

Solardach-Kollektoren zur Brauchwassererwärmung mittels Wärmepumpe

Von Wolfgang Lücke, Göttingen*)

DK 620.91:697.329

Zahlreiche Flachkollektoren zur Luftanwärmung sind in den letzten Jahren für landwirtschaftliche Trocknungszwecke entwickelt und untersucht worden. Sie lassen sich in Verbindung mit einer geeigneten Wärmepumpe auch zur solaren Brauchwassererwärmung nutzen. Die Kosten für die Installation von Solarkollektoren sind durch Verwendung geeigneter handelsüblicher Dacheindeckungen deutlich zu reduzieren, wenn die Kollektoren die ohnehin vorhandene Dachhaut als Absorber nutzen können. Der vorliegende Beitrag zeigt am Beispiel eines Metalldaches verschiedene Möglichkeiten eines Solardachaufbaues und dessen Eignung zur Brauchwassererwärmung mit und ohne Wärmepumpe.

1. Einleitung

Die Nutzungsmöglichkeiten der Solarenergie in der Landwirtschaft sind in den letzten Jahren vielfach beschrieben worden. Die Anwärmung von Trocknungsluft durch Luftkollektoren steht dabei im Vordergrund des Interesses [1 bis 4].

Eine einfache Kollektorbauform stellen in diesem Zusammenhang Solardach-Kollektoren dar. Es handelt sich hierbei um Systeme, bei denen durch geringfügige bauliche Veränderungen der Dachaufbau selbst als Kollektor genutzt werden kann. Dies ist beispielsweise durch Abdeckung eines bereits vorhandenen Daches mit Acrylglas oder Verwendung einer als Absorber geeigneten Dacheindeckung aus dunkel beschichtetem Metall möglich [5, 6].

Im Institut für Agrartechnik der Universität Göttingen sind in den letzten Jahren zahlreiche Solardach-Luftkollektorbauarten untersucht worden. Dabei erreichten besonders Kollektoren mit einem Absorber aus Metall relativ hohe Wirkungsgrade und Temperatursteigerungen. Die Baukosten für diese Systeme konnten sehr niedrig gehalten werden [7, 8]. Die Rentabilität der Installation läßt sich durch zusätzliche Nutzung des Kollektors zur solaren Brauchwassererwärmung in Verbindung mit einer Wärmepumpe verbessern, eine Anwendungsart, die durchaus wirtschaftlich sein kann [9].

Gerade in der Landwirtschaft fällt in milchviehhaltenden Betrieben neben dem Warmwasser für den Hausgebrauch ein erheblicher Bedarf für Reinigung und Kälbertränke an. Dieser Wasserbedarf wird meistens über konventionelle Ölheizkessel oder elektrische Beheizung bereitgestellt. Besonders in Monaten ohne zusätzlichen Heizwärmebedarf – Mai bis September – ist diese Lösung wegen des geringen Wirkungsgrades des Heizkessels bei ausschließlicher Brauchwassererwärmung relativ teuer [10]. Es stellt sich daher die Frage, ob ein geeignetes Solardach-System in Verbindung mit der Wärmepumpe günstiger ist.

1) KAMI, Kalix Mekaniska Industrier AB, Kungsgatan 47, S 951 Lulea, Schweden.

*) Dipl.-Ing. agr. W. Lücke ist wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Agrartechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke) der Universität Göttingen.

2. Bau einer Pilotanlage

In eigenen Vergleichsuntersuchungen mit anderen Solardachabsorbern konnte gezeigt werden, daß ein in Schweden hergestelltes Metalldachprofil¹⁾, Bild 1, im gesamten für Luftkollektoren wichtigen Strömungsgeschwindigkeitsbereich von bis zu 8 m/s hohe Wirkungsgrade und relativ große Temperatursteigerungen erreicht. Bei diesem Dachmaterial handelt es sich um ein 0,5 mm starkes, galvanisiertes Stahlblech. Es ist ziegelartig verformt und beidseitig verzinkt. Auf die Zinkbeschichtung ist eine spezielle Kunststoffmasse aufgebracht, die außen schwarz und innen grauweiß eingefärbt ist [11].

Diese Dachhaut wurde als Absorber in einem Solardachaufbau zur solaren Brauchwassererwärmung mit Luft und Sole als Wärmeträger untersucht. Die Versuche wurden in vier Varianten durchgeführt:

1. Verwendung des Bleches in einem Luftkollektor-Solardach in Verbindung mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe,
2. Verwendung des Bleches in einem Solekollektor-Solardach in Verbindung mit einer Wasser-Wasser-Wärmepumpe,
3. Verwendung des Bleches in einem Solekollektor-Solardach mit direkter Brauchwassererwärmung über einen Wärmetauscher im Speicher,
4. Betrieb einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne zusätzliche Kollektorunterstützung als Vergleichsvariante.



Bild 1. Versuchsanlage mit Ansicht der Metalldachhaut.

Das Solardach sollte mit möglichst geringem Material- und Kostenaufwand erstellt werden. Daß dies besonders beim Luftkollektorsystem (Variante 1) möglich war, zeigt Bild 2. Der Aufbau des Luftkollektor-Solardaches entspricht im wesentlichen heute üblichen Dachkonstruktionen, so daß auch die Kosten dem Vergleich zu anderen Dacheindeckungen standhalten. An der Unterseite der Dachsparren ist eine Baustahlmatte fixiert. Sie trägt zur Isolierung eine Mineralfasermatte, die zum Dachboden hin mit einer Dampfsperre versehen ist. Auf den Dachsparren ist in Sparrenrichtung eine Konterlattung aufgebracht, mit der eine aluminiumkaschierte Plastikfolie festgelegt wird. Diese Unterspannbahn schützt die Isolierung vor eindringender Nässe aus dem Raum unterhalb des Dachprofils und reflektiert die vom Absorber emittierte langwellige

Wärmestrahlung. Die Konterlattung trägt in bestimmten Abständen die querverlegten Dachlatten, auf denen das Dachprofil verschraubt ist.

Der Strömungskanal für die Luft ist im Bild 2 durch Punktierung angedeutet. Er wird auf der Unterseite durch die Unterspannbahn und nach oben durch die Dachhaut selbst begrenzt. Die Luft wird im Saugbetrieb von der Traufe zum First geleitet und über einen Absaugtrichter und ein Rohrleitungssystem der Wärmepumpe zugeführt.

Gegenüber einem heute üblichen Dachaufbau entsteht für die Ausbildung zum Luftkollektor-Solardach als Mehraufwand nur die zusätzliche Konterlattung und die aluminiumkaschierte Folie.

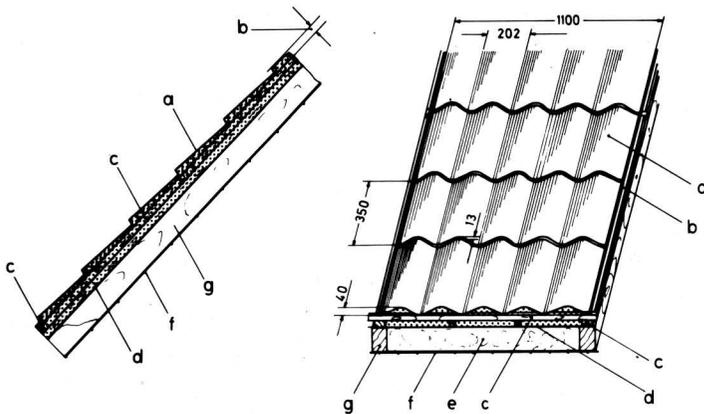


Bild 2. Aufbau des Luftkollektor-Solardaches.

- | | |
|-------------------|-----------------|
| a Dachprofil | e Isolierstoff |
| b Gummidichtung | f Drahtgeflecht |
| c Lattung | g Dachsparren |
| d Unterspannfolie | |

☐ luftdurchströmter Raum

Den Aufbau des Solekollektorsystems (Variante 2 und 3) zeigt Bild 3. Die Dachkonstruktion entspricht der des Luftkollektordaches. Beim Solekollektor-Solardach tritt die Kondenswasserbildung als Problem auf. Dadurch, daß die Sole der Luft im Kollektor Wärme entzieht, kommt es zu einem mitunter erheblichen Anteil an Kondenswasser, das aus dem Dachraum abgeführt werden muß [12]. Es darf nicht auf der Unterspannbahn ablaufen, da es sie kühlen würde. Dann entstünde auf ihrer der Isolierung zugewandten Seite ebenfalls Kondenswasser, das zu Fäulnis in der Mineralfasermatte führen könnte. Aus diesem Grunde wird anstelle der aluminiumkaschierten Folie eine Unterspannbahn aus einfacher Dachfolie eingezogen und mit den Konterlatten befestigt. Direkt auf dieser Lattung wird mittels der Dachlatten die aluminiumkaschierte Folie fixiert.

Innerhalb des Daches entstehen somit zwei Hohlräume, einer zwischen den beiden Folien, der andere zwischen der aluminiumkaschierten Folie und der Dachhaut. Fällt in diesem oberen Raum Kondenswasser an, so läuft es über die aluminiumbeschichtete Foliensbahn ab. Sollte im Zwischenraum darunter aufgrund der Abkühlung der oberen Kunststoffhaut ebenfalls Feuchte auftreten, so gelangt diese geringe Menge auf der unteren Folie nach außen. Auf diese Weise wird das Problem "Schwitzwasser" einfach gelöst.

Der Einbau der Soleleitungen im Dach ist in Bild 3 im Ausschnitt A zu erkennen. Jeweils zwei Kupferrohrleitungen mit einem Innendurchmesser von 19 mm sind auf einem Tragblech in Sicken verlötet. Je ein Tragblech mit zwei Leitungen liegt unter einer Dachwelle. Es wird durch Verschraubung in Langlöchern auf der Dachlattung befestigt. Die einzelnen Längsleitungssysteme sind über Verbindungsleitungen zusammengeschlossen. Zusätzlich sind die Soleleitungen am First über Stahlbänder aufgehängt.

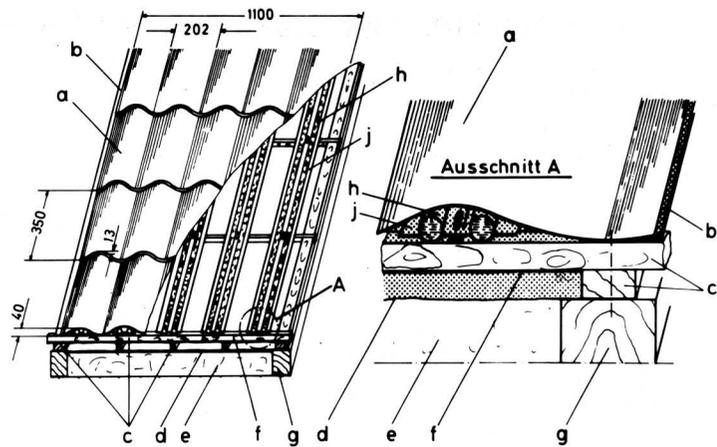


Bild 3. Aufbau des Solekollektor-Solardaches.

- | | |
|-------------------|--------------------|
| a Dachprofil | f Alum.-kaschierte |
| b Gummidichtung | Unterspannfolie |
| c Lattung | g Sparren |
| d Unterspannfolie | h Soleleitung (Cu) |
| e Isolierstoff | j Trägerblech (Cu) |

☐ Luftraum

Einen schematischen Überblick über die Verbindung von Kollektoren, Wärmepumpen und Speichern gibt Bild 4. Der Luftkollektor der Variante 1 ist an eine Luft-Wasser-Wärmepumpe im Innenraum der Versuchsanlage angeschlossen. Diese Wärmepumpe nutzt ebenso wie die an den Solekollektor der Variante 2 angeschlossene Wasser-Wasser-Wärmepumpe die über das Dach gewonnene Energie zur Erwärmung des Wasservorrates im jeweiligen Speicher. Der Solekollektor der Variante 3 dient zur direkten Aufheizung von Brauchwasser über einen Wärmetauscher ohne zwischengeschaltete Wärmepumpe. Um das Betriebsverhalten der Wärmepumpe mit Luftkollektorunterstützung besser bewerten zu können, ist der Speicher der Variante 3 zusätzlich an eine Luft-Wasser-Wärmepumpe gleicher Bauart wie bei Variante 1 angeschlossen, die mit reiner Außenluft betrieben wird (Variante 4). Über Absperrventile kann alternativ diese Wärmepumpe oder der Solekollektor zur Brauchwassererwärmung eingesetzt werden.

Die verwendeten Speicher besitzen ein Behältervolumen von je 300 l. Bei einem angenommenen Warmwasserverbrauch von 75 l pro Person und Tag kann mit dieser Menge der Warmwasserbedarf einer vierköpfigen Familie gedeckt werden [13].

An den verwendeten Luft-Wasser-Wärmepumpen wurde nach Herstellerangaben eine Lufrate von 700 m³/h eingestellt, was bei einer Kollektorfläche von 8 m² einer Strömungsgeschwindigkeit von 2,4 m/s im Kollektor entspricht [14]. Wegen des baulich bedingten geringen Kontakts zwischen Absorber und Soleleitungssystem wurde entgegen den im Schrifttum für die spezifische Durchflußrate bei Wasserkollektoren angegebenen Werten von 60 bis 120 l/m² h nur eine Durchflußrate von 30–40 l/m² h eingestellt, um eine ausreichende Erwärmung der Sole im Kollektor sicherzustellen [15, 16].

3. Durchführung und Ziel der Messungen

Durch eine elektrische Meßwerterfassung werden die Temperaturen der Sole und der Luft, die einfallende globale Bestrahlungsstärke (auch Globalstrahlung) in der Kollektorebene, die flächenbezogenen Massendurchsätze der Luft im Kollektor und die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpen kontinuierlich über eine Datenerfassungsanlage registriert und auf Magnetbändern abgespeichert. Die weitere Auswertung erfolgt mit einem Tischrechner.

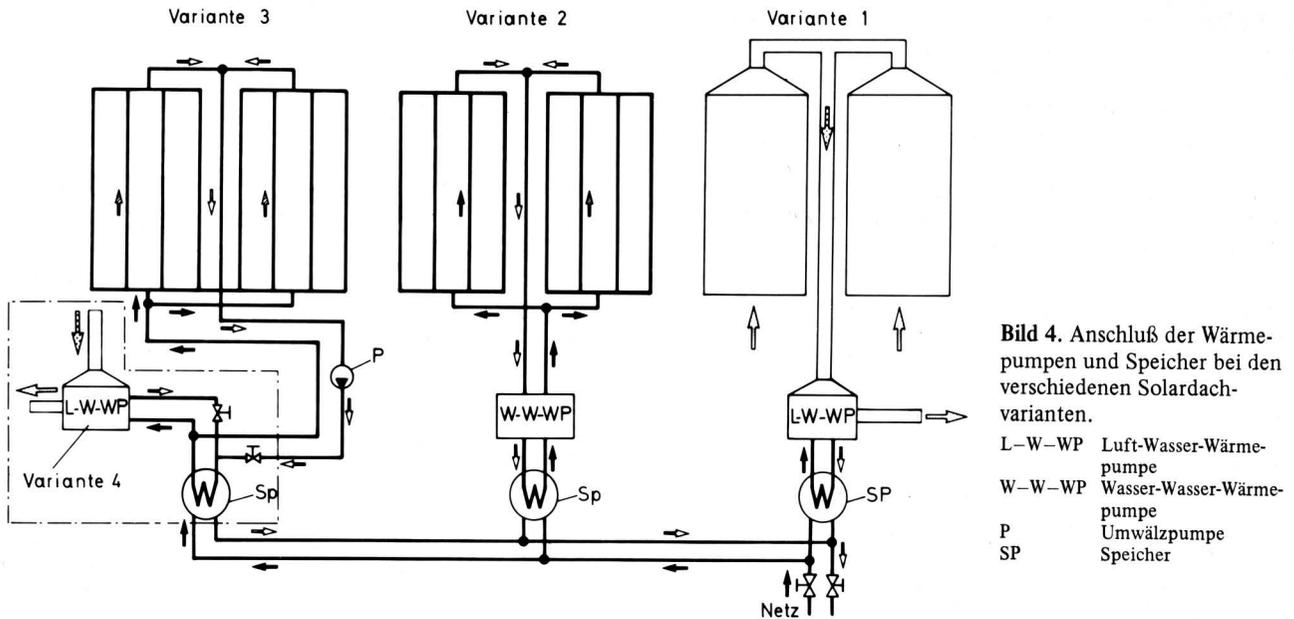


Bild 4. Anschluß der Wärmepumpen und Speicher bei den verschiedenen Solardachvarianten.

- L-W-WP Luft-Wasser-Wärmepumpe
- W-W-WP Wasser-Wasser-Wärmepumpe
- P Umwälzpumpe
- SP Speicher

Ziel der Messungen ist es, ausgehend von einem durch die Temperatur des Leitungswassers bestimmten Niveau, den Anstieg der Brauchwassertemperatur und den systembedingten Verlauf der Leistungsziffern der verschiedenen Wärmepumpen im Tagesgang zu beobachten. Die Leistungsziffer beschreibt hierbei das Verhältnis von gewonnener Heizleistung zu eingesetzter elektrischer Antriebsleistung für den Kompressor. Mit dem von Tag zu Tag unterschiedlichen Globalstrahlungsangebot und den variierenden Außenlufttemperaturen läßt sich aus den Meßergebnissen das Betriebsverhalten der verschiedenen Systeme an charakteristischen Tagen kennzeichnen.

4. Ergebnisse

In zwei Beispielen wird der Anstieg der Speichertemperaturen im Tagesgang für zwei vom Globalstrahlungsangebot deutlich unterschiedliche Apriltage dargestellt. Zu dieser Zeit wurden nur die Varianten 1, 2 und 4, Luftkollektor mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Solekollektor mit Wasser-Wasser-Wärmepumpe und Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Außenluft, betrieben. Der Einsatz der direkten Brauchwassererwärmung (Variante 3) erschien wegen des geringen Globalstrahlungsangebots nicht sinnvoll.

In **Bild 5** ist der Verlauf der Außenlufttemperaturen und der Globalstrahlung in der Kollektorebene am 8. und 20.4.1983 in Göttingen aufgetragen. Die Auswahl dieser Tage erfolgte aufgrund der gerade im April bei ähnlicher Tageslänge starken Witterungsschwankungen.

Am 8.4. ist das Globalstrahlungsangebot in der Kollektorebene extrem niedrig, nur vereinzelt wird die Grenze von 100 W/m^2 überschritten. Die Außenlufttemperaturen erreichen am 8.4. nur kurzfristig $10 \text{ }^\circ\text{C}$ und liegen bis 15 Uhr unter $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Am 20.4. steigen dagegen die Außenlufttemperaturen bis auf fast $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Dieser Tag weist zudem ein im Tagesverlauf deutlich zu- und abnehmendes Strahlungsenergieangebot mit teilweise sehr hohen Bestrahlungsstärken auf, so daß er deutlich günstigere Voraussetzungen für die Kollektornutzung bietet. Wenn auch die Intensität infolge Bewölkungszu- und -abnahme stark schwankt, so ist das Strahlungsenergieangebot im Mittel doch beträchtlich höher als am 8.4.

Den Anstieg der Speichertemperaturen im Tagesverlauf zeigt für den 8.4. **Bild 6**. Aus dem Kurvenverlauf ist zu erkennen, daß bei dem am 8.4. niedrigen Temperatur- und Strahlungsangebot keine bedeutenden Unterschiede zwischen den beiden mit Luft-Wasser-Wärmepumpen beheizten Systemen bestehen. Bei der Variante mit Wasser-Wasser-Wärmepumpe ist dagegen ein steilerer Kurvenverlauf zu erkennen, der eine relativ schnellere Aufheizung des Speichers kennzeichnet. Dieser stärkere Anstieg der Kurve ist auf die höhere

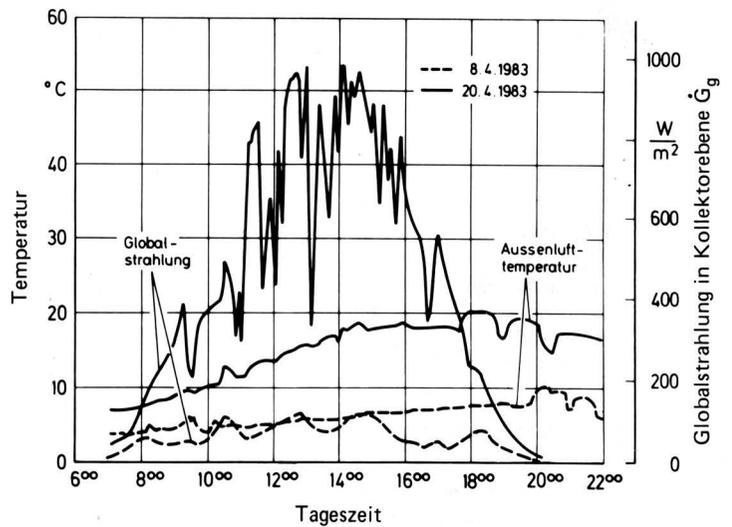


Bild 5. Tagesverlauf der Außentemperatur und der Globalstrahlung in Kollektorebene in Göttingen am 8.4. und 20.4.1983.

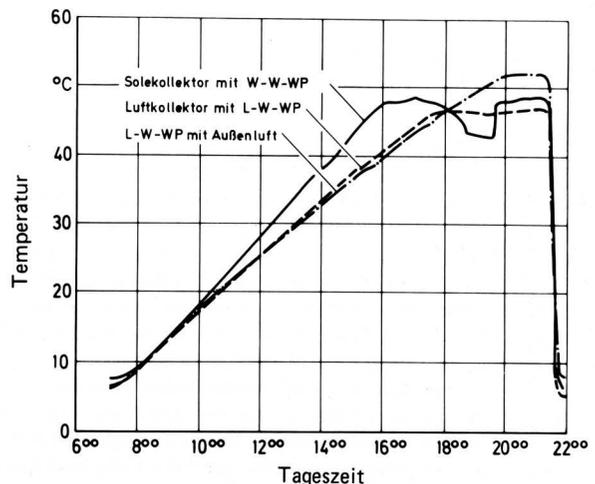


Bild 6. Verlauf der Speichertemperaturen am 8.4.1983.

elektrische Anschlußleistung des Kompressors der Wasser-Wasser-Wärmepumpe zurückzuführen. Sie liegt mit 1,2 kW etwa doppelt so hoch wie die der beiden anderen Wärmepumpen. Wegen der fehlenden Solarstrahlung ist am 8.4. durch die Verwendung des Kollektors keine Beschleunigung des Temperaturanstiegs des Brauchwassers gegeben.

Dies sieht am 20.4. deutlich anders aus, wie Bild 7 zeigt. Hier kann durch Kollektorunterstützung der Luft-Wasser-Wärmepumpe eine deutliche Beschleunigung des Temperaturanstiegs im Speicher gegenüber reiner Außenluftverwendung bewirkt werden.

Obleich gegen 10 Uhr der Anstieg der Temperatur im System Solekollector-Wasser-Wärmepumpe stärker wird als der des Systems Luftkollector mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, erreichen beide Varianten das über einen Thermoschalter im Speicher festgelegte Abschaltniveau von ca. 48 °C nahezu gleichzeitig, was auf den flacheren Kurvenverlauf des Solekollectors gegenüber dem des Luftkollectors zurückzuführen ist. Begründet ist dieses Abflachen der Kurve in einem mit höheren Speichertemperaturen einsetzenden Taktbetrieb der Wasser-Wasser-Wärmepumpe.

Der Vergleich der beiden mit Luft-Wasser-Wärmepumpen betriebenen Varianten macht hingegen deutlich, daß durch den Luftkollectoreinsatz ein beschleunigter Anstieg der Wassertemperatur möglich ist. Der Kollektor verbessert folglich die Leistungsziffer der Wärmepumpe.

Zur Ermittlung der Leistungsziffern wurden ebenfalls Tage herangezogen, die sich in bezug auf Globalstrahlungsangebot und Höhe der Außenlufttemperaturen deutlich unterschieden.

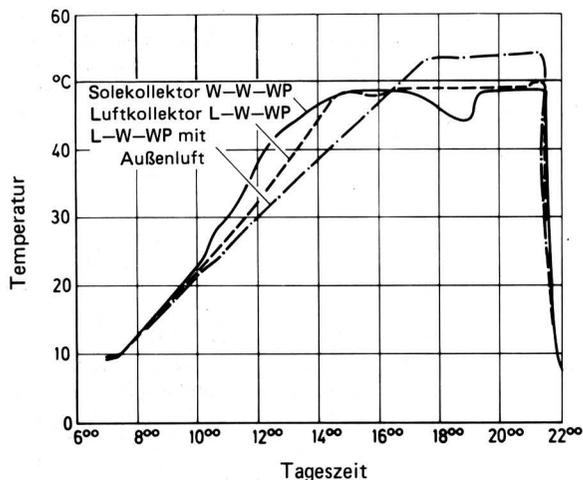


Bild 7. Verlauf der Speichertemperaturen am 20.4.1983.

Bild 8 zeigt den charakteristischen Verlauf der Leistungsziffer einer Luft-Wasser-Wärmepumpe in Verbindung mit dem Speicher im Tagesgang. Die Schraffur gibt die Streuung der Meßwerte an. Mittels Regressionsanalyse ist den Punkten für die Meßergebnisse mit hohem Bestimmtheitsmaß eine Gerade zuzuordnen. Diese System-Leistungsziffer nimmt im Tagesgang ab, als Folge der mit fort-dauerndem Betrieb ständig steigenden Wassertemperatur im Speicher. Dies bewirkt eine kontinuierliche Abnahme der an das Brauchwasser abgegebenen Wärmemenge und damit eine Erwärmung des Wassers im Sekundärkreislauf zwischen Wärmepumpen und Speicher. Daraus resultiert eine Zunahme der Kältemitteltemperatur und damit des Kältemittel-druckes, wodurch die Leistungsaufnahme des Kompressors ständig erhöht wird. Ein Absinken der Leistungsziffer ist zwangsläufig die Folge.

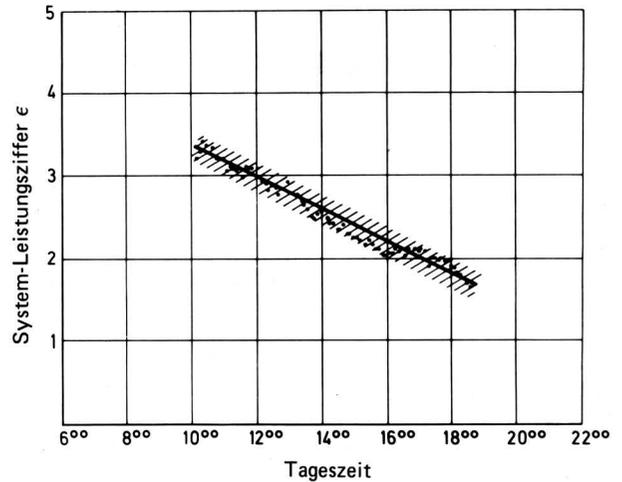


Bild 8. System-Leistungsziffer von Wärmepumpe und Wasserspeicher für die Luft-Wasser-Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Tageszeit.

In Bild 9 ist der Verlauf der Leistungsziffern der Wärmepumpen an einem bedeckten Tag mit Außenlufttemperaturen im Bereich um 10 °C aufgetragen. Da beide Luft-Wasser-Wärmepumpen baugleich sind, können Unterschiede im Verlauf der Leistungsziffern bei gleicher Einstellung der Luft- und Wasserdurchsätze nur aus einem unterschiedlichen Energieangebot der verwendeten Luft resultieren. Diese Luft kann mangels genügender Einstrahlung auch durch den Kollektor nicht weiter erwärmt werden, so daß beide Luft-Wasser-Wärmepumpen mit gleicher Leistungsziffer arbeiten. Die Wasser-Wasser-Wärmepumpe erreicht an diesem Tag nur eine Leistungsziffer im Bereich um 1.

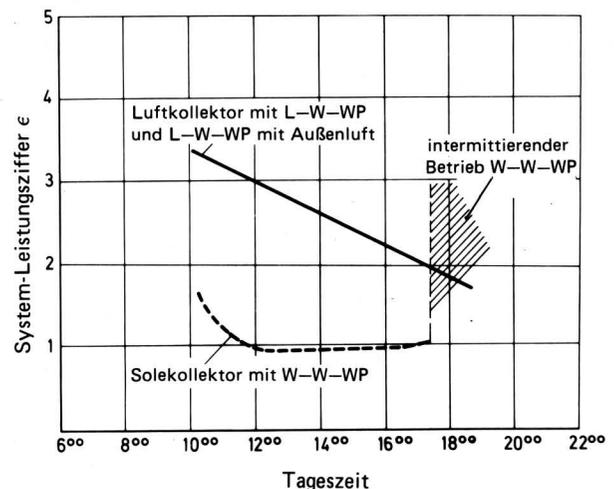


Bild 9. System-Leistungsziffer in Abhängigkeit von der Tageszeit für die verschiedenen Versuchsvarianten bei ungünstigen Strahlungs- und Außenlufttemperaturbedingungen.

An einem Tag mit Außenlufttemperaturen zwischen 15 und 20 °C und stark schwankendem, aber zeitweilig sehr intensivem Globalstrahlungsangebot ergeben sich deutlich unterschiedliche Verläufe der Leistungsziffern der drei Systeme, Bild 10. Die Laufzeit der Wärmepumpen mit Kollektorunterstützung ist mit 6,75 h um 2,25 h kürzer als bei der Variante mit reinem Außenluftbetrieb. Dies drückt sich auch in der deutlich höheren Leistungsziffer der solarkollektorunterstützten Luft-Wasser-Wärmepumpe aus. Auffällig ist die trotz des Anschlusses an den Solekollector sehr niedrige Leistungsziffer der Wasser-Wasser-Wärmepumpe.

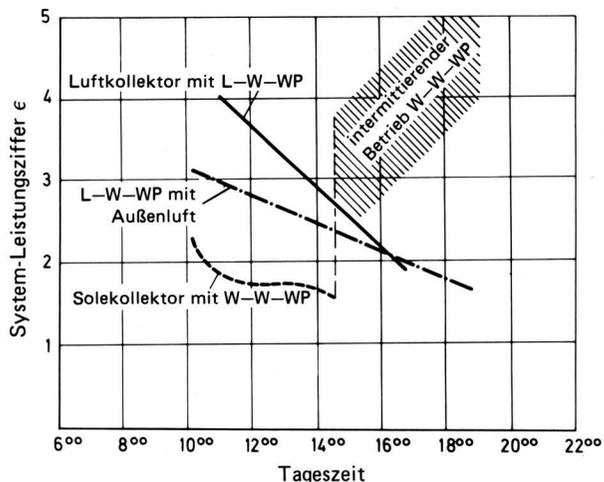


Bild 10. System-Leistungsziffer in Abhängigkeit von der Tageszeit für die verschiedenen Versuchsvarianten bei mittleren Strahlungs- und Außenlufttemperaturbedingungen.

Das geringe Niveau der Leistungsziffer dieser Wärmepumpe bestätigt sich auch an einem klaren Sommertag mit Außenlufttemperaturen von 25–30 °C und sehr hohem und gleichmäßigem Globalstrahlungsangebot, **Bild 11**. Dann erreicht die kollektorunterstützte Luft-Wasser-Wärmepumpe sogar Leistungsziffern zwischen 4 und 5. Bemerkenswert ist, daß trotz der ohnehin hohen Außenlufttemperaturen durch den Einsatz des Kollektors noch eine weitere Steigerung der Leistungsziffer gegenüber Verwendung reiner Außenluft möglich ist. Es stellt sich allerdings die Frage, warum die Leistungsziffer der Wasser-Wasser-Wärmepumpe nicht nennenswert verbessert werden konnte.

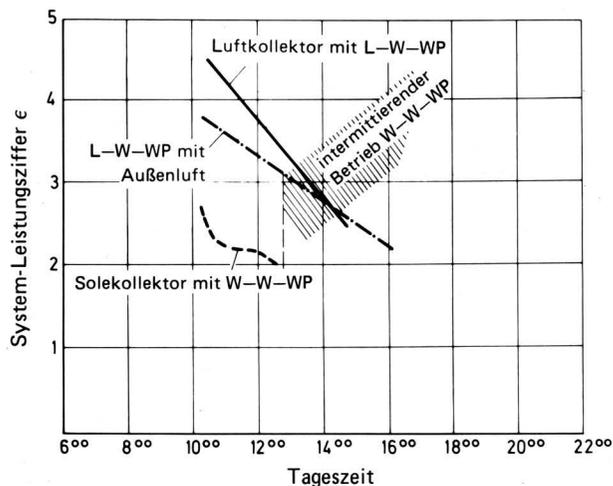


Bild 11. System-Leistungsziffer in Abhängigkeit von der Tageszeit für die verschiedenen Versuchsvarianten bei sehr günstigen Strahlungs- und Außenlufttemperaturbedingungen.

Die Ursache hierfür ist im einfachen Einbau der Soleleitungen in den Dachinnenraum ohne direkten Kontakt mit dem Absorber zu sehen. Der Wärmeübergang kann folglich nur durch Konvektion und Strahlung erfolgen, was zu einem verminderten Wärmeabtrag von der Dachhaut führt. Diese Tatsache veranschaulicht **Bild 12**. Dort ist die Temperaturdifferenz zwischen Kollektoraus- und eintritt dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß trotz steigender Globalstrahlung in der Kollektorebene die Temperaturdifferenz der Sole im Vergleich zur Luft nur sehr geringfügig anwächst.

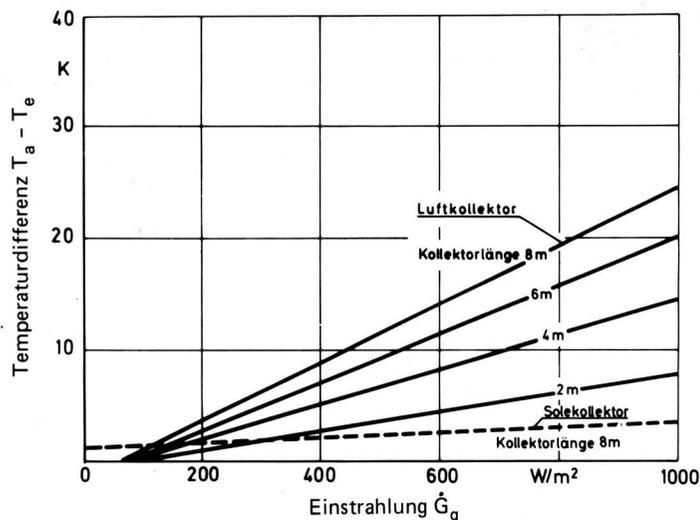


Bild 12. Temperaturdifferenz zwischen Aus- und Eingang für verschiedene Kollektoren als Funktion der Globalstrahlung.

Diese unzureichende Wärmeübertragung ist ebenfalls der Grund dafür, daß bei der direkten Brauchwassererwärmung ohne zwischengeschaltete Wärmepumpe die Temperaturdifferenzen zwischen der in den Kollektor eintretenden und der austretenden Sole nur gering ausfallen. In **Bild 13** ist der Verlauf der Soletemperaturen am Kollektorein- und -austritt und die Brauchwassertemperatur im Speicher an einem klaren Sommertag im Juni wiedergegeben. Es wird deutlich, daß die maximalen Soletemperaturen selbst bei einer Absorberfläche von 16 m² nur im Bereich von 40–50 °C liegen. Daher kann die Wassertemperatur im Speicher wegen der auftretenden Leitungs- und Übertragungsverluste beim Wärmeübergang nur geringfügig über 40 °C ansteigen. Durch Verwendung eines kleineren Speichers und verringerte Soledurchflußraten im Kollektor dürften mit diesem System an klaren Sommertagen dennoch Temperaturen von 50 °C zu erzielen sein.

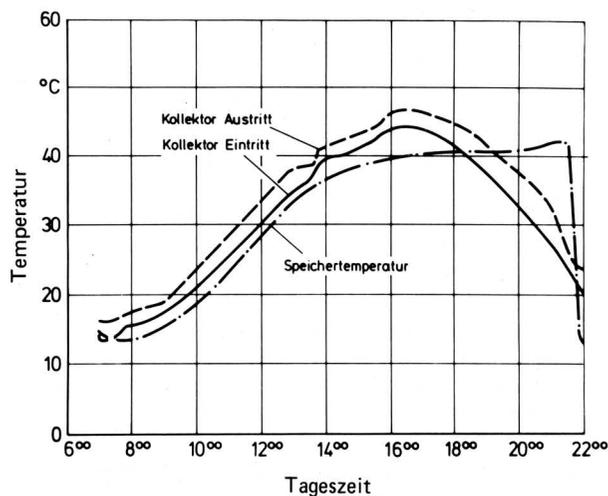


Bild 13. Tagesverlauf der Speicher- und Soletemperatur bei der direkten Brauchwassererwärmung an einem klaren Sommertag.

5. Ökonomische Bewertung

Die für den Aufbau und den Betrieb der Anlage anzusetzenden Kostenfaktoren gibt **Tafel 1** wieder. Die Installationskosten für den jeweiligen Kollektoraufbau wurden pauschaliert. Die jährliche Einsatzdauer der Anlage wird für die Monate Mai bis September mit 153 Tagen angenommen. Für die Kalkulation der Betriebskosten

	1	2	3	4
System	Luftkollektor 8 m ² mit L-W-WP	Solekollektor 8 m ² mit W-W-WP	Solekollektor 16 m ² direkte Brauch- wassererwärmung	— Außenluft L-W-WP
Kosten				
Investitionskosten in DM				
Wärmepumpe	2500	2500	—	2500
Speicher (300 l)	1700	1700	1700	1700
Umwälzpumpe	—	150	150	—
Material (Umbau/Kollektor)	50	850	1700	—
Lohnkosten	500	1500	2000	250
Summe Investitionskosten	4750	6700	5550	4450
Betriebskosten				
tägl. Energiebedarf für Brauchwasser (300 l; $\Delta T = 40\text{ K}$) in kWh/d	13,94	13,94	13,94	13,94
ϕ Leistungsziffer (Mai–Sept.)	3,00	1,75	—	2,40
ϕ tägl. Bedarf an El.-Energie für die Wärmepumpe in kWh/d	4,65	7,97	—	5,81
tägl. Stromkosten (0,3 DM/kWh) in DM/d	1,40	2,39	—	1,74
Gesamtkosten in DM				
Stromkosten (Mai–Sept./153 Tage)	214,20	365,67	100	266,22
Abschreibung Wärmepumpe (12 %)	300	300	—	300
Abschreibung übrige Anlage (6,7 %)				
mit Speicher	150,75	281,40	371,85	130,65
ohne Speicher	(36,85)	(167,50)	(257,95)	(16,75)
Summe der Kosten				
mit Speicher	664,95	947,07	471,85	696,87
ohne Speicher	(551,05)	(833,17)	(357,95)	(582,97)
Bezogene Kosten der Brauchwasser- bereitung in DPf/l				
mit Speicher	1,45	2,06	1,03	1,52
ohne Speicher	(1,20)	(1,82)	(0,78)	(1,27)
Zum Vergleich: Kosten der Brauchwasser- bereitung mit Heizöl (Mai–Sept.) $\eta_{\text{Kessel}} = 25\%$; Ölpreis 0,85 DM/l		1,5 DPf/l		

Tafel 1. Kostenvergleich der verschiedenen Versuchsvarianten.

der Wärmepumpen wird die für einen vom Strahlungsangebot mittleren Tag in dieser Zeit gemessene Systemleistungsziffer zugrunde gelegt. Die Wärmepumpen werden über einen Zeitraum von 8 Jahren linear mit 12 % und die übrige Anlage in 15 Jahren mit 6,7 % abgeschrieben. Die Kostenkalkulation wird alternativ für den Aufbau der Systeme mit und ohne Speicher durchgeführt, da es denkbar ist, einen bereits für die konventionelle Brauchwassererwärmung vorhandenen Speicher zu nutzen.

Damit ergeben sich die in den untersten Zeilen der Tafel angegebenen Kosten für die Erwärmung von 1 l Warmwasser auf 50 °C. Die Werte für die direkte Brauchwassererwärmung im Kollektor (Variante 3) sind zur Vervollständigung aufgenommen, haben aber für unsere klimatischen Verhältnisse wegen des geringen Globalstrahlungsangebots keine Bedeutung.

Vergleicht man diese Kosten mit den in der letzten Zeile aufgeführten Kosten bei ausschließlichem Ölbrennerbetrieb zur Brauchwassererwärmung während des gleichen Zeitraums, so wird deutlich, daß die beiden Luft-Wasser-Wärmepumpen-Systeme je nach Kalkulation der Speicherkosten sogar etwas günstiger zu beurteilen sind.

6. Zusammenfassung

Das in einer Pilotanlage untersuchte Luftkollektorsystem erscheint für den praktischen Einsatz geeignet, wenn der verwendeten Wärmepumpe von 0,7 kW Anschlußleistung in der Zeit von Mai bis September eine Absorberfläche von 8 m² zugeordnet wird. Um mit dieser Dachfläche auch den Energiebedarf der verwendeten

Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit 1,2 kW Anschlußleistung sicherzustellen, bedarf es einer Verbesserung des Wärmeübergangs zwischen Absorber und Soleleitungssystem.

Die Nutzung des Solesystems zur direkten Brauchwassererwärmung ist unter günstigen klimatischen Bedingungen bei richtiger Zumessung von Speichergröße und Absorberfläche durchaus möglich, doch sollte auch hier der Wärmeübergang vom Absorber zur Einsparung von Kollektorfläche verbessert werden. Diese Variante ist sicherlich für Länder mit sonnenreicherem Klima eine kostengünstige Alternative.

Insgesamt zeigt die Kostenkalkulation, daß besonders das verwendete Luftkollektorsystem im Vergleich zur konventionellen Brauchwassererwärmung mit Öl in der Zeit von Mai bis September eine günstigere Alternative darstellen kann.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Dernedde, W. u. H. Peters*: Wirkungsgrade von Solar-Luftkollektoren für Trocknungsanlagen. Landtechnik Bd. 33 (1978) Nr. 1, S. 29/30.
- [2] *Hartmann, W.*: Trocknung von Getreide und Halmfutter mit solar erwärmter Luft in Satz-trocknungsanlagen. Diss. Univ. Göttingen, 1979.
- [3] *Wieneke, F.*: Stand und Aussichten der Solartechnik in der Landwirtschaft. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 1, S. 1/6.

- [4] *Schulz, H.*: Einsatz von Solarenergie in der Landwirtschaft. Statusbericht des BMFT "Nutzung der Sonnenenergie in der Landwirtschaft". Weihenstephan (1982) S. 2/11.
- [5] *Ratschow, J.-P. u. H.-G. Claus*: Nutzung der Sonnenenergie in der Landwirtschaft. Landtechnik Bd. 33 (1978) Nr. 1, S. 18/21.
- [6] *Grimm, W.*: Messungen an Solarkollektoren für die Landwirtschaft. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 5, S. 149/55.
- [7] *Grimm, W.*: Anwendung, Aufbau und Arbeitscharakteristik von Solardach-Luftkollektoren in der Landwirtschaft. Diss. Univ. Göttingen, 1983.
- [8] *Lücke, W.*: Vergleichende Hallen- und Freilandversuche an Solardach-Kollektoren. Diss. Univ. Göttingen, 1983.
- [9] *Stutterheim, W. u. M. Hesse*: Energiesituation in der Land- und Forstwirtschaft der Bundesrepublik Deutschland. Ber. über Landwirtschaft, Band 59, S. 201/37. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey, 1981.
- [10] *Krämer, K.*: Verwendung der Solarenergie in der Haustechnik. Karlsruhe: Promotor Verlag, 1978.
- [11] Unterlagen der Firma KAMI, Schweden.
- [12] *Hell, F.*: Grundlagen der Wärmeübertragung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1973.
- [13] Unterlagen der Firma EAM, Kassel.
- [14] Unterlagen der Firma HEYLO, Sarstedt.
- [15] *Daniels, K.*: Einsatz von Solarenergie. In: Heizen mit Sonne. Tagungsbericht der DGS. Göttingen (1976) S. 279/330.
- [16] *Sabady, P.R.*: Wie kann ich mit Sonnenenergie heizen? Zürich: Helion Verlag, 1977.

Grundlagen zur Berechnung und Dimensionierung von großflächigen Sonnenkollektoren zur Luftanwärmung

Von Wulf Grimm, Göttingen*)

DK 620.91:697.329

Mit steigenden Kosten für fossile Energieträger gewinnt auch in der Landwirtschaft die Nutzung der Sonnenenergie an Bedeutung. Die Kollektorentwicklung hat mit großflächig verlegbaren Solardach-Luft-Kollektoren einen gewissen Abschluß gefunden. Die unter künstlicher und natürlicher Bestrahlung für diese Kollektorbauform gewonnenen Meßergebnisse werden durch eine thermische Leistungsbilanz ergänzt. Das Berechnungsverfahren erlaubt die Quantifizierung der einzelnen Verlustwärmeströme und gestattet eine rechnerische Überprüfung konstruktiver Änderungen zur Verbesserung des Kollektorwirkungsgrades. Die vorgestellten Meß- und Berechnungsverfahren können als Grundlage für Kollektorprüfungen angesehen werden.

1. Einleitung

Die thermische Nutzung der Solarenergie als Niedertemperatur-Wärmequelle erlangt zunehmende Bedeutung. Aufgrund der relativ geringen Energiedichte mit maximalen Tagessummen der Einstrahlung von 4,5 bis 5,5 kWh/m², der täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen sowie der fehlenden Speichertechnologie scheinen sich auf absehbare Zeit nur solche Kollektorsysteme durchzusetzen, die sich mit geringen Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten in einem überschaubaren Zeitraum amortisieren.

Zur Deckung des Wärmeenergiebedarfs für landwirtschaftliche Trocknungsanlagen wurden bisher Flachkollektoren in selbsttragender Bauweise, Folienkollektoren und Solardach-Luft-Kollektoren entwickelt. Vor allem die letztere Bauform bietet mit großflächigen und preisgünstigen Anlagen gute Aussichten, einen ansehnlichen Anteil zur solaren Energiegewinnung beizutragen. Sie nutzt die ohnehin vorhandene Dachhaut eines Gebäudes als nicht abgedeckten Absorber mit großer Haltbarkeit und optisch ansprechender Formgebung.

Zur Optimierung des konstruktiven Aufbaus dieser Kollektoren nach ökonomischen und technologischen Gesichtspunkten bieten sich einerseits kostspielige und zeitintensive Messungen auf Prüfständen mit natürlicher und künstlicher Sonnenbestrahlung und andererseits theoretische Abschätzungen an. Mit einem mathematischen Modell können das Betriebsverhalten der Kollektoren, die Oberflächentemperaturen der einzelnen Bauteile und die Verlustwärmeströme unter verschiedenen klimatischen Bedingungen und Betriebszuständen ermittelt werden.

In verschiedenen Veröffentlichungen werden die Grundlagen zur Energiegewinnung mit Kollektoren dargelegt. Sie betreffen jedoch entsprechend der größeren Verbreitung zumeist die zur Wassererwärmung vorgesehenen Flachkollektoren mit einer oder mehreren transparenten Abdeckungen [1 bis 3].

2. Aufbau des Solardach-Luft-Kollektors

Den prinzipiellen konstruktiven Aufbau eines Solardach-Luft-Kollektors zeigt als Beispiel **Bild 1** in zwei Varianten. Auf die Dachsparren *e* wird eine Hartfaserplatte *g* als Kollektorboden aufgelegt. Mit der Konterlatte *c* und der Dachlatte *b* entsteht ein ausreichend großer Strömungskanal zwischen dem Absorber aus Metall *a* und dem Kollektorboden *g*. Die quer zur Strömungsrichtung verlaufende Dachlatte wirkt als Verwirbelungssteg für die Luft und verbessert somit den Kollektorwirkungsgrad. Gegenüber einer konventionellen Dacheindeckung erfordert der Solardach-Luft-Kollektor bei

*) *Dipl.-Ing. W. Grimm* ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Agrartechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke) der Georg-August-Universität Göttingen.