemengen ΔQ_B und ΔQ^+ bestätigt das Modell, welches für das energetische Verhalten Luft - Speichermasse entwickelt wurde.

9. DISKUSSION

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zusammengefaßt und die möglichen Nutzungen des Bodenspeichers diskutiert.

Die Temperaturverteilung in unberührtem Boden wurde als Grundfeld für alle weiteren Überlegungen herangezogen. Es wurde nicht nur die Temperaturleitfähigkeit bestimmt, sondern auch die weiteren Parameter der Temperaturverteilung, wie Amplitude und Mitteltemperatur.

Das Wesentliche an der Anlage in Harmannsdorf ist die Verwendung als Luftaufbereitungssystem. Die Eigenschaften dieses Systems können deshalb zweckmäßig über die luftphysikalischen Parameter beschrieben werden.

Das Jahresverhalten zeigt einen unerwarteten Effekt: Es tritt keine Dämpfung der Jahresamplitude auf. Ein Vergleich der Jahresmitteltemperatur zeigt, daß der Bodenspeicher nicht als Wärmequelle dient. Diese Tatsache ist umso überraschender, als das Temperaturniveau von Boden und Luft sich um einige Grade unterscheidet. Nach diesen Ergebnissen lag die Frage nahe, wo die Vorteile eines solchen Systems liegen.

Bei kurzperiodischen Schwankungen zeigten sich wesentliche Einsatzmöglichkeiten dieses Systems: Auftretende Temperaturschwankungen werden je nach Periodenlänge mehr oder weniger gedämpft. (Bei dem bereits besprochenen Jahresverhalten, mit einer Periode von 365 Tagen, wird die Jahresamplitude durch den Bodenspeicher nahezu nicht gedämpft.)

Die Einsatzmöglichkeiten des Luftaufbereitungssystems sind daher jahreszeitlich verschieden.

Die Stalltemperatur hat sicherlich den größten Einfluß auf die Leistung von Nutztieren (MOTHES, 1973). Die optimale Stalltemperatur, wie sie auch in der DIN-Norm 18910 angegeben wurde, ist von Tierart zu Tieralter abhängig. Diese Optimaltemperatur gewährleistet nicht nur den höchsten Ertrag, sondern auch das Wohlbefinden der Tiere. Die Forderung, die gestellt wird, ist vor allem die ganzjährige Erhaltung eines optimalen Stallklimas.

Während im Winterbetrieb die Aufrechterhaltung der Stalltemperatur durch Heizen und in der gegenwärtigen Situation auch noch ökonomisch möglich ist, ist im Sommerbetrieb eine Kühlung der Zuluft finanziell untragbar.

Der hitzebedingte Leistungsabfall setzt bereits knapp oberhalb der Optimaltemperatur ein. Der Bodenspeicher bietet sich nun als Luftaufbereitungssystem für den Sommerbetrieb zur Luftkühlung an.

Wie aus den Messungen hervorgeht, liegen die Lufttemperaturen nach Durchlaufen des Bodenspeichers immer noch im Bereich der geforderten Temperaturwerte. Das ermöglicht jedoch, weitgehend auf eine Erhöhung der Luftrate zu verzichten und dadurch Zugerscheinungen völlig auszuschalten.

Ein weiterer Vorteil liegt in der nahezu konstanten Zulufttemperatur, die die Tiere keiner unnötigen thermischen Streßsituation aussetzt. Alle diese Vorteile ermöglichen, das Stallklima, auch unter Extrembedingungen, nahezu im Optimalbereich zu halten.

Die im Winterbetrieb erreichbare Anhebung der Temperatur (und damit auch Anhebung der Enthalpie der Luft) kann vermutlich ausreichen, einen monovalenten Betrieb einer Wärmerückgewinnungsanlage zu ermöglichen. Bei der Wärmerückgewinnungsanlage könnte durch die Rückgewinnung der

durch die Tiere abgegebenen Wärmemenge die Zuluft soweit angewärmt werden, daß eine zusätzliche Aufheizung (bivalenter Betrieb) nicht notwendig wäre.

Die auf diese Weise rückgeführte Wärmemenge könnte die Transmissionsverluste durch die Bauteile sowie die Verluste, die bei der Wärmerückgewinnung entstehen, abdecken.

Durch den Einsatz des Bodenspeichers, der der Wärmerückgewinnungsanlage vorgeschaltet wäre, würde der Einfluß kalter Außenluft wesentlich verringert werden.

Ein monovalenter Betrieb wäre nur durch eine Optimierung der Luftrate möglich.

Abschließend kann gesagt werden, daß ein solches Luftaufbereitungssystem, wie es der Bodenspeicher darstellt, eine sinnvolle Möglichkeit ist, die geforderten Optimalwerte des Stallklimas nicht nur ganzjährig, sondern auch energiesparend zu erreichen.

10. ZUSAMMENFASSUNG

Für die Intensivtierhaltung sind energiesparende Luftaufbereitungssysteme von besonderer Bedeutung. Im Forschungsgut Harmannsdorf (NÖ) stand eine solche Anlage für Meßzwecke zur Verfügung.

Das System, ein Bodenspeicher, nützt den Erdboden als Wärmespeicher. Die Außenluft wird durch ein Rohrsystem angesaugt und in den Stall als Zuluft eingebracht. Die Plastikrohre sind 35 m lang und in 2 m Tiefe verlegt.

Das Meßprogramm verfolgte zwei Ziele:

Erstens wurde die Bodentemperatur an mehreren Meßpunkten erfaßt, um das Verhalten der Speichermasse (Erdboden) beschreiben zu können; zweitens wurde die Luftführung verfolgt und entlang des Weges die Luftparameter (Temperatur, Feuchte sowie das geförderte Luftvolumen) gemessen.

Die Arbeit brachte folgende Ergebnisse:

Die tageszeitlichen Temperaturschwankungen der Außenluft werden so stark gedämpft, daß die Temperatur im Stall nahezu konstant bleibt. Der jahreszeitliche Übergang vom Maximum (16°C im Sommer) zum Minimum (-1°C im Winter) erfolgt kontinuierlich und läßt sich durch eine sinusförmige Funktion beschreiben.

Die Einsatzmöglichkeiten des Systems sind je nach Jahreszeit verschieden. Im Winter wäre der Bodenspeicher in Kombination mit einer Wärmerückgewinnungsanlage geeignet, die Luftaufbereitung durchzuführen. Durch die Rückgewinnung der Tierwärme wäre eine wesentliche Energieeinsparung möglich. Im Sommer beseitigt die Anlage völlig die tierbelastenden Temperaturmaxima, wodurch die Stalltemperatur im Optimalbereich gehalten werden kann.

VERZEICHNIS DER SYMBOLE

A	.....	Index für Außenwerte
A	.....	Amplitude
a	.....	Jahr (356 Tage)
B	.....	Index für Boden
c	.....	spezifische Wärme $[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$
C	.....	Wärmekapazität je Volumeneinheit $[J\ m^{-3}\ K^{-1}]$
D	.....	Index für Wasserdampf
d	.....	Index für Tag
ϵ	.....	Phasenverschiebung $[rad]$
F_R	.....	Fläche der Wärmetauschrohre $[m^2]$
F_S	.....	Fläche der angesetzten Wärmequelle $[m^2]$
f	.....	relative Feuchte
h	.....	spezifische Enthalpie der Luft $[J\ kg^{-1}]$
K_x, k_x	.....	Dämpfungsfaktor und Phasenverschiebung für die x-Koordinate $[m^{-1}]$
K_z, k_z, k_r$	.....	\sqrt{\frac{\pi}{\tau_m}}$ Dämpfungsfaktor und Phasenverschiebung für die z- bzw. r-Koordinate $[m^{-1}]$
l	.....	Index für trockene Luft
λ	.....	Wärmeleitfähigkeit $[W\ m^{-1}\ K^{-1}]$
m^2	.....	Temperaturleitfähigkeit $[m^2\ s^{-1}]$
N	.....	absolute Häufigkeit
n	.....	relative Häufigkeit
P_J	.....	Leistung $[J\ h^{-1}]$

P_W	Leistung [kW]
p	Druck [mbar]
p_D	Partialdruck des Wasserdampfes [mbar]
φ	Phasenverschiebung [rad]
Q	Wärmemenge [kJ] oder [kWh]
R	Index für Rohr (Wärmetauschrohr)
r	Verdampfungswärme von Wasserdampf [kJ kg ⁻¹]
r_1, r	Radius für den Abstand von einem Wärme- tauschrohr [m]
r_R	Radius der Wärmetauschrohre [m]
ρ	Dichte [kg m ⁻³]
ρ_B	Bodendichte [kg m ⁻³]
S	Index für Störfunktion
Sp	Index für Speicherwerte
s'	Standardabweichung (Standardfehler)
T	Temperatur [°C]
T_A^+	Lufttemperatur außen [°C]
T_B	Bodentemperatur [°C]
T_m	Mitteltemperatur [°C]
$T_S(x,y,z,t)$	Störtemperatur im Speicherbereich [°C]
$T_{Sp}(x,y,z,t)$	Bodentemperatur im Speicherbereich [°C]
T_{Sp}^+	Lufttemperatur Speicher [°C]
t	Zeitkoordinate [s] oder [d]
τ	Periode [s] oder [d]
\dot{V}	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]
x	Raumkoordinate

x Index für Mischungsverhältnis
 x_o Länge der Wärmetauschrohre [m]
 y Raumkoordinate
 y_o Breite des Bodenspeichers [m]
 z Raumkoordinate
 z_{Sp} Verlegungstiefe der Wärmetauschrohre [m]
 z' transformierte Koordinate
 $+$ Index für Luftparameter

KLIMASCHMIDT, E.: Fresh air supply for
 stables through underground storage:
 1. Technical Design
 (Int. Vet. Veterinary Society (Proceedings),
 Copenhagen, 1962)

DVORACEK, M.: Der Boden und die Wärme aus: Boden-
 physik und Bodenkultur
 Herausgeber: Dr. CLARA, J., KLIMASCHMIDT, A.,
 DVORACEK, M.
 Verlag Gustav Fischer Verlag, Jena, 1962

KLIMASCHMIDT, E., ARMAN, E.: Fresh air supply for
 stables through underground storage:
 1. Clinical Practice (Proceedings),
 Copenhagen, 1962

GRUBER, E., ENK, S., GEIGEL, G.: Grundlagen der
 Wärmeübertragung
 3. Auflage, Verlag Julius Springer,
 Berlin, 1963

KANTON, K.H.: Einführung in die Bodenkunde
 Verlag Ferdinand Schöbe, Frankfurt, 1978

LITERATURVERZEICHNIS

- BÖER, W.: Technische Meteorologie
B.G. Teubner Verlagsgesellschaft,
Leipzig, 1964
- DIN-NORM 18 910: Klima in geschlossenen Ställen
1974
- DULOSY, E., GLAWISCHNIG, E.: Fresh air supply for
sties through underground storage:
1. Technical design
Int. Pig Veterinary Society (Proceedings),
Kopenhagen, 1980
- DVORACSEK, M.: Der Boden und die Wärme aus: Boden-
physik und Bodenkolloidik
Herausgeber: DI GLERIA, J., KLIMES-SZMIK, A.,
DVORACSEK, M.
VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 1962
- GLAWISCHNIG, E., AXMANN, H.: Fresh air supply for
sties through underground storage:
3. Clinical results (Proceedings),
Kopenhagen, 1980
- GRÖBER, H., ERK, S., GRIGULL, U.: Grundsätze der
Wärmeübertragung
3. Auflage, Verlag Julius Springer,
Berlin, 1963
- HARTGE, K.H.: Einführung in die Bodenphysik
Verlag Ferdinand Enke, Stuttgart, 1978

HERR, L.: Bodentemperatur unter besonderer Berücksichtigung der äußeren meteorologischen Faktoren (Diss.)
Berlin, 1936

HOFFMANN, H.J.: Gesetze der feuchten Luft und ihre Anwendungen aus:
Lehrbuch der Klimatechnik (Bd. 1), Hrsg.:
Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik
2. Auflage, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe,
1974

KECK, Gertrud, GLAWISCHNIG, E., SCHAUBERGER, G.,
AXMANN, H.: Physikalische Eigenschaften eines Bodenspeichers zur Frischluftversorgung von Ställen
3. Int. Kongreß für Tierhygiene (Proceedings), Wien, 1980

KERNER-MERILAUN, F.: Jahresschwankung der Fehler berechneter Bodentemperaturen (Diss.),
Wien, 1962

KLIMATOGRAPHIE VON ÖSTERREICH: Band 3, Eckel, O.:
Bodentemperaturen
Kommissionsverlag: Springer Verlag,
Wien, Österr. Staatsdruckerei, Wien, 1960

MICHEJEW, M.A.: Grundlagen der Wärmeübertragung
VEB Verlag Technik, Berlin, 1962

MOTHES, E.: Stallklima
VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag,
Berlin, 1973

NIDETZKY, L.: Untersuchungen über die Temperaturverhältnisse in Kulturböden und ihre Abhängigkeit von meteorologischen Faktoren (Diss.), Wien, 1952

SCHAUBERGER, G., AXMANN, H., KECK, Gertrud: Fresh air supply for sties through underground storage: 2. Physical properties
Int. Pig Veterinary Society (Proceedings),
Kopenhagen, 1980

SCHUBERT, J.: Verhalten des Bodens gegen Wärme aus:
Handbuch der Bodenlehre (Bd.6), Hrsg.:
BLANCK, E.,
Verlag Julius Springer, Berlin, 1930

SPSS-STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCES:
Subprogram Nonlinear,
Northwestern University, Vogelback
Computing Center, Illinois, 1977

CURRICULUM VITAE

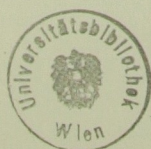
Ich wurde als Sohn des Juristen OLGR Mag. Franz Schaubberger und seiner Frau Elisabeth, geb. Fröhbauer, in Wien am 8. März 1957 geboren.

Ich besuchte in den Jahren 1963 bis 1967 die Volksschule und anschließend das Bundesrealgymnasium XVIII, Schopenhauerstraße 49, wo ich im Juni 1975 die Matura ablegte.

Im Wintersemester 1975/76 immatrikulierte ich an der Universität Wien und begann das Studium der Meteorologie.

Im Wintersemester 1978/79 erhielt ich von o. Univ.-Prof. Dr. H. Reuter das Dissertationsthema "Spezielle Untersuchungen zur Stallklimatologie" (Energiesparende Luftaufbereitung durch Bodenspeicher).

Seit Jänner 1979 arbeite ich am Institut für Medizinische Physik der Veterinärmedizinischen Universität Wien als Studienassistent.



+AM5780500



+AM5780500

www.books2ebooks.eu