

Auswirkungen von
Fassadenbegrünungen auf den
Wärme - und Feuchtigkeitsgehalt von
Aussenwänden und Schadensrisiko

F 2129

F 2129

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen -BMVBW- geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Bereich Wärme / Klima

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Karl A. Gertis

Amtlich anerkannte Prüfstelle für die Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten · Forschung, Prüfung und Beratung auf dem Gebiet der Bauphysik

IBP-Bericht FtB - 4/1989

Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf den Wärme- und Feuchtehaushalt von Außenwänden und Schadensrisiko.

Das Vorhaben wurde gefördert aus Mitteln
des Bundesministeriums für Raumordnung,
Bauwesen und Städtebau
(Az.: B I 6 - 80 01 85 - 207)

und der Gips-Schule-Stiftung, Stuttgart.

Der Bericht umfaßt:
40 Seiten Text
4 Tabellen
19 Bilder

Der Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau	
Abschluß/Zwischen-Bericht zum Forschungs-Auftrag	
Az.: B I 5 - 80 01 85 - 207	Eng.: 21.4.89
Sammlung der Forschungs-Berichte des Referats	Nr. F 2129

Holzkirchen, den 6. April 1989

Sachbearbeiter

Rath

Dipl.-Met.
J. Rath

Abteilungsleiter

Kiebl

Dr.-Ing.
K. Kiebl

Institutsleiter

Gertis

Prof. Dr.-Ing. habil.
K.A. Gertis

IBP-Bericht FtB - 4/1989

Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf den Wärme- und
Feuchtehaushalt von Außenwänden und Schadensrisiko.

von

Dr.-Ing. K. Kießl und Dipl.-Met. J. Rath

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)
Bereich Wärme/Klima
(Leitung: o. Prof. Dr.-Ing. habil. K.A. Gertis)

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung

2. Aussagen gemäß Literatur

- 2.1 Arten und Eigenschaften von Kletterpflanzen
- 2.2 Argumentationen zur Fassadenbegrünung

3. Durchzuführende Untersuchungen und Meßobjekte

- 3.1 Bauphysikalische Parameter
- 3.2 Meßobjekte
- 3.3 Untersuchungsplan und Meßaufbau

4. Untersuchungsergebnisse

- 4.1 Wärmetechnisches Verhalten
 - 4.1.1 Strahlung
 - 4.1.2 Wind
 - 4.1.3 Temperaturen
 - 4.1.4 Rechnerische Modellierung
 - 4.1.5 Thermische und energetische Modellrechnungen

- 4.2 Feuchtetechnisches Verhalten
 - 4.2.1 Luftfeuchte - Oberflächenfeuchte
 - 4.2.2 Schlagregen
 - 4.2.3 Bauteilfeuchte

- 4.3 Schadensrisiken

- 4.4 Schadgaskonzentrationen

5. Zusammenfassung und praktische Bewertung

6. Literatur

1. Aufgabenstellung

In nahezu allen Stadtzentren sind heute mehr als 90 % der Bodenoberfläche durch Gebäude, Straßen, Wege und asphaltierte Plätze bedeckt. Der spürbare Wunsch nach mehr Grün im städtischen Lebensraum stößt auf das Problem, daß zu wenig Platz für flächige Begrünungsmaßnahmen vorhanden ist. Eine Lösung dieses Problems könnte lauten, Begrünungen nicht am Boden, sondern an den Hausfassaden durchzuführen. Das Für und Wider ist in den letzten Jahren in Zeitschriften und Büchern unter ökologischen, stadtklimatischen, heizungstechnischen und bauphysikalischen Aspekten intensiv und auch kontrovers diskutiert worden. Dabei war es jedoch nur wenigen Autoren möglich, ihre Aussagen durch gemessene Daten zu belegen.

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist es, an ausgewählten begrünten Objekten, und zwar jeweils durch vergleichende Messungen in begrünten und unbegrünten Bereichen einer Fassade, die bauphysikalischen Auswirkungen der Begrünung hinsichtlich Mikroklima vor der Wandoberfläche, Klimaeinflüssen auf die Außenoberfläche, Wärme- und Feuchtwirkungen in der Wand sowie eventuelle Schädigungsrisiken infolge von Begrünungen meßtechnisch festzustellen und zu bewerten. Da insbesondere die klimatischen Effekte, wie z.B. Perioden mit extremen oder nur geringfügigen Schwankungen unter Sommer- oder Winterverhältnissen, und deren Bedeutung für das thermische und hygri sche Verhalten der begrünten Außenwand kaum durch kurzzeitige Messungen festgestellt werden können, sind längerfristige Meßkampagnen an entsprechenden Objekten erforderlich. Hierdurch werden Antworten auf folgende Fragen erwartet:

- Wie verändert sich das Mikroklima in der Begrünung?
- Sind Auswirkungen auf stadtklimatische Verhältnisse zu erwarten?
- Verringert sich der Heizwärmeverlust durch Fassadenbegrünungen tatsächlich?
- Ist ein begrüntes Mauerwerk feuchter oder trockener als ein unbegrüntes?

- Ist mit Schädigungsrisiken an der Wandaußenoberfläche, z.B. bei Putzen, zu rechnen?
- Wirken sich Fassadenbegrünungen auf die Schadgasbelastung der Wandoberfläche aus?

Auch wenn die Untersuchungen nur exemplarisch an Einzelobjekten über ca. einen Jahreszyklus durchgeführt werden können, so zeichnen sich daraus Möglichkeiten für eine Erweiterung der praktischen Informationsbasis ab, wie z.B. konkrete Angaben über wärme- und feuchteschutztechnische Effekte oder Hilfestellung bei planerischen bzw. baukonstruktiven Aufgaben oder Bestätigung, Präzisierung bzw. Korrektur bisher vorliegender Aussagen.

2. Aussagen gemäß Literatur

Die vorliegende Literatur über Fassadenbegrünungen kann in drei Gruppen eingeteilt werden. Viele Autoren betrachten das Thema nur von der biologisch-gärtnerischen Seite. Andere leiten aus grundlegenden theoretischen Betrachtungen Argumente pro und contra Fassadenbegrünung ab. Eine dritte Gruppe belegt physikalisch technische Aussagen auch durch Messungen. Ausgehend von einer Übersichtsdarstellung über Begrünungsarten werden im folgenden Argumentationen zusammengestellt, so wie sie heute in der Literatur vorzufinden sind.

2.1 Arten und Eigenschaften von Kletterpflanzen

Neben wenigen anderen Bepflanzungen, wie z.B. Spalierobst, eignen sich vor allem Kletterpflanzen zur Begrünung von Fassaden. Sie bilden keine selbständigen Sprosse aus, wachsen aber mit Hilfe eines tragfähigen Untergrundes bzw. anderer Stützen senkrecht nach oben. Die unterschiedlichen Pflanzenarten halten sich mit verschiedenen Techniken an den Kletterhilfen fest. So gibt es:

Selbstklimmer,

wie z.B. den dreilappigen Wein, Efeu oder Kletterhortensie. Sie benötigen nur einen tragfähigen Untergrund, auf dem sie sich mit Hilfe von Haftscheiben oder Haftwurzeln festhalten.

Windende Arten,

wie das Geißblatt oder den Hopfen. Sie benötigen Stützvorrichtungen (Stangen), um die sie sich herumwinden können.

Rankende Arten,

wie Clematis und Wein. Sie halten sich mit Greif- oder Wickelranken an den Kletterhilfen fest.

Spreizklimmer,

wie z.B. Kletterrose oder Brombeere. Diese Gattungsart besitzt Stacheln, Dornen oder Klimmhaare, mit deren Hilfe sich die Pflanzen an Ästen oder Kletterhilfen einhaken können.

Alle Kletterpflanzen haben die Eigenschaft gemeinsam, bei Nutzung von kleinen horizontalen Bodenflächen eine Fülle an Biomasse zu erzeugen. Welche Pflanzenart zu welchem Zweck am besten geeignet ist, kann aus der Literatur [8, 12, 17, 18, 19, 22, 28, 29] ersehen werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die am häufigsten verwendeten Kletterpflanzen, deren maximalen Kletterhöhen und die von der Pflanze bevorzugten Lichtverhältnisse, ob sie sommer- oder immergrün sind und ob sie spezielle Anforderungen an ihren Standort stellen. Diese Tabelle stellt eine Allgemeinübersicht dar und kann die Beratung durch einen erfahrenen Fachmann im jeweiligen Einzelfall nicht ersetzen.

2.2 Argumentationen zur Fassadenbegrünung

In vielen Veröffentlichungen werden die positiven Eigenschaften von Kletterpflanzen beschrieben. Nur wenige Autoren beschäftigen sich kritisch mit ihren Auswirkungen. Die meisten der Veröffentlichungen

basieren auf theoretischen Überlegungen, die mit Beobachtungen belegt werden. Nur wenige Autoren können auf gemessene Daten zurückgreifen und ihre Aussagen somit auf faktisch gesicherte Erkenntnisse stützen. Die Argumentationen der beiden letztgenannten und hier als wesentlich betrachteten Gruppen können wie folgt zusammengefaßt und mit Anmerkungen versehen werden:

a) Aussagen aufgrund theoretischer Überlegungen und Beobachtungen:

- Verbesserung der Wärmedämmung durch Luftpolsterbildung
[11, 14, 21, 22, 23, 25, 26, 30]
- Verringerung des Wärmeverlustes durch Abhalten des Windes
[21, 22, 25, 26, 30]
- Verringerung des Wärmeverlustes durch Änderung der langwelligen Strahlungsverhältnisse
[21, 22, 30]

Diese Feststellungen sind aufgrund bekannter physikalischer Zusammenhänge tendenziell richtig. Die Reduzierung des konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeübergangs an der Wandaußenoberfläche unter der Begrünung muß den Wärmeverlust verringern. Von einer Wärmedämmwirkung zu sprechen, erscheint jedoch überzogen, da der Anteil des äußeren Wärmeübergangs am Gesamt-Wärmedurchgangswiderstand auch unter Berücksichtigung der Begrünung relativ gering ist. Außerdem besitzt eine Begrünung wohl kaum die Wirkung einer ruhenden Luftschicht, sondern eher die einer hinterlüfteten Fassade. Wie man mit einfachen k-Wert-Abschätzungen zeigen kann, bewirkt eine dementsprechende Reduzierung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten von $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf $12 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei exzellent gedämmten Außenwänden (k-Wert ca. $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) eine Abminderung des Transmissionswärmeverlustes um etwa 1 %, bei minimalem Wärmeschutz (k-Wert ca. $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) um etwa 5 %. Inwieweit Strahlungsabsorption, Konvektion und Luftaustausch in der Begrünung diese vereinfachte Abschätzung korrigieren, wird sich aus den durchzuführenden Untersuchungen ergeben.

- Wärmerückgewinnung durch Kondensationswärme aus Tauwasserbildung

[21, 22, 30]

- Umwandlung von Windenergie in Wärme

[21, 22, 30]

Es ist nicht nachvollziehbar, daß die im Blattwerk bei möglicher Tauwasserbildung oder durch Strömungseffekte freigesetzte Wärme die Außenwand beeinflussen kann. Zudem würden durch Verdunstungs- und Konvektionseffekte derartige Wärmemengen wieder kompensiert.

- Mechanische und thermische Bremsung der Luftbewegung

[21, 22, 30]

Dies gilt wohl für den Bereich des Blattwerks, in geringem Abstand davor dürfte dieser Effekt aber ohne Bedeutung für Wand oder Mikroklima sein.

- Kühlwirkung durch Verdunstung sowie durch Absorption und Reflexion der Sonnenstrahlung im Blattwerk

[5, 11, 12, 13, 14, 17, 20 - 26, 29, 30]

Mit derartigen Effekten ist zu rechnen. In südlichen Ländern werden Begrünungen als sommerlicher Wärmeschutz genutzt.

- Feuchteproduktion durch Verdunstung

[1 - 9, 11 - 15, 17 - 26, 28 - 31]

Begrünungen besitzen zwar relativ große Blattoberflächen, die Wassernachfuhr ist aber meist nur in eingeschränktem Umfang möglich. An warmen und strahlungsreichen Tagen beschränkt sich die Verdunstung auf die Morgen- und Abendstunden. Zudem ist nicht gesichert, wie stark Feuchteproduktionen im Blattwerk auf die Außenwand wirken.

- Erhöhte Fugendichtigkeit durch Verringerung des Winddruckes

[21, 22, 30]

Unter Regenschutzgesichtspunkten steht eher die Reduzierung der Schlagregenbeanspruchung durch das Blattwerk im Vordergrund.

- Sauerstoffproduktion und CO₂-Abbau

[1 - 9, 11 - 15, 17 - 26, 28 - 31]

Biologisch betrachtet ist dies korrekt, Meßwerte über entsprechende Konzentrationserhöhungen bzw. -reduzierungen im Blattwerk liegen jedoch nicht vor.

- Schutz der Fassade vor starker Temperatur-, UV- und Schlagregenbeanspruchung

[1 - 9, 11 - 15, 17 - 26, 28 - 31]

Diesen qualitativen Aussagen kann uneingeschränkt zugestimmt werden.

- Keine Schädigung von intakten Außenputzen und -anstrichen

[14, 21, 22, 23, 25, 26, 30]

- Putz- und Anstrichschäden

[1 - 4]

Dazu liegen je nach Einzelerfahrung unterschiedliche Aussagen vor. Weitere schädigende Eigenschaften von Begrünungen werden in der Literatur, z.B. [1] bis [4], genannt und wie folgt zusammengefaßt:

- Die Tragfähigkeit des Putzes ist zu gering; die Belastung durch eine Begrünung führt zum Abreißen des Putzuntergrundes.
- Sind im Untergrund Risse vorhanden, so können die Wurzeln des Bewuchses in sie hineinwachsen. Die Wurzeln werden dicker und können den Putz an diesen Stellen absprengen.
- Fallrohre und Dachrinnen sollten von Begrünungen freigehalten werden, da sie von den dicker werdenden Ästen und Zweigen zerquetscht und abgerissen werden können.

- Schuppenförmige Fassaden- oder Dachelemente sollten nicht begrünt werden, da die Fugen zwischen den Elementen von den Wurzeln der Begrünung unterwandert werden. Das Dickenwachstum führt zur Funktionsuntüchtigkeit der Elemente und kann weitere Schäden nach sich ziehen.
- Dispersionsbeschichtungen sollten nicht mit Selbstklimmern begrünt werden. Die leicht ätzende Wirkung der Haftscheiben oder -wurzeln kann zu einer Schädigung der Beschichtung und danach zum Unterwandern mit Haftwurzeln führen.
- Reinigung der Luft von Schmutzpartikeln
[11, 21, 22, 25, 26]
- Erhöhter Schallschutz durch Reflexion, Absorption im Blattwerk
[11, 21, 22, 25, 26, 30]

Diese ebenfalls anzutreffenden Argumente werden der Vollständigkeit halber zitiert, sie stehen jedoch nicht in Zusammenhang mit den hier zu untersuchenden Fragestellungen.

b) Aussagen aufgrund von Messungen:

- Energieeinsparung (3 - 4 %) durch stehendes Luftpolster
[30]
- Strahlungsreduzierung auf der Wandoberfläche durch den Schattenwurf der Blätter
[9]
- Dämpfung der Oberflächentemperaturen des Mauerwerks
[6, 9]
- Verringerung der Lufttemperaturen im Bestand zur Zeit der höchsten thermischen Belastung
[9]
- Änderung der Feuchteverhältnisse sind standort- und pflanzen-spezifisch

- Deutliche Reduktion der Strömungsverhältnisse im Bestand
[6]
- Bindung des Staubniederschlags im Blattwerk
[6]

Diese Aussagen, die durch Messungen an diversen Objekten belegt sind, berühren die vorliegende Untersuchung bereichsweise. Sie sind durch die eigenen Ergebnisse zu ergänzen und für die hier betrachteten Objekte zu quantifizieren.

3. Durchzuführende Untersuchungen und Meßobjekte

Zur Erfassung der spezifischen Auswirkungen von sommer- bzw. immergrünen Fassadenbegrünungen auf den Wärme- und Feuchtehaushalt von Außenwänden ist es erforderlich, die maßgebenden kurz- und langfristigen klimatischen Einflußparameter zu beiden Seiten der betrachteten Außenwand meßtechnisch zu bestimmen. Für eine möglichst weitreichende Beurteilung muß dies sowohl für winterliche als auch für sommerliche Verhältnisse geschehen, und zwar vergleichend für einen begrünten und einen unbegrünten Fassadenbereich derselben Außenwand mit gleichen inneren und äußeren Randbedingungen. Daraus ergeben sich spezielle Bedingungen bei der Auswahl entsprechender Objekte. Neben der notwendigen Installation spezieller Meß- und Datenerfassungseinrichtungen muß auch die Möglichkeit für sporadische Probenentnahmen gemäß den vorher geschilderten Untersuchungsbedingungen zur Überprüfung feuchtetechnischer Auswirkungen im Wandaufbau gegeben sein. Da die Erfüllung dieser Voraussetzungen auf praktische Schwierigkeiten bei der Objektauswahl stoßen wird (Akzeptanz von Bewohnern bzw. Eigentümern, physikalisch geeignete Meßflächen), wird zusätzlich zu den vorgesehenen Messungen die Möglichkeit der rechnerischen Simulation der wärme- und feuchtetechnischen Effekte unter Verwendung von Meßergebnissen ins Auge gefaßt. Wenn es gelingt, Begrünungsauswirkungen im erläuterten Sinn rechnerisch zu beschreiben, stünde damit ein wesentliches Hilfsmittel für weiterreichende Analysen sowie für meßtech-

nisch nicht mögliche Verallgemeinerungen zur Verfügung. Im Zusammenhang mit den aufgezeigten Untersuchungen interessiert außerdem, Informationen über eventuelle Schädigungswirkungen an der begrünten Außenoberfläche sowie über Schadgaskonzentrationsbedingungen in der Begrünung und damit für die Wandoberfläche zu gewinnen.

3.1 Bauphysikalische Parameter

Der Wärme- und Feuchtehaushalt einer Fassade wird hauptsächlich durch Sonne, Regen, Wind, die Temperatur der Luft und deren Feuchte bestimmt. Da eine Fassadenbegrünung diese Größen im Mikroklimabereich vor der Wandoberfläche modifiziert, sind Veränderungen im Energie- und Feuchtehaushalt der Wand zu erwarten. Wie in Bild 1 schematisch dargestellt, werden sich die vier, das Mikroklima vor einer Wand bestimmenden physikalischen Parameter Temperatur, Dampfdruck, Strahlung und Wind wie folgt verändern: Die Begrünung beschattet die Fassade und absorbiert die auftreffende Sonneneinstrahlung in der gesamten Dicke des Blattwerks. Dies wird im Vergleich zur unbegrünten Wand im Sommer zu einer deutlichen Reduzierung der Oberflächentemperatur an der Wand führen. Durch die geringe Wärmekapazität der Blätter sind im äußeren Bereich der Begrünung höhere Temperaturen zu erwarten. Im Winter werden die relativ ruhige Luftschicht im Inneren der Begrünung und der dadurch reduzierte konvektive Wärmeübergang eine Temperaturerhöhung an der Wandoberfläche bewirken. Der Dampfdruck, d.h. die absolute Feuchte vor der Wand, dürfte durch eine Begrünung kaum beeinflusst werden. Dies ist nicht zu verwechseln mit der relativen Luftfeuchte an der Oberfläche, die für die dortigen Sorptionsvorgänge verantwortlich ist, sich sehr wohl infolge veränderter Temperaturen an der Oberfläche verändern kann und somit die Stofffeuchte an der Oberfläche beeinflusst. Die Windverhältnisse werden durch eine dichte Begrünung deutlich beeinflusst. Der Strömungswiderstand, den die Begrünung für die natürliche Umströmung eines Hauses darstellt, führt annähernd zur Luftruhe unmittelbar vor der Wandoberfläche.

3.2 Meßobjekte

Die eingangs angedeuteten Schwierigkeiten bei der Auswahl geeigneter begrünter Meßobjekte, welche die notwendigen Voraussetzungen für derartige Untersuchungen erfüllen, haben sich auch bei diesem Meßvorhaben bestätigt und dürften wohl ein generelles praktisches Problem darstellen. In einer ausgedehnten Suchaktion konnten letztlich drei Objekte in Stuttgart-Neugereut, in Vaihingen/Enz und in Essen ausfindig gemacht werden. Nach einer Pilot-Untersuchungsphase zur Optimierung der Meßeinrichtungen an einem Objekt (Stuttgart-Neugereut) sind die drei Stationen im Oktober 1986 installiert und ab November 1986 bis September 1987 kontinuierlich betrieben worden. Die Erlaubnis zur Probenentnahme an den Fassaden war nur für das Objekt Essen zu bekommen. Die Objekte können kurz wie folgt beschrieben werden:

- 1) Essen-Margarethenhöhe (Bild 2)
Vollziegelmauerwerk, beidseitig verputzt
Orientierung: Süd
Begrünung: Wilder Wein
Werkstatt-Gebäude

- 2) Vaihingen/Enz (Bild 3)
Ziegelmauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem
Orientierung: Nordwest
Begrünung: Efeu
Einfamilienhaus mit Einliegerwohnung

- 3) Stuttgart-Neugereut (Bild 4)
Sichtbetonfassade vor Betonwand
Orientierung: Südwest
Begrünung: Efeu
Gesamtschule

3.3 Untersuchungsplan und Meßaufbau

Klimaparameter

Nach erfolgter Testphase werden im Zeitraum von November 1986 bis September 1987 an jeder Station folgende Meßgrößen im 10-Minuten-Rhythmus registriert und zu Stundenmittelwerten verarbeitet:

- Sonneneinstrahlung auf die Fassade
- Temperatur und Feuchte an der Außenwandoberfläche
- Temperatur und Feuchte 1 cm, 10 cm und 1 m vor der Wand
- Schlagregenbelastung der Wand
- Wärmeströme an der äußeren und inneren Wandoberfläche
- Windgeschwindigkeit 1 m vor der Wand

Die Messungen werden gleichzeitig an einer typischen Stelle im begrünten wie auch im unbegrünten Bereich derselben Fassade durchgeführt. Durch den direkten Vergleich der beiden Fassadenbereiche ist es möglich, den Einfluß einer Begrünung meßtechnisch zu erfassen und zu interpretieren. Bild 5 zeigt die Meßeinrichtung im unbegrünten Bereich des Essener Meßobjektes (Foto im Winter, Wilder Wein unbelaubt).

Einzeluntersuchungen

Neben den kontinuierlich betriebenen Meßstationen werden zusätzlich stichprobenartige Sonderuntersuchungen durchgeführt. Es handelte sich hierbei um Untersuchungen über

- Abreißfestigkeit der Pflanzen auf Putz,
- Haftfestigkeit des Putzes am Untergrund,
- Schadgaskonzentrationen an der Bauteiloberfläche,
- Feuchteverteilungen im Mauerwerksquerschnitt.

Wärmetechnische Berechnungen

Da das thermische Verhalten der Außenwände nicht nur von klimatischen, sondern auch von baukonstruktions- und nutzungsspezifischen Einflüssen bestimmt wird, bei den parallel durchzuführenden Mes-

sungen in begrünten und unbegrünten Fassadenbereichen daher unterschiedliche Bedingungen unvermeidbar sein können, ist abzusehen, daß die punktuell betriebenen Temperatur- und Wärmestrommessungen nur einen Teil des tatsächlichen Geschehens erfassen können. Es wird deshalb angestrebt, in Abgleich mit diesen Messungen thermische bzw. energetische Berechnungen durchzuführen, die eine bessere Interpretation und Bewertung der Begrünungsauswirkungen über längere Zeiträume erlauben.

Feuchtetechnische Berechnungen

Feuchteprofilbestimmungen aus Bohrproben stellen quasi eine "Momentaufnahme" eines Zustandes dar, der sich aufgrund zeitlich zurückliegender Umgebungseinflüsse eingestellt hat. Dynamische Vorgänge können meßtechnisch nicht erfaßt werden. In analoger Weise soll auch hier versucht werden, Einzelmessungen zu typischen Zeitpunkten (z.B. für Winter- und Sommerfall) und mit bekannten Randbedingungen rechnerisch nachzuvollziehen und daraus die wesentlichen feuchtetechnischen Berechnungsparameter abzuleiten. Infolge dieser Verifizierung muß es dann möglich sein, die Begrünungsauswirkungen auf den Feuchtehaushalt mittels gemessener Randbedingungen (Klima) und eines vorhandenen Berechnungsverfahrens im Zeitverlauf zu analysieren.

4. Untersuchungsergebnisse

Aus einer Fülle von Meßdaten, Berechnungen und Einzeluntersuchungen für drei Objekte werden nachfolgend die unter praktischen Gesichtspunkten interessant erscheinenden Ergebnisse über die Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf den Wärme- und Feuchtehaushalt von Außenwänden anhand ausgewählter Beispiele dargestellt. Dabei ist prinzipiell nach sommerlichen und winterlichen Bedingungen, nach Begrünungsart (sommergrün, immergrün) sowie nach Art der Tageszyklen der einwirkenden Klimaparameter zu unterscheiden. Des weiteren

wird auf spezielle mechanische sowie schadstoffbedingte Schadensrisiken hingewiesen.

4.1 Wärmetechnisches Verhalten

Neben den thermischen Klimarandbedingungen und deren Veränderungen im Blattwerk von Begrünungen bei bestimmten Klimazuständen sind hier insbesondere die thermische Belastung der Oberfläche und die energetischen Konsequenzen von Bedeutung.

4.1.1 Strahlung

Wie bereits in [9, 10] angegeben, sind je nach Art und Dicke der Begrünung Abminderungsfaktoren für die auftreffende Sonneneinstrahlung von 28 bis 62 % bei relativ jungen sommergrünen Pflanzensorten und bei Bewuchsdicken von 20 bis 50 cm zu erwarten. Bei älteren Pflanzen bewirken dickere und verholzte Zweige eine weitere Zunahme der Verschattungswirkung. Die Erwärmung einer Oberfläche bei Sonneneinstrahlung ist nicht nur von der absorbierten Strahlung, sondern auch von den gleichzeitig ablaufenden Wärmeleit- und Speichervorgängen in den oberflächennahen Wandzonen sowie von den Wärmeübergangsbedingungen zur umgebenden Luft abhängig. Für die hier interessierenden "wandseitigen" Effekte der Begrünung sind daher letztlich die auch durch Strahlung mit beeinflussten Wärmeströme in der Wandoberfläche unter der Begrünung von Bedeutung. Bild 6 zeigt exemplarisch für einen wolkenlosen Tag im Spätsommer die an begrünten und unbegrünten Außenoberflächen nach innen (positiv) bzw. nach außen (negativ) gerichteten Wärmeströme sowie die insgesamt ankommende Normalstrahlung auf die Wand (Meßobjekt Essen). Die an der Wandoberfläche registrierten Wärmeströme sind dabei ausschließlich den im Fall der Begrünung modifizierten Strahlungs-, Temperatur- und Übergangsbedingungen anzurechnen. Aus einer einfachen Bilanzbetrachtung läßt sich ableiten, daß dabei nur ca. 20 % der gesamten Sonneneinstrahlung durch die Begrünung zur Wandoberfläche durchdringen. Diese Größenordnung ist für alle untersuchten

Fassaden, ob mit Efeu oder Wildem Wein bewachsen, festgestellt worden.

4.1.2 Wind

Die natürliche Umströmung von Gebäuden wird durch das Blattwerk von Begrünungen verändert, wobei die Veränderungen im wesentlichen im Bestand stattfinden. Etwa 1 m vor der Fassade sind keine Beeinflussungen mehr feststellbar. Detaillierte Untersuchungen in [6] haben gezeigt, daß der Wind 10 cm vor einer mit Efeu bewachsenen Wandoberfläche annähernd zu Ruhe gekommen ist und nur in geringem Maße durch die Thermik im Bestand verändert wird. Es hat sich weiterhin gezeigt, daß Strömungsgeschwindigkeit von mehr als 0,5 m/s in Begrünungen kaum auftreten. Da Strömungsprofilmessungen im Blattwerk einen erheblichen Aufwand bedeuten und entsprechende Sensoren nicht die erforderliche Klima- und Langzeitbeständigkeit besitzen, ist auf derartige Messungen verzichtet worden. Zudem ist es für energetische Betrachtungen von untergeordneter Bedeutung, ob kurzfristige Luftgeschwindigkeitsschwankungen innerhalb des Bereiches kleiner 0,5 m/s im Bewuchs vorliegen.

4.1.3 Temperaturen

Am Beispiel des Meßobjektes Stuttgart-Neugereut mit einem ca. 20 cm dicken, immergrünen Efeu-Bewuchs wird im folgenden dargestellt, welchen Einfluß die Begrünung auf das Temperaturfeld vor der Wandoberfläche ausübt. Dazu werden für Winter- und Sommergezeiten jeweils gegensätzliche Klimasituationen betrachtet und Tagesgänge für den begrünten und unbegrünten Bereich derselben Fassade gegenübergestellt. Für die Interpretation der gemessenen Temperaturtagessgänge jeweils an der Wandoberfläche sowie in 1 cm, 10 cm und 1 m Abstand davor ist zu berücksichtigen, daß die Fassade Südwest-Orientierung besitzt und die Sonneneinstrahlung an heiteren Tagen daher ab ca. 10 Uhr vormittags wirksam wird, daß die Begrünung die Einstrahlungsintensität an der Wandoberfläche auf ca. 20 % abmin-

dert und daß im Bewuchs im Mittel mit ca. 0,25 m/s Luftgeschwindigkeit zu rechnen ist.

Heiterer Wintertag (Bild 7, oben)

Die Oberflächentemperaturen unter der Begrünung liegen nachts und vormittags bis ca. 11 Uhr deutlich mit etwa 2 bis 3 K höher als bei der unbegrünten Oberfläche. Danach steigen die Temperaturen an beiden Oberflächen aufgrund des Außenlufttemperaturanstiegs und der Besonnung bis fast auf das gleiche Maximum um ca. 16 Uhr an (knapp 10°C bis etwa 0°C Umgebungstemperatur). Auf eine Besonderheit der Begrünung ist jedoch hinzuweisen: Bei Wirksamwerden der Besonnung steigen die Lufttemperaturen im Außenbereich der Begrünungsschicht rasch an, was sich deutlich auf die Wandoberflächentemperatur auswirken muß, da diese Lufttemperaturen während des Anstiegs höher liegen als die Temperaturen an der Wandoberfläche. Dies bedeutet, daß die Außenzone des Blattwerkes zur Umsatzfläche für die Sonneneinstrahlung wird, aufgrund der dort vorliegenden geringen Wärmespeicherfähigkeit (Luft und Blätter) rasch höhere Temperaturen auftreten, die dann auf konvektiven Wege an die Umgebung, aber auch in das Begrünungssinnere und schließlich an die Wand abgegeben werden. Der gegenläufige Effekt ist dann beim Abnehmen der Besonnung zu beobachten. Die Temperaturen im Blattwerk fallen rasch, die Wandoberfläche bleibt wegen ihrer Wärmespeicherfähigkeit auf höherem Temperaturniveau. Die Umgebungslufttemperaturen 1 m vor der Wand sind im begrünenden und unbegrünenden Bereich identisch.

Trüber Wintertag (Bild 7, unten)

An bedeckten Wintertagen sind die Außenlufttemperaturen quasi konstant und weisen keinen ausgeprägten Tagesgang auf. Auch die Wandoberflächentemperaturen der "grauen" und der "grünen" Fassade sind wegen der geringen Einstrahlung und der konstanten Lufttemperaturen über den ganzen Tag hinweg nahezu unverändert, wobei die begrünte Oberfläche bei dem betrachteten Meßobjekt um ca. 3 K

höhere Temperaturen aufweist. Die Lufttemperaturen liegen vor der begrünten sowie vor der unbegrünten Oberfläche eng beieinander, wobei im Blattwerk eine etwas größere Spreizung auffällt.

Heiterer Sommertag (Bild 8, oben)

Die vorher beschriebenen physikalischen Effekte sind auch hier zu beobachten. Die intensivere Sonneneinstrahlung und die größere Amplitude der Außenlufttemperaturen führen zu ausgeprägten Tagesgängen der Temperaturen an und vor den untersuchten Oberflächen. In einer wolkenlosen Sommernacht verhalten sich begrünte und unbegrünte Fassaden sehr ähnlich. Die in der Wand gespeicherte Wärme wird allmählich an die Außenluft abgegeben, die Temperaturspreizung im Bewuchs ist dabei größer. Nach Sonnenaufgang steigen jedoch die Temperaturen an und vor der "grauen" Wand schnell und fast linear von morgendlichen 14°C auf fast 44°C am frühen Nachmittag. Die durch die Begrünung verschattete Oberfläche reagiert träge auf die außen herrschenden Bedingungen. Bei der grauen Oberfläche beträgt die tägliche Temperaturamplitude ca. 30 K, bei begrünten gerade 10 K. Daß dieser Effekt auch auf ein im Sommer dicker gewordenen Luftpolster in der Begrünung zurückzuführen ist, erkennt man am Tagesgang der Lufttemperaturen innerhalb der Begrünung 1 cm und 10 cm vor der Oberfläche. Bemerkenswert ist auch, daß die Oberflächentemperaturen tagsüber im Fall der Begrünung stets erheblich unter, im unbegrünten Fall stets erheblich über der Umgebungslufttemperatur liegen. Nachts bleibt die Oberfläche in beiden Fällen wärmer.

In einer weiteren, hier nicht dargestellten Einzelmessung am gleichen Meßobjekt zeigte sich außerdem, daß in den äußersten Zonen des Blattwerkes aufgrund des Strahlungsumsatzes dort fast die gleichen Temperaturen erreicht werden wie an der "grauen" Oberfläche (Blattwerkoberfläche 33°C , unbegrünte Oberfläche 37°C).

Trüber Sommertag (Bild 8, unten)

Wie schon bei trüben Wintertagen festgestellt, so liegen auch bei trüben, bedeckten Sommertagen die Temperaturen an und vor der Wandoberfläche - ob begrünt oder unbegrünt - im Bereich von ca. 2 K eng beieinander. Tagesgänge sind nicht ausgeprägt, man kann von quasi stationären isothermen Verhältnissen sprechen.

Monatsmittelwerte (Bild 9)

Die für längerfristige Betrachtungen, wie z.B. bei energetischen oder feuchtetechnischen Fragestellungen, wesentlichen Monatsmittelwerte gemessener Oberflächentemperaturen sind in Bild 9 für die im Zeitraum November 1986 bis Juli 1987 untersuchten Objekte zusammengestellt. Das mit Wildem Wein bewachsene, im Winter unbelaubte Meßobjekt in Essen weist unter Winterbedingungen im bewachsenen und unbewachsenen Bereich quasi gleiche Monatsmitteltemperaturen an der Außenoberfläche auf. In den Sommermonaten treten bei voll nachgewachsenem Blattwerk mittlere Temperaturdifferenzen bis zu ca. 2 K zwischen begrüntem und unbegrüntem Oberflächen auf. Die mit Efeu (immergrün) bewachsene NW-Fassade in Vaihingen/Enz zeigt aufgrund ihres höheren Dämmniveaus im Winter mittlere Temperaturunterschiede zwischen begrüntem und unbegrüntem Bereich von ca. 1 bis 2 K. Wegen der langen täglichen Schattenperioden an der NW-Wand sind auch die sommerlichen Unterschiede mit ca. 1 K nur wenig ausgeprägt. Für das Objekt Stuttgart-Neugereut werden die Begrünungseffekte wieder deutlicher. An der ungedämmten SW-Fassade sind im Winter im Monatsmittel unter der Begrünung um ca. 2 K höhere Temperaturen gemessen worden. Im Sommer heizt sich diese Fassade unter der Begrünung im Mittel um ca. 3 K weniger auf.

4.1.4 Rechnerische Modellierung

Die umfangreichen Datensätze, die während der einjährigen Meßkampagne gesammelt worden sind, ermöglichen die thermische und

energetische Interpretation der Ergebnisse mit Hilfe eines physikalisch-mathematischen Modells, das es gestattet, den Einfluß verschiedener Parameter durch Variationsrechnungen zu erkennen. Das Programmsystem "SUN-CODE SERIRES" [27] erlaubt die mathematische Beschreibung derjenigen Effekte, die von einer Fassadenbegrünung hervorgerufen werden. Im folgenden wird erläutert, wie die Fassadenbegrünung im Programm dargestellt wird und welche physikalischen und kleinklimatischen Parameter zur Simulation verwendet werden.

Programmtechnisch stellt die Begrünung einen separaten Raum dar, der thermisch zwischen Außenwand des Gebäudes und Außenluft eingekoppelt ist. Der Wärmeübergang zum Gebäude geschieht ähnlich wie bei einer schwach lichtdurchlässigen, vorgehängten Fassade. Der Wärmeübergangskoeffizient an der Wandoberfläche verringert sich von $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf ca. $12 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der Wärmeübergang an der Außenseite der Begrünung kann mit $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ angesetzt werden. Das thermische Verhalten dieser Pufferzone ist durch das Zusammenspiel von Transmission und Absorption und der Strahlung einerseits und der Luftbewegung andererseits geprägt. Wie bei Ziffer 4.1.1 bereits erläutert, erreichen etwa 20 % der eingestrahnten Sonnenenergie die Wandoberfläche unter der Begrünung. Physikalisch bedeutet dies, daß die Begrünung einen Transmissionsgrad von 0,2 besitzt. Geht man davon aus, daß eine Efeubegrünung etwa 30 % der auftreffenden Sonnenstrahlung reflektiert, so werden 50 % der Strahlung im Bewuchs absorbiert und in Wärme umgesetzt. Diese ins System eingebrachte Energie wird durch die große Blattoberfläche an die Luft abgegeben und durch Eigenthermik oder durch die von außen aufgeprägte Strömung mit der Außenluft vermischt. Hierbei wird mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,25 m/s gerechnet. Bei einer 3,75 m hohen Fassade dauert es also 15 Sekunden, bis die Luft im Bewuchs einmal völlig ausgetauscht ist. In einer Stunde wird somit die Luft im Bewuchs der Fassade 240 mal ausgetauscht. In Tabelle 2 sind die hier geschilderten Parameter für den "Pufferraum" der Begrünung sowie für den dahinterliegenden Modell-Raum des Gebäudes zusammengestellt.

Die Verifizierung des Berechnungsmodells ist in Bild 10 durch einen Vergleich gemessener und berechneter Oberflächentemperaturgänge für den begrünten und unbegrünten Fassadenbereich des Objektes Stuttgart-Neugereut dargestellt. Es wurden dazu die Daten strahlungsreicher Sommer- und Wintertage hergenommen, da bei diesen Bedingungen die größten Unsicherheiten zu erwarten sind. Wie sich zeigt, erlauben die zugrundegelegten Parameter für die Begrünung bereits bei dem kritischen Sommerfall (Bild 10, oben) eine gute und praktisch ausreichende Wiedergabe der thermischen Wirkungen von Fassadenbegrünungen. Im Fall des heiteren Wintertages (Bild 10, unten) und bei den nicht mehr abgebildeten trüben Tagen ist die Übereinstimmung noch besser. Latentwärmemengen durch Tauen oder Verdunsten im Blattwerk sind in beiden Fällen nicht berücksichtigt, was aufgrund der erzielten Ergebnisübereinstimmung offensichtlich auch nicht erforderlich ist.

Die thermisch-energetische Wirkung von Begrünungen an Wandaußenoberflächen beruht somit im wesentlichen auf drei Effekten, nämlich:

- a) Die Beseplung der Wandaußenoberfläche bei Windanströmung wird durch den Bewuchs reduziert. Hierdurch reduziert sich der äußere Wärmeübergangskoeffizient von $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf ca. $12 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dies gilt bei immergrünen Pflanzen im Winter und im Sommer.
- b) Innerhalb des Blattwerkes werden ca. 50 % der auftreffenden Sonneneinstrahlung absorbiert und ca. 20 % zur Wandaußenoberfläche transmittiert. Der transmittierte Anteil trägt grundsätzlich zur Erwärmung der Wandaußenoberfläche bei. Ohne Begrünung wäre die auf die Oberfläche auftreffende Strahlung größer als mit Begrünung; die Wärmeabfuhr wäre aber ebenfalls größer, weil die konvektionsdämpfende Wirkung des Blattwerkes gemäß a) fehlt. Der im Bewuchs absorbierte Strahlungsanteil trägt grundsätzlich zu einer Temperaturerhöhung in der Begrünung, d.h. vor der Außenoberfläche, bei. Im Winter sind die Wirkungen transmittierter

und absorbiertes Strahlung erwünscht, im Sommer nicht. Dennoch ist eine Begrünung im Sommer positiv zu sehen, weil das Blattwerk - gegenüber einer unbegrünten Fassade - einen erheblichen Sonnenschutz darstellt.

- c) Die Lufttemperatur unmittelbar vor der Wandaußenoberfläche wird durch die reduzierte Konvektion gemäß a), den Strahlungshaushalt gemäß b) und den Luftaustausch zwischen Blattwerk und Umgebung beeinflusst. Dies führt im Blattwerk - abgesehen von kurzfristigen Effekten an extrem warmen und strahlungsreichen Sommertagen - ganzjährig zu einer Temperaturerhöhung gegenüber der Umgebungsluft.

Aus dem Zusammenwirken dieser drei Effekte resultieren die im folgenden dargestellten Veränderungen von Wärmeflüssen und Oberflächentemperaturen.

4.1.5 Thermische und energetische Modellrechnungen

Unter Verwendung des beschriebenen Berechnungsmodells und eines normierten Klimadatensatzes (Test-Reference-Year, Stuttgart) wird im folgenden am Beispiel eines Modellraumes mit begrünter/unbegrünter Südfassade gezeigt, mit welchen thermischen und energetischen Veränderungen durch die Begrünung der Südfassade im Mittel zu rechnen ist. Betrachtet wird ein kubischer, fensterloser Einzel-Modellraum mit 4 m x 4 m x 4 m Außenabmessung, dessen Südfassade entweder voll mit immergrünem Efeu bewachsen oder unbegrünt ist. Die Umschließungsbauteile der Raumzelle entsprechen den Angaben in Tabelle 3 für den "ungedämmten" Fall. Die Wände sind vergleichbar mit der Betonelement-Fassade des Objektes Stuttgart-Neugereut. Die begrünte Fassade bildet dort die Außenwand eines unbeheizten Treppenhauses, welches keinen wärmeschutztechnischen Anforderungen unterliegt. Sie besitzt gemäß Tabelle 3 einen k-Wert von $2,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ und wird im folgenden als "ungedämmter" Fall bezeichnet. Wärmeüber-

gangs- und Luftwechselverhältnisse werden gemäß Tabelle 2 zugrundegelegt.

Die zunächst interessierenden Wärmeströme an der Innenoberfläche der Südfassade sind in Bild 11 als Tagesmittelwerte über einen Jahreszyklus für den begrünten und unbegrünten Fall angegeben. Daraus sind die Wärmeverluste der Südfassade mit 16 m^2 Wandfläche abzuleiten. Zu Beginn der Heizperiode im September/Okttober sind kaum Unterschiede im Wärmeverlust feststellbar, von Mitte Dezember bis Anfang Februar sind Reduzierungen bis zu ca. 20 % aufgrund der Begrünung für diesen idealisierten Fall möglich. In den Sommermonaten macht sich die Kühlwirkung der Begrünung (Verschattung) bemerkbar. Während die unbegrünte Fassade bei hochsommerlichen Bedingungen sogar einen geringfügigen Wärmestrom zum Raum hin aufweisen kann (Kühllast bei 20°C Raumsolltemperatur), zeigt die begrünte Fassade immer Verluste für die vorgegebenen Raumbedingungen. Die Jahresgänge der äußeren und inneren Oberflächentemperaturen, dargestellt in Bild 12, zeigen ein den Wärmeströmen ähnliches Verhalten. Durch den Effekt der vorgehängten Fassade können die äußeren Oberflächentemperaturen im Winter unter der Begrünung im Tagesmittel bis zu 4 K höher liegen als an der unbegrünten Wand. In den Sommermonaten Juli und August sind die hinter der Begrünung vor intensiver Sonneneinstrahlung geschützten Oberflächen im Mittel etwa 1 bis 2 K kühler als unbegrünte Flächen. Da im Winter der Wärmestrom durch die Fassade infolge der Begrünung verringert wird, liegen die inneren Oberflächentemperaturen - im Vergleich zu unbegrünten Fassaden - auf höherem Niveau. Bei schlechter Wärmedämmung kann dies im Mittel bis zu 1 K Unterschied ausmachen.

Vergleicht man die hier unter idealisierten Bedingungen errechneten und gemittelten Außenoberflächentemperaturen mit den bereits in Bild 9 dargestellten gemessenen Monatsmittelwerten für das Objekt Stuttgart-Neugereut, so sind gute Übereinstimmungen festzustellen.

Dies betrifft auch z.B. den Zeitpunkt des Wechsels von höheren zu niedrigeren Temperaturen bei Begrünung - im Vergleich zur unbegrünten Fassade - etwa zu Beginn des Monats April.

Um den Einfluß einer Fassadenbegrünung auf den Wärmeverlust des dahinterliegenden Raumes zu verdeutlichen, wird wiederum der schon genannte Einzel-Modellraum für die rechnerische Betrachtung herangezogen. Dabei sind die Außenwände einmal mit und einmal ohne Wärmedämmung ausgeführt und die Südfassade ist entweder voll mit immergrünem Efeu bewachsen oder unbegrünt. Die zugrundegelegten Daten gehen aus den Tabellen 2 und 3 hervor. In Tabelle 4 sind die jeweils errechneten jährlichen Heizwärmeverluste des Raumes (Transmission und Lüftung) bzw. die absoluten und prozentualen Wärmeverlustminderungen infolge der Begrünung für die dort genannten Randbedingungen gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß weitgehend unabhängig vom Dämmniveau durch die begrünte Südfassade und bei realen Umgebungsbedingungen (TRY, Stuttgart) Reduzierungen des Wärmeverlustes um ca. 6 bis 7 % im Jahresmittel möglich sind. Ein nahezu identisches Ergebnis zeigt sich auch für eine analog berechnete begrünte/unbegrünte Nordfassade. Die 6 bis 7 %ige Reduzierung der Heizwärmeverluste durch Begrünung muß im Zusammenhang mit jenen Reduzierungen gesehen werden, die mit einem verbesserten baulichen Wärmeschutz (z.B. k-Wert-Absenkung auf $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) erreichbar sind. Hierdurch werden weit höhere Einsparungen erzielt, so daß die energetische Wirkung der Begrünung als relativ bescheiden eingestuft werden muß.

4.2 Feuchtetechnisches Verhalten

Es ist bisher weitgehend ungeklärt bzw. nicht quantifiziert, wie sich Begrünungen auf den Feuchtehaushalt von Außenwänden auswirken. Mit Hilfe gemessener und berechneter Ergebnisse werden im folgenden die Effekte veränderter Luftfeuchtebedingungen im Blattwerk, die Schutzwirkung der Begrünung gegenüber Schlagregen und die Konsequenzen für die Wandfeuchte dargestellt.

4.2.1 Luftfeuchte - Oberflächenfeuchte

Die Luftfeuchte im Blattwerk von Fassadenbegrünungen interessiert einerseits als Absolutwert (Dampfdruck bzw. Wasserdampfkonzentration), welcher angibt, ob vor der Wandoberfläche durch Feuchterückhaltung der Blätter oder Verdunstungsmengen eine Erhöhung des Luftfeuchteangebotes für den Baukörper vorliegt. Zum anderen ist für die Wasserdampfsorption der Oberfläche letztlich die relative Oberflächenfeuchte maßgebend, die sich aus Absolutfeuchte unmittelbar vor der Oberfläche und Oberflächentemperatur ergibt. Bei steigender Absolutfeuchte und steigender Oberflächentemperatur kann die relative Feuchte an der Oberfläche sinken und Desorption, also Feuchteabgabe der Wand, einsetzen.

Die Untersuchungen an den drei Objekten haben folgendes erbracht:

Absolutfeuchte

Im Winter konnten keine Unterschiede vor begrünten und unbegrünten Fassaden festgestellt werden. Es ist dabei jeweils 1 cm vor der Wandoberfläche gemessen worden. Im Sommer traten geringfügige Erhöhungen unter der Begrünung auf, insbesondere dann, wenn Regenbelastungen und genügende Wasserversorgung der Pflanzen vorlagen. Am Objekt Vaihingen/Enz konnten dann z.B. unter dem Bewuchs 20 mbar Wasserdampfdruck gegenüber 17 mbar an der unbegrünten Fassade gemessen werden. Generell kann festgehalten werden, daß bei den untersuchten Begrünungen im Mittel keine nennenswerten Veränderungen der absoluten Feuchteverhältnisse im Vergleich zu den benachbarten unbegrünten Bereichen aufgetreten sind.

Relative Oberflächenfeuchte

Die für den Feuchtehaushalt des Baukörpers wesentlichen, durch die jeweilige Außenoberflächentemperatur beeinflussten relativen Feuchten an der Oberfläche sind für die drei Meßobjekte über den Zeit-

raum November 1986 bis Juli 1987 in Bild 13 als Monatsmittelwerte angegeben. Generell ist daraus zu erkennen, daß die begrünten Wandoberflächen in den Wintermonaten "relativ" meist etwas trockener sind als unbegrünte, und zwar in der Größenordnung von maximal etwa 2 bis 8 % r.F., was gerade noch über der Meßgenauigkeitsgrenze liegt. In den Sommermonaten ergeben sich an den begrünten Oberflächen je nach Klimasituation (Regen, Verschattung) um etwa 4 bis 20 % r.F. höhere Werte. Für den Jahresdurchschnitt ist davon auszugehen, daß Fassadenbegrünungen die sorptionsbedingte Außenwandfeuchte nicht nachteilig verändern.

4.2.2 Schlagregen

Bei den untersuchten Fassaden konnte festgestellt werden, daß die Schlagregenbelastung einer begrünten Wand praktisch auf Null zurückgeht, wenn das Blattwerk dicht ausgebildet ist. Während unter den Efeu-Bepflanzungen ganzjährig keine Beregnung der Fassade aufgetreten ist, war die mit Wildem Wein bewachsene Wand im Bereich des Bewuchses in den Wintermonaten einer ähnlichen Regenbelastung ausgesetzt wie die benachbarte unbewachsene Fläche. Bei abgeworfenem Laub können die verbleibenden Äste und Zweige den Regen nur geringfügig abhalten. In Bild 14 sind die Ergebnisse der Schlagregelmessungen an den drei Untersuchungsobjekten in begrünten und unbegrünten Bereichen für den Zeitraum November 1986 bis September 1987 zusammengestellt. Es ist festzuhalten, daß dicht belaubte Begrünungen einen ausgezeichneten Regenschutz für die Fassade darstellen.

4.2.3 Bauteilfeuchte

Die Bestimmung von Feuchteverteilungen nach dem gravimetrischen Verfahren - Entnahme von Bohrkernen, wie in Bild 15 gezeigt, und Trocknung einzelner Bohrkernscheiben - durfte am Essener Meßobjekt im bewachsenen Fassadenbereich je einmal nach der Winter- und der Sommerperiode durchgeführt werden. Vergleichend zu diesen meßtech-

nischen "Momentaufnahmen" sind mit einem in [16] entwickelten Verfahren, den adaptierten Stoffeigenschaften des Mauerwerks und den vor Ort gemessenen Klimarandbedingungen Berechnungen zum Feuchtehaushalt durchgeführt worden. Ergänzend zum jeweils gemessenen Fall (Winter ohne Laub, Sommer mit Laub) sind auch die komplementären Situationen (Winter mit Laub, wie z.B. bei Efeu-Begrünung und Sommer unbegrünt) rechnerisch mit betrachtet worden. Gemäß den in Bild 16 dargestellten Meßergebnissen und den gut übereinstimmenden Berechnungen zeigt sich, daß der Baukörper nicht durch die Luftfeuchte in der Begrünung beeinflusst wird, wohl aber durch Schlagregenbelastungen im unbegrüntem Fall. Zu vermerken ist auch, daß die bei dem mit Wildem Wein bewachsenen Ziegelmauerwerk im Winter auftretenden höheren Wassergehalte im Sommer wieder austrocknen. Die Feuchtezustände im Außenputz, die rechnerisch darstellbar, meßtechnisch aber bei diesem Objekt nur unbefriedigend erfaßbar waren, sind hier wegen des sowieso rascheren Feuchtwechsels in der Putzschicht vernachlässigt worden.

Aufgrund der so bestätigten Möglichkeiten von rechnerischen Abschätzungen sind die zeitlichen Verläufe der mittleren Wassergehalte von Außenputz und Mauerwerk einer analogen Ziegelwand für eine Winter/Sommer-Periode untersucht worden. Aus Vergleichsgründen liegen dazu die gemessenen Klimabelastungen des Standortes Stuttgart-Neugereut und die Fälle "unbegrünt", "sommergrün" (Wilder Wein) und "immergrün" (Efeu) zugrunde. Bild 17 zeigt oben gemessene Schlagregenlasten im Monatsmittel und unten die errechneten mittleren Wassergehalte in Putz und Mauerwerk für Bedingungen, wie sie von Dezember 1986 bis Juli 1987 vorlagen. Man erkennt aus den einzelnen Fallstudien, daß wiederum die Wirkungen der Beregnung (siehe Monat Juni) dominant, Luftfeuchteinflüsse gering und praktisch auch nur beim Außenputz bemerkbar sind. Dies wird aus dem Vergleich "unbegrünt/Efeu" deutlich. Außerdem reagiert eine mit Wildem Wein bewachsene Wand im Winter wie eine unbegrünte, im Sommer wie eine mit Efeu begrünte Wand. Als Zeitraum für diese feuchte-technische "Metamorphose" ergibt sich rechnerisch und aus gemess-

senen Klimawerten der Monat April, was mit der Blattwachstumsperiode des Wilden Weins zusammenfällt.

4.3 Schadensrisiken

Geht man davon aus, daß Begrünungen bestimmte Schutzwirkungen gegenüber thermischen, hygrischen und strahlungsbedingten Einwirkungen besitzen, so sind auch gewisse Schädigungen von begrünten Bauteilen bekannt geworden, die sich auf stoffliche Veränderungen des Untergrundes beziehen. Es werden im folgenden eigene Überprüfungen angestellt sowie Meßergebnisse hinsichtlich Haft/Zug-Festigkeiten (Pflanzen und Putze) und Schadgasbelastungen angegeben.

Ein dichter, flächendeckender Bewuchs erfordert Pflegemaßnahmen, die um so aufwendiger werden, je größer die bewachsene Fläche und je älter die Begrünung wird. Als Beispiel mag hierfür die Siedlung Margarethenhöhe in Essen dienen (über 8000 Bewohner), in der die überwiegende Zahl aller Fassaden begrünt ist. Hier treten keine pflanzenbedingten Schäden an den Gebäuden auf. Dies ist sicherlich auch darauf zurückzuführen, daß Gärtner eigens zur Pflege der Fassadenbegrünungen eingesetzt werden. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnten zusätzlich amtliche Stellen, Wohnungsbaunternehmen und Privatleute nach eventuell pflanzenbedingten Bauschäden befragt werden. Es wurde jeweils bestätigt, daß durch einen gewissen Pflegeaufwand, wie Freischneiden von Fenstern und Dachrinnen, pflanzenbedingte Schäden vermieden werden können. Nur in einem Fall sind Verätzungen auf den Fensterrahmen und Glasflächen einer mit Efeu bewachsenen Fassade genannt worden.

Bei den drei untersuchten Fassaden

- Wilder Wein auf mineralischem Putz (Essen)
- Efeu auf organischem Kunstharzputz (Vaihingen/Enz)
- Efeu und Wilder Wein auf Sichtbeton (Stuttgart-Neugereut)

waren keine schädlichen Auswirkungen der Kletterpflanzen zu erkennen. An diesen Fassaden wurde die Haftung der Begrünung am Untergrund untersucht. Mit Hilfe einer Federwaage mit Schleppzeiger

sind dazu die Verästelungen der Pflanzen von der Fassade abgerissen worden. Generell ist die zum Abreißen notwendige Kraft umso größer, je dicker und verholzter der abgerissene Zweig ist. Bild 18 verdeutlicht die Kräfte in Abhängigkeit vom Astdurchmesser, die zum Abreißen von Wildem Wein und Efeu an den jeweiligen Fassaden erforderlich waren. Bemerkenswert bei dieser Untersuchung ist, daß trotz der teilweise notwendigen, relativ großen Kräfte keine Schäden auf dem Putzuntergrund hervorgerufen worden sind. Die bei einer Haft/Zug-Prüfung vor Ort an den untersuchten Putzen der beiden Objekte Essen und Vaihingen/Enz abgelösten Oberflächenschichten waren so dünn (vermutlich nur Anstrichschicht), daß keine anschließenden Ausbesserungen erforderlich waren. Eine hierzu parallel durchgeführte Zugprüfung an Laborproben des Wärmedämmverbundsystems, wie am Objekt Vaihingen/Enz vorhanden, hat ergeben, daß Abrisse nicht zwischen Putzschicht und Dämmstoff, sondern in den äußeren Zonen der Polystyrol-Dämmschicht auftreten. Die dazu erforderlichen flächenbezogenen Kräfte waren jedoch um eine Größenordnung höher als beim Abreißen der Haftfüßchen. Demnach ist davon auszugehen, daß zumindest bei den hier untersuchten Konfigurationen Begrünung/Untergrund nicht mit Abrißschäden zu rechnen ist.

4.4 Schadgas-Konzentrationen

Begrünungen sind in der Lage, Luftschadstoffe zu binden. Untersuchungen [6, 7] haben gezeigt, daß Schadstoffe in den Blättern der Begrünung akkumulieren, was die Luft theoretisch entlastet. Die Wirksamkeit der Pflanzen als Schadstoff-Filter wird in [6, 7] jedoch relativiert. Eine Hochrechnung zeigt, daß selbst bei Begrünung aller vertikaler Flächen eines Stadtteils nur 4 % des Gesamtstaubniederschlages eines Jahres gebunden werden könnten. Untersuchungen über Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf die Schadgasbelastung einer Fassade sind bislang nicht bekannt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten an einem weiteren begrünten Objekt (Efeu) in Stuttgart-Vaihingen im April 1987 Tast-

untersuchungen zur Bestimmung von CO₂- und SO₂-Konzentrationen im Vergleich begrünt/unbegrünt durchgeführt werden. Wenngleich absolute Aussagen über die Schadgasminderung an Oberflächen durch Begrünungen damit noch nicht abgeleitet werden können, so sind doch eindeutige Tendenzen feststellbar. Wie aus den in Bild 19 aufgetragenen Tagesgängen (Stundenmittelwerte gebildet aus Messungen im 10-Minuten-Rhythmus) ersichtlich ist, unterscheidet sich die CO₂-Konzentration unmittelbar vor der unbegrünter Wand nicht von denjenigen unter der Begrünung. Ein ausgeprägter Tagesgang liegt dabei jedoch vor. Schwefeldioxid wird offensichtlich im Blattwerk der Begrünung absorbiert. Die SO₂-Messungen zeigen deutliche Unterschiede in den Konzentrationen zwischen begrünter und unbegrünter Meßstelle. Auch hier sind deutliche Tagesgänge zu verzeichnen. Weitere Untersuchungen dazu erscheinen notwendig.

5. Zusammenfassung und praktische Bewertung

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, einen Beitrag zur Klärung wärme- und feuchtetechnischer Fragen bei begrünter Fassaden zu erbringen und Schädigungsrisiken nachzugehen. Dazu sind über etwa einen Jahreszyklus folgende Meßobjekte untersucht worden:

- Wilder Wein vor Mauerwerk in Essen
- Efeu vor Wärmedämmverbundsystem in Vaihingen/Enz
- Efeu vor Sichtbetonfassade in Stuttgart-Neugereut

Folgende Meßdaten wurden kontinuierlich registriert:

- Sonneneinstrahlung auf die Fassade
- Temperatur und Feuchte an der Außenwandoberfläche
- Temperatur und Feuchte 1 cm, 10 cm und 1 m vor der Wand
- Schlagregenbelastung der Wand
- Wärmeströme an der äußeren und inneren Wandoberfläche
- Windgeschwindigkeit 1 m vor der Wand

Die Messungen wurden gleichzeitig an einer typischen Stelle im begrünten wie auch im unbegrünten Bereich derselben Fassade durchgeführt. Durch den direkten Vergleich ist es möglich, den Einfluß der Begrünung festzustellen und zu interpretieren. Neben den kontinuierlichen Messungen wurden folgende Sonderuntersuchungen durchgeführt:

- Haftfestigkeit der Pflanzen auf Putz
- Haftung des Putzes am Untergrund
- Schadgas-Belastung einer begrünten Fassade
- Ermittlung von Feuchteverteilungen im Mauerwerk

Ergänzend zu den thermischen und hygrischen Messungen sind Berechnungen, insbesondere zur Interpretation längerfristiger energetischer und feuchtetechnischer Auswirkungen von Begrünungen, vorgenommen worden. Dabei zeigt sich prinzipiell, daß die Erfassung der Effekte bei Fassadenbegrünungen auf rechnerischem Wege mit ausreichender Genauigkeit möglich ist.

Die Untersuchungen erbrachten folgende Ergebnisse:

Strahlungsbelastung durch die Sonne

Eine voll ausgebildete Fassadenbegrünung stellt einen guten Schutz vor intensiver Sonneneinstrahlung dar. Je nach Begrünung werden zwischen 40 und 80 % der auf die Fassade treffenden Sonneneinstrahlung reflektiert und im Blattwerk absorbiert. Bei den untersuchten Fassaden wurde die eingestrahelte Sonnenenergie zu 50 % im Blattwerk absorbiert, 30 % wurden reflektiert und nur 20 % gelangten bis zur Wandoberfläche unter der Begrünung.

Windverhältnisse

Das Blattwerk verändert die natürliche Umströmung von Bauteiloberflächen. Diese Veränderung findet aber nur in der Begrünung statt.

Eine dichte und somit ausreichend dicke Begrünung bewirkt quasi eine Luftruhe direkt vor der Wand. Im Blattwerk treten Strömungsgeschwindigkeiten unter 0,5 m/s auf.

Oberflächentemperaturen

Die Wirkung einer Fassadenbegrünung auf das thermische Verhalten der Außenwand ist mit einer lichtdurchlässigen vorgehängten Fassade vergleichbar. Dabei sind die Reduzierung der Sonneneinstrahlung, die Einstrahlungsrichtung und somit die Orientierung der Fassade sowie eine gewisse Luftpolsterbildung von praktischer Bedeutung. Maximale Amplitudendämpfungen für Wandoberflächentemperaturen infolge von Begrünungen sind an strahlungsreichen Sommertagen mit etwa 30 K gemessen worden. Im Monatsmittel ergeben sich für Winterverhältnisse und immergrüne Bepflanzungen um ca. 2 K höhere Oberflächentemperaturen. Unter sommerlichen Bedingungen werden im Monatsmittel unter der Begrünung bei NW-orientierten Fassaden ca. um 1 K niedrigere, bei S- bzw. SW-orientierten Fassaden ca. um 2 bis 3 K niedrigere Temperaturen als an benachbarten unbegrünten Flächen festgestellt. Für den gesamten Meßzyklus werden neben Mittelwertbetrachtungen, die für thermisch/energetische Abschätzungen von Bedeutung sind, auch reale Tageszyklen für jeweils extreme Sommer- und Winterbedingung aus den Meßergebnissen zusammengestellt, die eine Art Grenzwertabschätzung für die untersuchten Objekte erlauben.

Temperaturverhältnisse vor der Oberfläche

Die Unterschiede zwischen begrünten und unbegrünten Fassaden treten am deutlichsten an strahlungsreichen Tagen auf. Während in den Nächten die "ruhende" Luftschicht das Temperaturgefälle im Blattwerk größer werden läßt, zeigt das Verhalten der Lufttemperatur 10 cm vor der Wand, daß der vordere Bereich der Begrünung zur Umsatzfläche für die Sonneneinstrahlung wird. Die Temperatur an der äußeren Oberfläche der Begrünung reagiert wegen der geringen

Wärmekapazität der Blätter deutlich schneller als die Oberflächen-temperatur der Wand auf Veränderungen der thermischen Beanspruchung. Da die Sonneneinstrahlung aber nicht mehr an einer Oberfläche, sondern in verschiedenen Blattebenen absorbiert und von der großen Blattoberfläche auf konvektivem Wege gleich wieder abgegeben wird, kommt es zu keiner ausgeprägten Erhöhung der Lufttemperatur im Bewuchs. Die äußere Zone der Begrünung kann fast die gleichen maximalen Temperaturwerte wie eine unbegrünte Wand erreichen. Etwa 1 m vor der Wand, also außerhalb der Begrünung, sind keine Temperaturunterschiede für begrünte und unbegrünte Bereiche festgestellt worden.

Wärmeverluste

Ein voll entwickelter, dichter und immergrüner Bewuchs bewirkt eine Wärmeverlustminderung um ca. 6 %. Im Verhältnis zu den mit verbessertem baulichen Wärmeschutz erreichbaren Einsparungen ist die energetische Wirkung einer Begrünung relativ bescheiden.

Luftfeuchte in der Begrünung

Die häufig vermutete Erhöhung der absoluten Luftfeuchte im Blattwerk macht sich praktisch nicht bemerkbar. Im Sommer können geringfügige Erhöhungen gemessen werden, wenn eine gute Versorgung der Pflanzen mit Wasser gegeben ist, eine hohe Regenbelastung vorliegt und keine intensive Sonneneinstrahlung stattfindet. Die relative Luftfeuchte an der Wandoberfläche unter der Begrünung, die von der Luftfeuchte im Blattwerk und der Oberflächentemperatur abhängt und für die Sorptions-/Desorptionsvorgänge im Bauteil verantwortlich ist, zeigt im Winter geringfügige Erniedrigungen um ca. 2 bis 8 % r.F., im Sommer treten Werte um etwa 4 bis 20 % r.F. höher als an unbegrünten Oberflächen auf.

Schlagregen

Fassadenbegrünungen stellen einen ausgezeichneten Regenschutz für die bewachsene Fassade dar. Bei allen untersuchten Fassaden konnte festgestellt werden, daß die Schlagregenbelastung der begrünten Fassade auf Null zurückgeht, wenn das Blattwerk voll ausgebildet ist.

Bauteilfeuchte

Über Entnahme von Bohrkernen und gravimetrischer Feuchtebestimmung sind im begrünten und unbegrünten Bereich einer Ziegel-Außenwand (Begrünung Wilder Wein; sommergrün) nach Winter- und Sommerperioden Feuchteverteilungen über den Wandquerschnitt gemessen worden. Ergänzend zu diesen "Momentaufnahmen" haben Feuchteberechnungen unter Verwendung der vor Ort registrierten Klimadaten eine gute Übereinstimmung erbracht und längerfristige Feuchteanalysen ermöglicht. Es zeigt sich, daß Begrünungen aufgrund der etwas veränderten Außenoberflächenbedingungen praktisch keine nachteiligen Feuchtwirkungen im Bauteil ergeben. Wegen der guten Regenschutzwirkung der Begrünung und der Tatsache, daß vor allem Regeneinwirkungen den äußeren Bauteilbereich beeinflussen, muß eher von einer Feuchteschutzwirkung der Begrünung gesprochen werden. Was die Gefahr von Tauwasserbildung in den innenliegenden Bauteilzonen betrifft, so hat die Begrünung - wenn überhaupt - eher positive Wirkungen, da sie die Gesamtfeuchtebelastung reduziert, somit die Wärmeleitung im Bauteil nicht erhöht und aufgrund der Tendenz der Temperaturerhöhung einer Tauwassergefahr eher entgegenwirkt.

Schadensrisiken

Den in der Literatur genannten und ernstzunehmenden Schädigungsrisiken (z.B. Eindringen von Wurzeln/Kletterfüßchen in Risse und Fugen, Absprengen oder Abreißen nicht mehr tragfähiger Putze, leicht ätzende Wirkung von Haftfüßchen) ist nachgegangen worden. An

den untersuchten Objekten konnten keine Schäden festgestellt werden und aus Befragungen hat sich ergeben, daß bei entsprechender Pflege der Begrünung und bei intaktem Untergrund nicht mit schädigenden Wirkungen zu rechnen ist. Aus Messungen der Abreißkräfte für Efeu und Wilden Wein ergibt sich eine Abhängigkeit vom Ast-Durchmesser. Die Größenordnungen dieser Kräfte liegen jedoch deutlich unter denjenigen, die zur Zerstörung des Untergrundes führen würden. Entsprechende Haft-/Zugprüfungen belegen dies.

Was die spezielle Problematik der Begrünung von Wärmedämmverbundsystemen angeht, so besteht häufig die Befürchtung, daß bei einem Bewuchs mit selbstklimmenden Pflanzen (z.B. Haftfüßchen; Efeu) über mehrere Geschosse durch das Eigengewicht des Bewuchses und infolge von Windkräften Abrißschäden oder Zerstörungen des Untergrundes auftreten könnten. Wenngleich bei dem untersuchten, eingeschossig mit Efeu bewachsenem Wärmedämmverbundsystem keine Langzeitschäden erkennbar waren und beim Abreißen von einzelnen Ästen keine Schädigungen des Untergrundes aufgetreten sind, so bleibt die Übertragbarkeit dieses Ergebnisses auf höhere Gebäude fraglich. Das festgestellte praktische Interesse an Begrünungsmaßnahmen bei diesem häufig angewandten Fassadensystem (Neubau und Altbau) legt es nahe, diesen Fragen - z.B. ob oder wie sich flächenbezogene Lasten aus dem Eigengewicht des Bewuchses bzw. aus überlagerten Windkräften mit der Bewuchshöhe verändern und wie derartige Kräfte durch Haftfüßchen pro Flächeneinheit übertragen und abgefangen werden - in vertieften Folgeuntersuchungen nachzugehen.

Schadgaskonzentrationen

Aus vergleichenden CO₂- und SO₂-Konzentrationsmessungen an begrünten und benachbarten unbegrünten Flächen geht hervor, daß

- die vermutete Änderung der CO₂-Konzentration innerhalb der Begrünung nicht zutrifft,
- die SO₂-Konzentration im Bereich des Blattwerkes aber deutlich geringer ist als vor unbegrünten Fassaden.

Die Bedeutung dieser Feststellung läßt sich noch nicht voll interpretieren. Hier erscheinen weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen auf den Begrünungsuntergrund und der Konsequenzen für Luftschadstoffbelastungen erforderlich.

6. Literatur

- [1] Althaus, C.: Bauwerk und Fassadenbegrünung mit Kletterpflanzen - Risiken, Schäden und präventive Schadensverhütung.
Teil 1: Das Gartenamt 35, (1986), S. 655-665.
Teil 2: Das Gartenamt 35, (1986), S. 746-755.
- [2] Althaus, C.: Fassadenbegrünung. Ein Beitrag zu Risiken, Schäden und präventiver Schadensverhütung. Patzer Verlag (1987).
- [3] Althaus, C.: Grüne Wände - aus der Traum? Bauschadenprobleme durch Kletterpflanzen wider Erwarten ungelöst. Weitreichende Konsequenzen für die Begrünungspraxis und Baumschulgewerbe absehbar. Deutsche Baumschule 4, (1987), S. 152-155.
- [4] Althaus, C.: Wir Fassadenbegrüner sitzen im Glashauss. Neue Landschaft 31 (1986), H. 12, S. 823-824.
- [5] Amtsblatt der Stadt Stuttgart: Grüne Dächer und Fassaden. Amtsblatt Stuttgart Nr. 18, 2. Mai 1985, S. 1-4.
- [6] Bartfelder, F., Köhler, M.: Experimentelle Untersuchungen zur Funktion von Fassadenbegrünungen. Dissertation TU Berlin, Fachbereich 14 Landschaftsentwicklung. Berlin 1987.
- [7] Bartfelder, F., Köhler, M.: Stadtklimatische und lufthygienische Entlastungseffekte durch Kletterpflanzen in hochbelasteten Innenstadtbezirken. Verh. der Gesellschaft für Ökologie, Band XVI, Gießen 1986.
- [8] Baumann, R.: Begrünte Architektur. Bauen und Gestalten mit Kletterpflanzen. Callwey Verlag (1983).
- [9] Baumann, R.: Pflanzliche Verschattungselemente an der Gebäudeoberfläche als Maßnahme zur Reduzierung der Strahlungsbelastung unter sommerlichen Bedingungen. Dissertation Gesamthochschule Kassel, Fachbereich 12, Kassel 1980.
- [10] DIN 4108, Teil 2: Wärmeschutz im Hochbau. Beuth Verlag Berlin 1981.

- [11] Doernach, R.: Über den Nutzen von biotektonischen Grün-systemen. Garten und Landschaft 6, (1979), S. 452-457.
- [12] Drum, M., Ludwig, K.: Stadtoasen. Grüne Höfe hinterm Haus. Edition Fricke, Rudolf Müller Verlag (1985).
- [13] Grub, H.: Grün zwischen Häusern. Ein Ratgeber für Städter. Callwey Verlag (1984).
- [14] Grün, W.: Sachverständige fragen - Dr. Grün antwortet. Informationsseminar des Rheinisch-Westfälischen Stuckgewerbe-verbands. Stuck 5 (1985), S. 18-20.
- [15] Kiermeier, P.: Betrifft: Fassadenbegrünung. Neue Land-schaft 31 (1986), H. 11, S. 732.
- [16] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation Universität-Gesamt-hochschule Essen 1983.
- [17] LBS Modernisierer Magazin: Begrünung - Mit Grün am Haus zur besseren und schöneren Umwelt. Fachschriften-Verlag Fellbach (1987).
- [18] Lögler, G., Sprenger, D.: Kletterpflanzen am Haus und im Garten, auf dem Balkon und im Zimmer. Auswahl, Pflanzung, Pflege, Kletterhilfen. Gräfe und Unzer Verlag, München (1986).
- [19] Ludwig, K.: Kletterpflanzen - Auswahl, Pflanzung, Pflege. BLV Garten- und Blumenpraxis, BLV Verlagsgesellschaft München (1985).
- [20] Ministerium für Ernährung, Umwelt und Forsten, Baden-Württem-berg: Besser leben mit der Natur. Folge 3: Bewachsene Fassaden.
- [21] Minke, G.: Fassadenbegrünung - Ein Beitrag zur Verbesserung des Mikroklimas und zur Einsparung von Heizenergie. Wohnung und Gesundheit 7 (1983), S. 7-10.
- [22] Minke, G., Winter, G.: Häuser mit grünem Pelz - Ein Handbuch zur Hausbegrünung. Fricke Verlag (1982).
- [23] N.N.: Es grünt so grün - auf Mauern, Hausfassaden und Dächern. Das Deutsche Malerblatt 9 (1983), S. 806-807.
- [24] N.N.: Fassadenbegrünung aus der Sicht des Deutschen Maler- und Lackiererhandwerks. Neue Landschaft 31 (1986), H. 9, S. 555.

- [25] Ohlwein, K.: Gebäudebegrünung - eine Notwendigkeit. DBZ 2, (1983), S. 191-194.
- [26] Ohlwein, K.: Grüner Wohnen. Gebäudebegrünung - eine Notwendigkeit. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller (1984).
- [27] Palmitter, L., Wheeling, T.: SUN-CODE A Program User's Manual Ecotope Groupe (1984).
- [28] Pohl, W.-H.,.: Begrünte Außenwände. Bauphysik 5 (1987), S. 240-251.
- [29] Pütz, J.: Hobbythek. Wohnen und Leben mit Pflanzen. VGS Verlagsgesellschaft Köln (1987).
- [30] Stiftung Warentest: Garten. Erfolge auch ohne Chemie. Profi: Eine Ratgeberreihe der Stiftung Warentest (1987).
- [31] Wilmers, F.: Der Einfluß von Vegetation in Gartenhöfen auf das Bioklima des Menschen, bestimmt durch Oberflächentemperaturmessung mit Infrarotscanner. Freiburger Geographische Hefte, H. 26 (1986), S. 155-164.

Danksagung

Allen Personen, Firmen und offiziellen Stellen, die zur Durchführung dieses Forschungsprojektes beigetragen haben, sei hiermit herzlich gedankt. Unser besonderer Dank gilt:

Herrn Dr. Baumüller	Chem. Untersuchungsamt, Stadt Stuttgart
Herrn K. Bertsch	Gips-Schüle-Stiftung, Stuttgart
Herrn Dr. Elsässer	Firma Bach, Stuttgart
Herrn Dr. Güldenpfennig	Firma Loba-Holmenkol-Chemie, Ditzingen
Herrn Dr. Idler	Hochbauamt der Stadt Stuttgart
Herrn Rockel	Margarethe-Krupp-Stiftung, Essen

Tabelle 1 Mehrjährige Kletterpflanzen und Kriterien zur Auswahl von Begrünungen nach [18, 19].

Pflanzenart	Lateinische Bezeichnung	Kletterhöhe [m]	Licht ¹⁾			Laub 2)	Bemerkung
			a	b	c		
Strahlengriffel	Actinida arguta	5 - 8	+	+		so	wärmebedürftig
Kiwipflanze	Actinida chinensis	4 - 8	+	+		so	wärmebedürftig
Akebie	Akebia quinata	5 - 8	+	+		so	wärmebedürftig
Pfeifenwinde	Aristolochina makrophylla	6 -10		+	+	so	guter Regenschutz
Rotbeerige Zaunrube	Bryonia dioica	2 - 4	+	+		so	giftig
Trompetenblume	Campsis radicans	6 -10	+			so	wärmebedürftig
Baumwürger	Celastrus orbiculatus	-12	+	+		so	giftig
Waldrebe	Clematis	-10		+	+	so	
Zaunwinde	Convolvulus sepium	1 - 3	+	+	+	so	anspruchlos
Spindelstrauch	Euonymus fortunei	2 - 3	+	+	+	im	
Knöterich	Fallopia aubertii	10 -15	+	+	+	so	schnellwachsend
Efeu	Hedera helix	-30		+	+	im	langsamwachsend
Hopfen	Humulus lupulus	4 - 6		+		so	nicht winterfest
Kletterhortensie	Hydrangea petiolaris	6 - 7		+	+	so	langsamwachsend
Winterjasmin	Jasminum nudiflorum	2 - 3	+			im	blüht im Winter
Staudenwicke	Lathyrus latifolius	2 - 3	+	+		so	nicht winterfest
Geißblatt	Lonicera	3 - 6		+		so	giftig
Fünffingriger Wilder Wein	Parthenocissus quinquefolia	8 -15	+	+		so	benötigt Kletterhilfe
Dreilappiger Wilder Wein	Parthenocissus tricuspidata	10 -15	+	+	+	so	Selbstklimmer
Kletterrose	Rosa	2 - 5	+			so	benötigt Kletterhilfe
Brombeere	Rubus fruticosus	- 5	+	+		so	geschmackv. Früchte
Immergrüne Brombeere	Rubus henryi	- 5		+	+	so	bedingt winterfest
Echter Wein	Vitis	10 -15	+			so	nur veredelt erlaubt
Blauregen	Wisteria sinensis	8 -12	+	+		so	stabile Kletterhilfe

- 1) Erforderliche Lichtverhältnisse
a: sonnig, b: halbschattig, c: schattig
2) Belaubung
so: sommergrün, im: immergrün

Tabelle 2 Wärmeübergangs-, Strahlungs- und Luftaustauschparameter zur Berechnung des energetischen Verhaltens eines Einzel-Modellraumes mit begrünter bzw. unbegrünter Fassade. Die Begrünung wird als teilweise lichtdurchlässige, vorgehängte Fassade mit definierter Hinterlüftung simuliert.

Parameter		Wärme- übergangs- koeffizient [W/m ² K]	Absorptions- grad [-]	Reflexions- grad [-]	Trans- missions- grad [-]	Luft- wechsel- zahl [h ⁻¹]
Innenraum/ Wandinnen- oberfläche		8	-	-	-	0,6
mit Begrünung	Wandaußen- oberfläche/ Begrünung	12	0,55	0,45	-	240
	Begrünung / Umgebung	23	0,5	0,3	0,2	-
ohne	Wandaußen- oberfläche/ Umgebung	23	0,55	0,45	-	-

Tabelle 3 Schichtaufbau, Materialkennwerte und Flächenanteile der umschließenden Bauteile eines Einzel-Modellraumes, dessen thermisches und energetisches Verhalten alternativ mit ungedämmter bzw. gedämmter Außenwandkonstruktion berechnet wird.

Bauteil	Aufbau	Schicht- dicke [m]	Dichte [kg/m ³]	Wärme- leitfähigkeit [W/m K]	k-Wert [W/m ² K]	Fläche [m ²]
1) Außenwände ungedämmt (Konstr. A)	Beton Luft Beton	0,20 0,04 0,05	2400 1 2400	2,1 1/λ = 0,14 2,1	2,33 (unbegrünt)	64
2) Außenwände gedämmt (Konstr. B)	Beton Dämmung Beton	0,20 0,04 0,05	2400 30 2400	2,1 0,04 2,1	0,78 (unbegrünt)	64
Fußboden	Estrich Dämmung Beton	0,05 0,05 0,20	2000 30 2400	1,4 0,04 2,1	0,64	16
Decke	Putz Beton Dämmung	0,015 0,20 0,20	1400 2400 30	0,7 2,1 0,04	0,19	16

1) z.B. Außenwand bei unbeheiztem Treppenhaus; ohne Wärmeschutzanforderung ($k = 2,33 \text{ W/m}^2\text{K}$)

2) z.B. durchschnittlich gedämmte Wohnungsaußenwand ($k = 0,78 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Tabelle 4 Berechnete Heizwärmeverluste (Transmission und Lüftung) eines Einzel-Modellraumes mit durchschnittlich gedämmten bzw. ungedämmten Außenwänden und begrünter bzw. unbegrünter Südfassade.
 Bauteilkennwerte: Gemäß Tabellen 2 und 3.
 Begrünung: Efeu
 Soll-Raumtemperaturen: 20°C tags (6-22 Uhr)
 16°C nachts (22-6 Uhr)
 Umgebungsbedingungen: Standort Stuttgart (TRY)

	Heizwärmeverlust des Raumes		Wärmeverlust- minderung	
	Südfassade unbegrünt [kWh/a]	Südfassade begrünt [kWh/a]	[kWh/a]	[%]
Außen- wände				
gedämmt (Konstr. B)	4954	4588	366	7
ungedämmt (Konstr. A)	15245	14360	885	6

Parameter - Profile

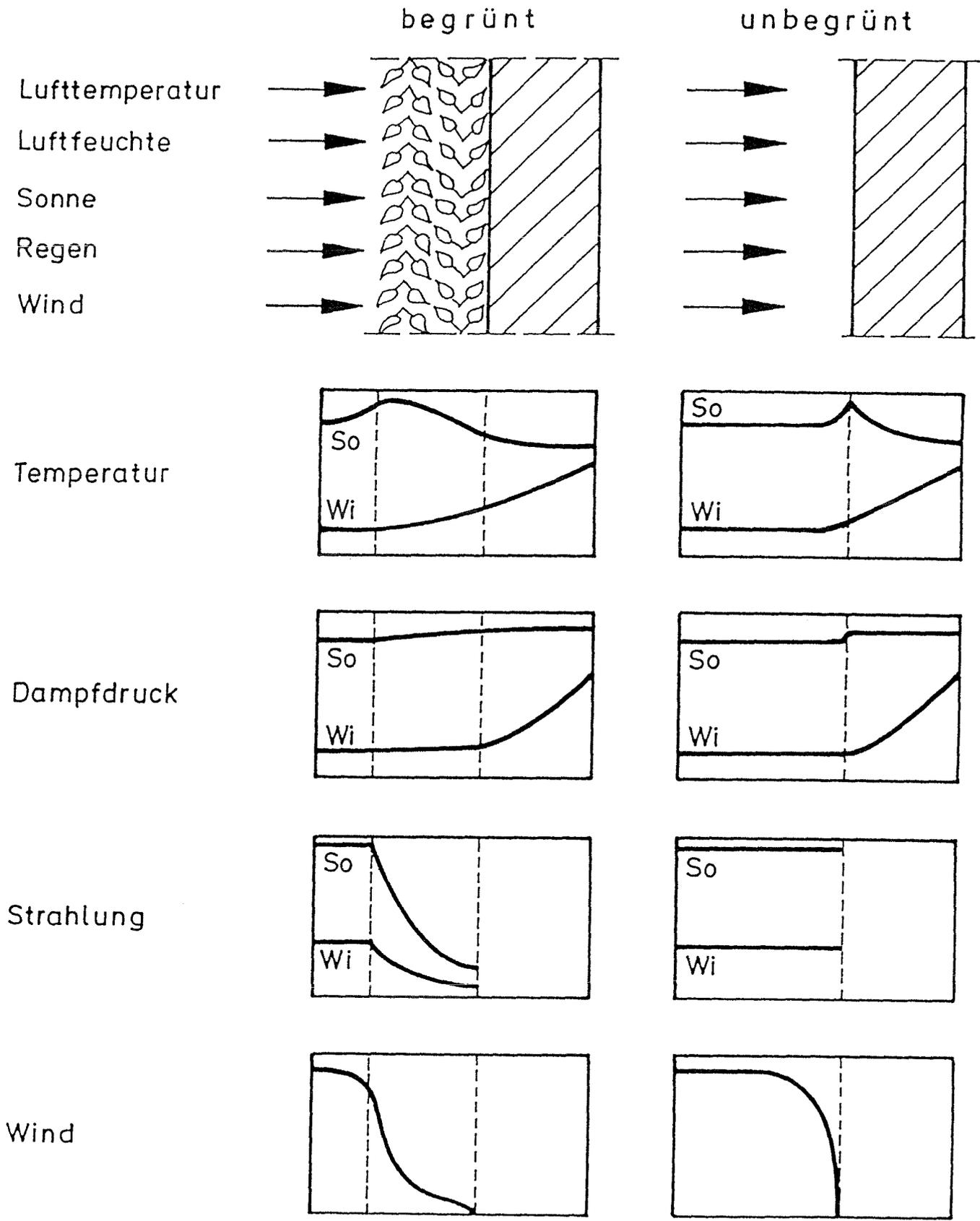


Bild 1 Schema-Darstellung der zu erfassenden Mikroklima-Parameter an begrünten bzw. unbegrünten Fassaden sowie qualitative Profilverläufe der dabei wesentlichen Meßgrößen für Sommer- und Winterfälle.



Bild 2 MeBobjekt Essen-Margarethenhöhe. Wilder Wein vor verputztem Ziegel-Mauerwerk.



Bild 3 MeBobjekt Vaihingen/Enz. Efeu vor Thermohautsystem
(Nordwest-Orientierung).



Bild 4 MeBobjekt Stuttgart-Neugereut. Efeu vor Sichtbeton-Fassade (Südwest-Orientierung).



Bild 5 Meßeinrichtung zur Erfassung von Mikroklima-Parametern an allen begrünten und unbegrünten Fassadenbereichen der untersuchten Objekte, hier beispielhaft dargestellt am unbegrünten Fassadenbereich des Meßobjektes Essen-Margarethenhöhe. Sie besteht aus (von rechts nach links):

- Solarimeter an der Wand
- Temperatur- und Feuchtefühler an der Wand
- α -Galgen (Temperatur in 0, 1, 5, 10 cm vor der Wand)
- Schlagregenschirm an der Wand
- Wärmestrommesser an der Wand
- Windmesser 1 m vor der Wand
- Temperatur- und Feuchtefühler 1 m vor der Wand

Besonnung

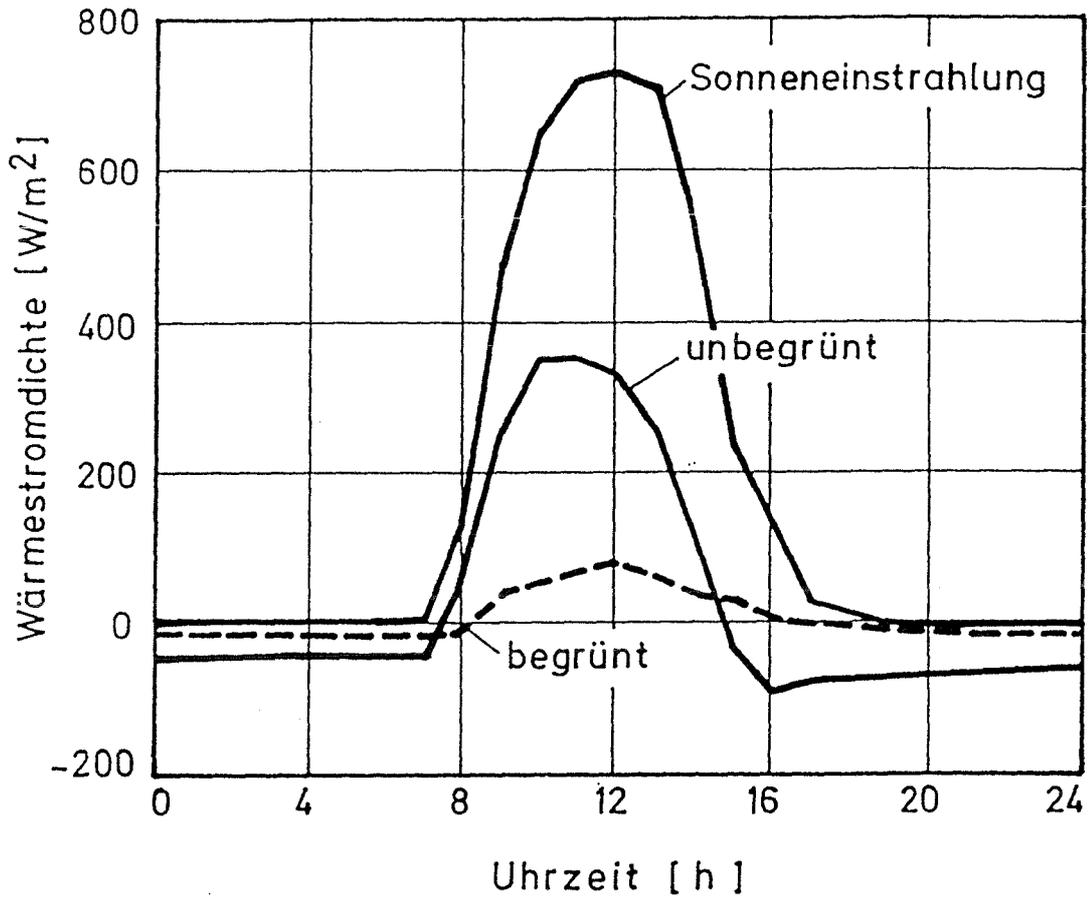


Bild 6 Gemessener Tagesgang der Sonneneinstrahlung und deren Auswirkungen auf die Wärmeströme an begrüntem und unbegrüntem Außenwandoberflächen, beispielhaft dargestellt für eine Südfassade an einem heiteren Sommertag (Meßobjekt Essen).

Winter

begrünt

unbegrünt

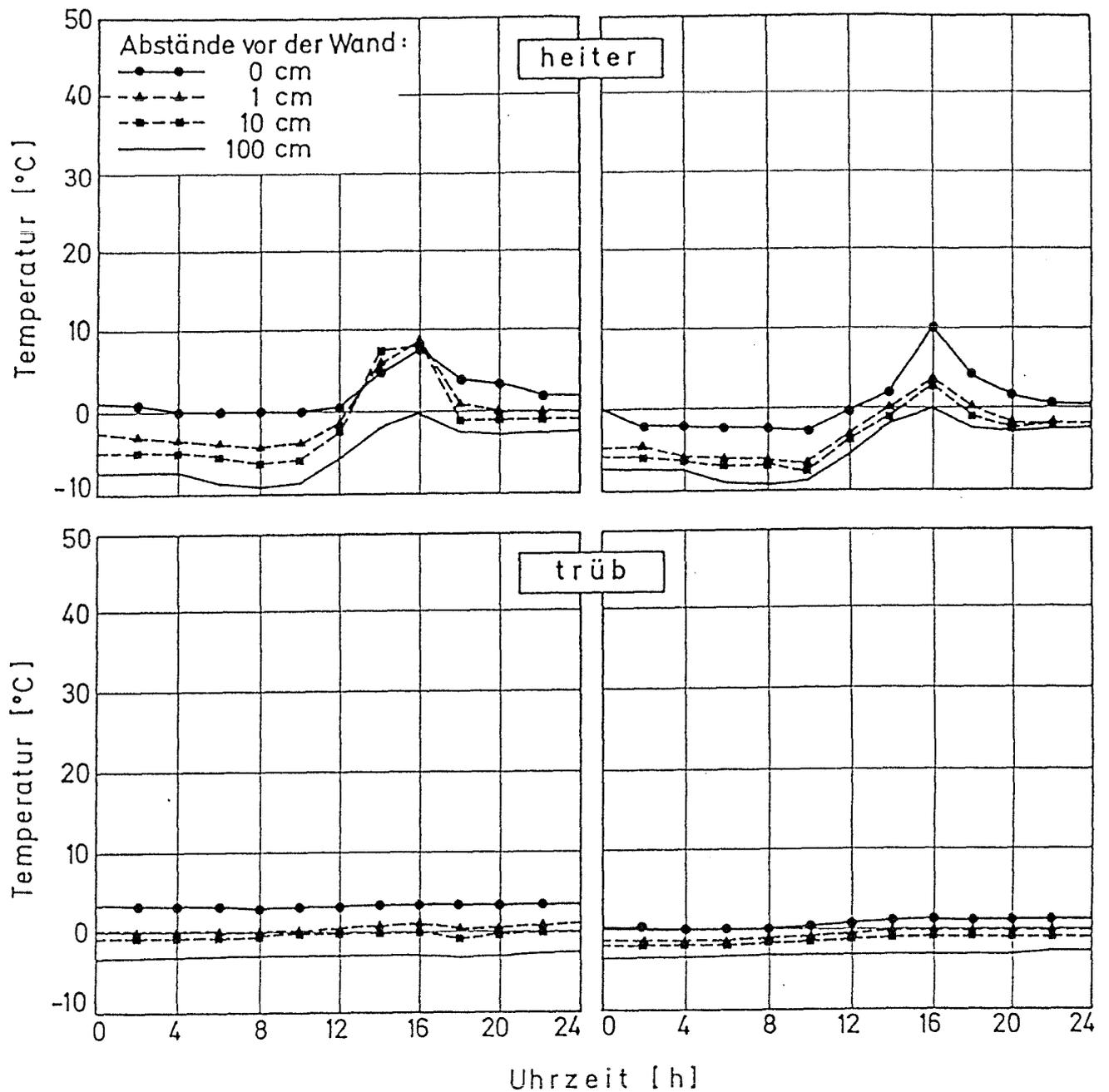


Bild 7 Gemessene Tagesgänge der Oberflächen- und Lufttemperaturen an begrünter und unbegrünter Fassade für einen heiteren und einen trübten Wintertag (Meßobjekt Neugereut, Efeu, Südwest-Fassade).

Sommer

begrünt

unbegrünt

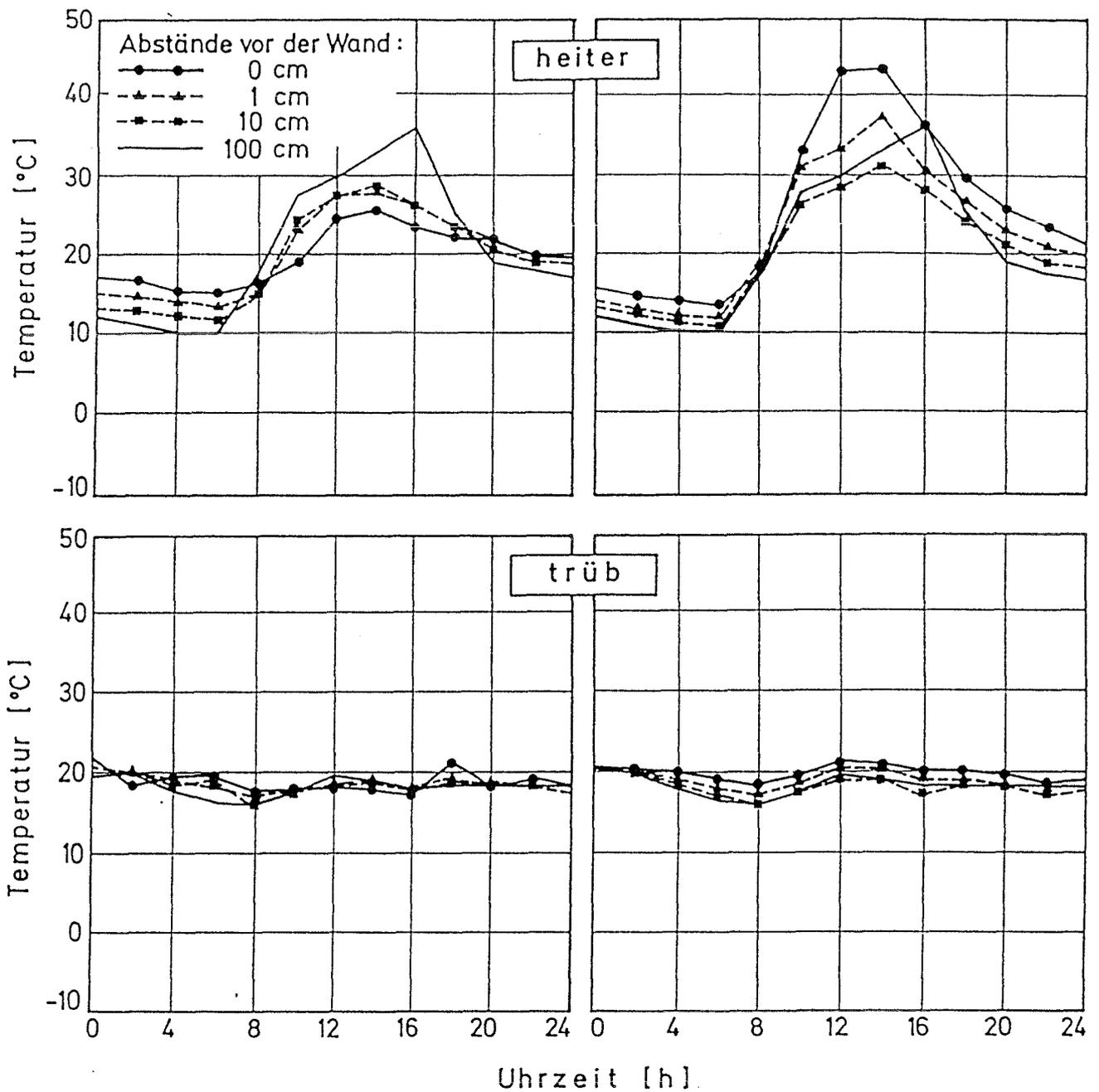


Bild 8 Gemessene Tagesgänge der Oberflächen- und Lufttemperaturen an begrüntem und unbegrüntem Fassaden für einen heiteren und einen trübem Sommertag (Meßobjekt Neugereut, Efeu, Südwest-Fassade).

Oberflächentemperaturen

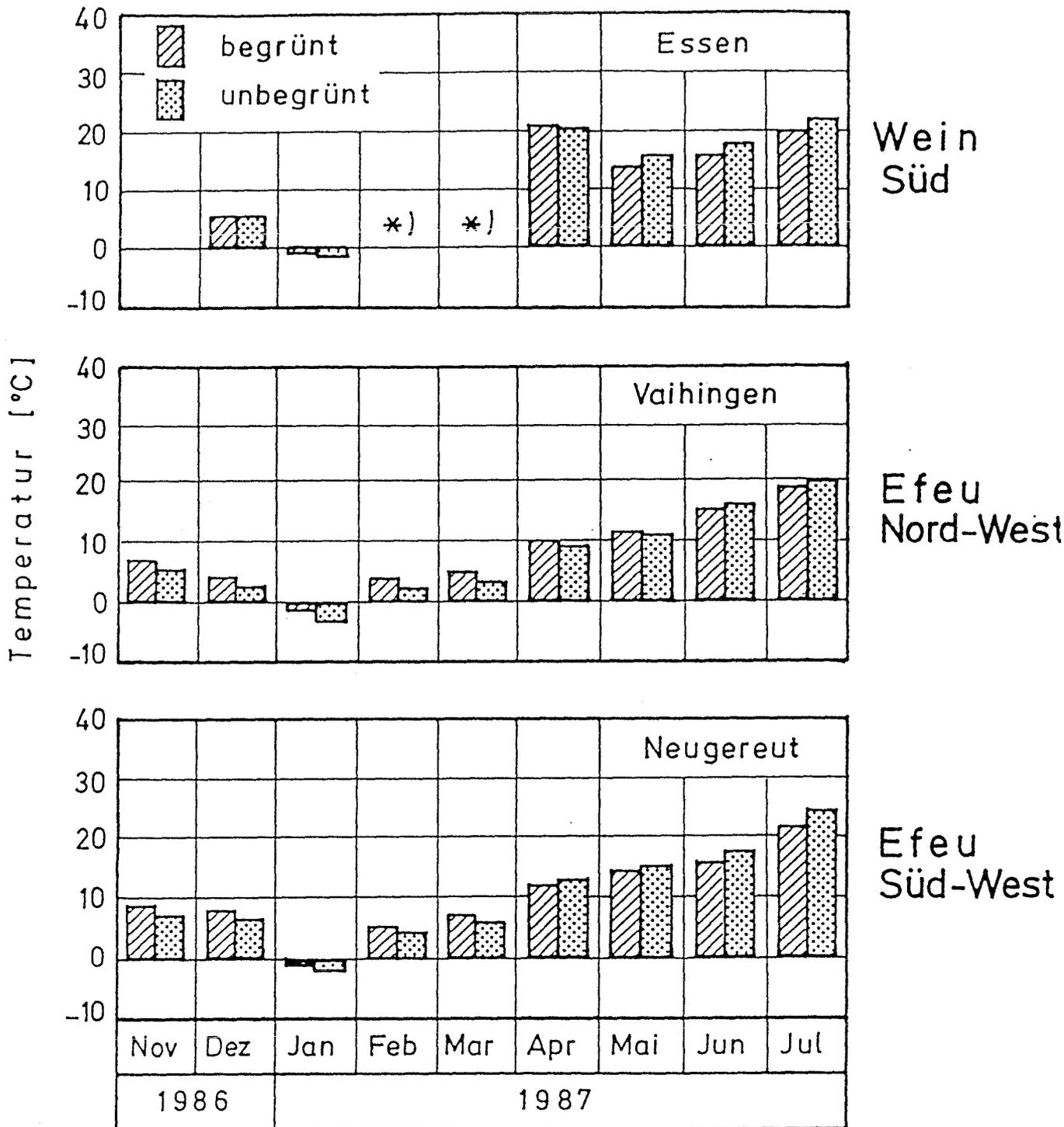


Bild 9 Monatsmittelwerte gemessener Außenoberflächentemperaturen von begrüntem und unbegrüntem Fassaden an den Meßstationen Essen, Vaihingen/Enz und Stuttgart-Neugereut im Untersuchungszeitraum von November 1986 bis Juli 1987.

*) = Meßunterbrechung

Messung / Rechnung

begrünt

unbegrünt

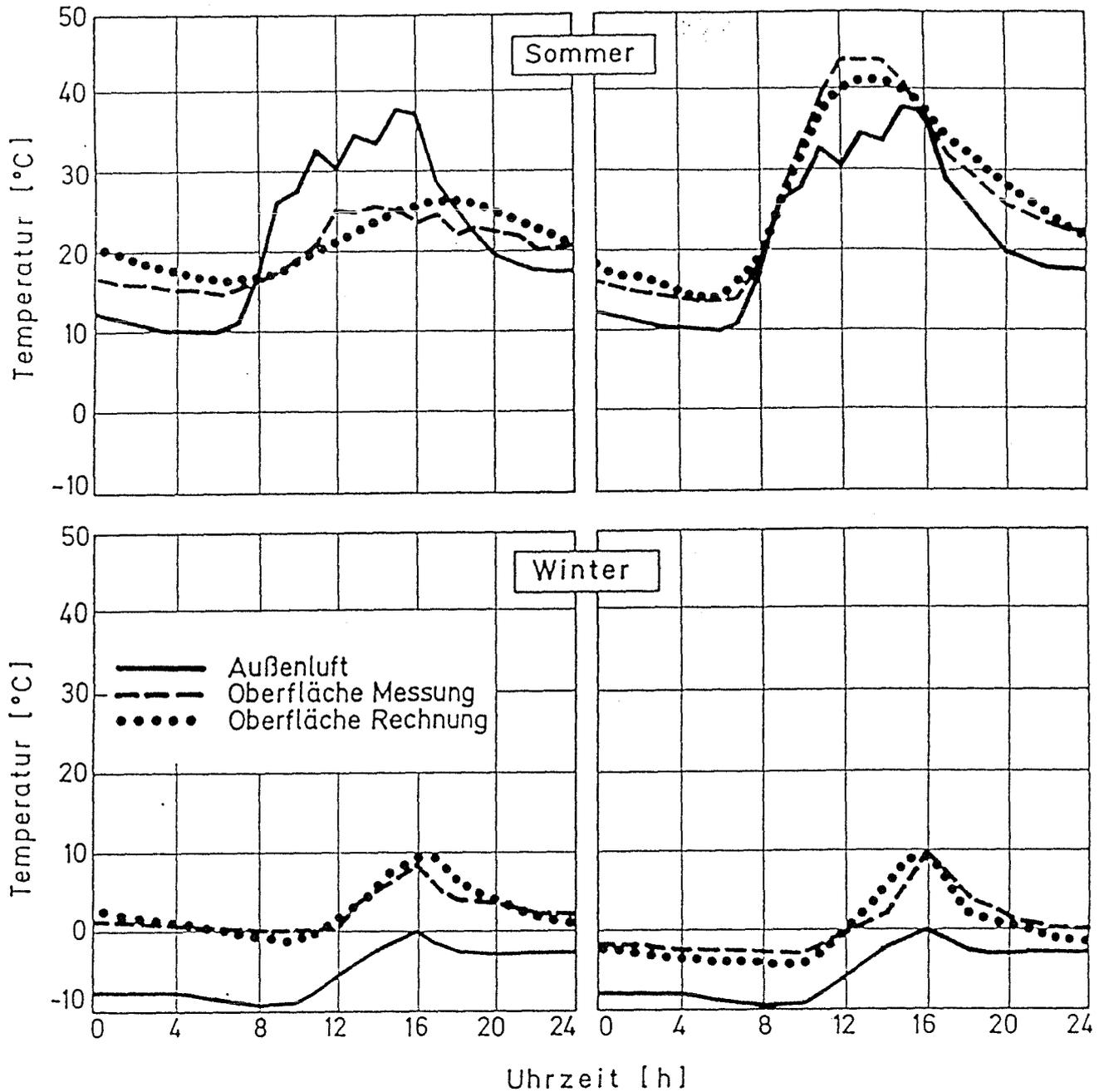


Bild 10 Tagesgänge für Außenlufttemperaturen sowie für gemessene und rechnerisch ermittelte Oberflächentemperaturen an begrüntem und unbegrüntem Fassaden für einen heiteren Sommertag und einen heiteren Wintertag (Meßobjekt Neugereut, Efeu, Südwest-Fassade).

Wärmeströme

Süd ; innen

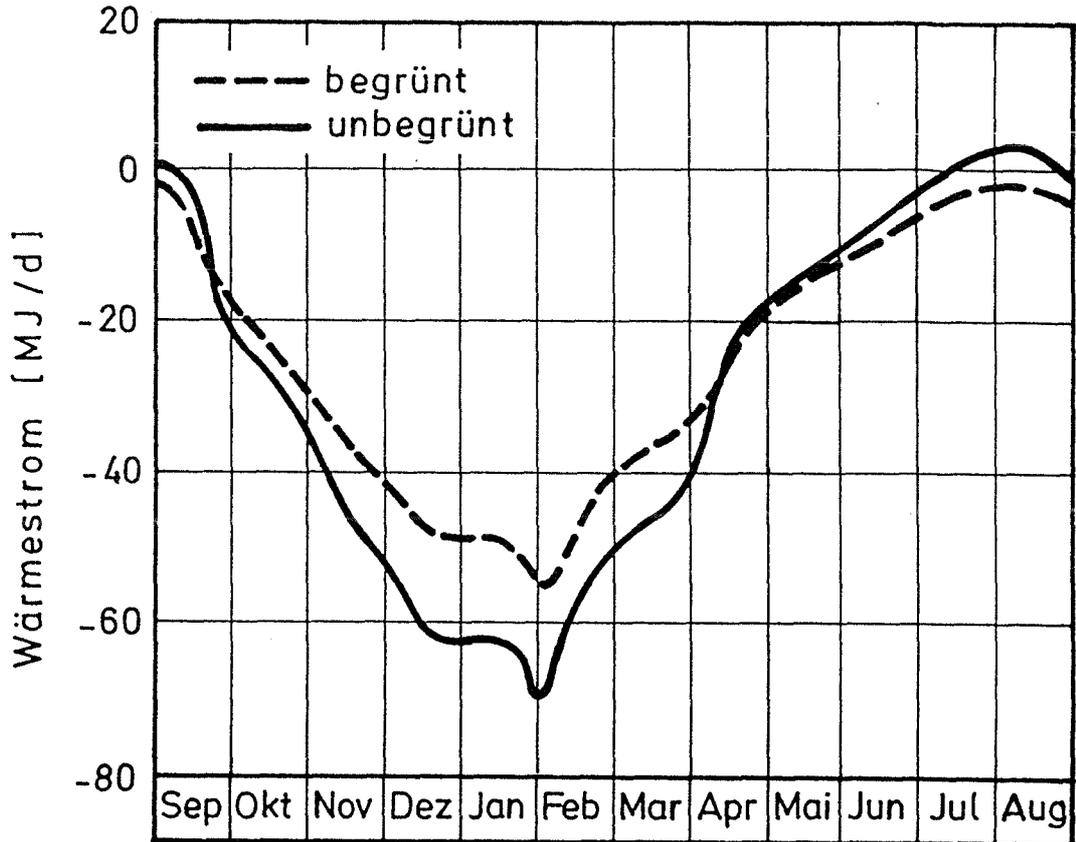


Bild 11 Berechnete Jahresverläufe der Wärmeströme an der inneren Oberfläche einer begrünter bzw. unbegrünter Südfassade.

Bauteilkennwerte: Gemäß Tabellen 2 und 3, ungedämmte Außenwände.

Wandfläche: 16 m²

Begrünung: Efeu

Soll-Raumtemperaturen: 20°C tags (6-22 Uhr)

16°C nachts (22-6 Uhr)

Umgebungsbedingungen: Standort Stuttgart (TRY)

Oberflächentemperaturen

Süd

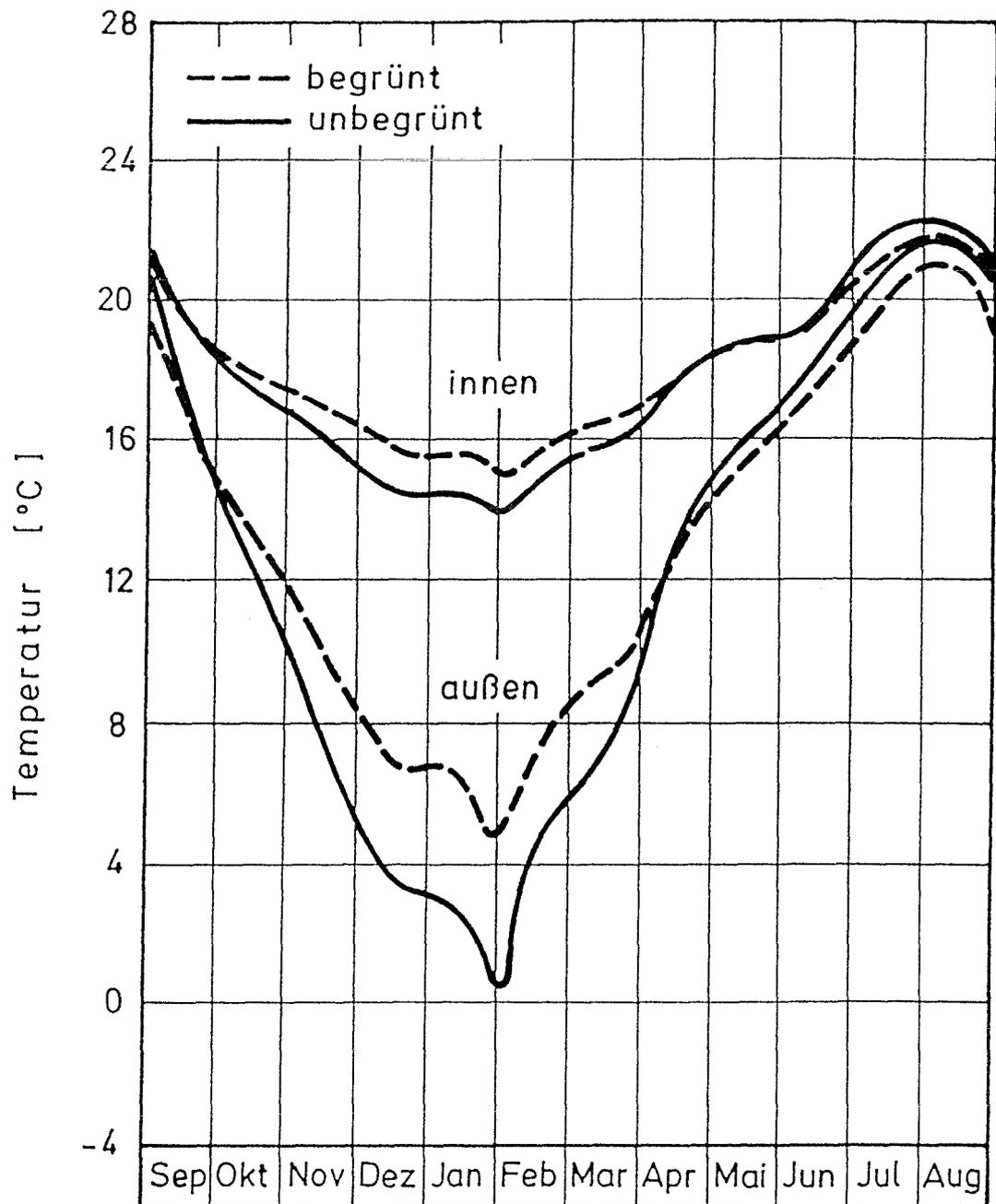


Bild 12 Berechnete Jahresverläufe der inneren und äußeren Oberflächentemperaturen einer begrünten bzw. unbegrünter Südfassade.

Bauteilkennwerte: Gemäß Tabellen 2 und 3, ungedämmte Außenwände.

Begrünung: Efeu

Soll-Raumtemperaturen: 20°C tags (6-22 Uhr)

16°C nachts (22-6 Uhr)

Umgebungsbedingungen: Standort Stuttgart (TRY)

Rel. Oberflächenfeuchte

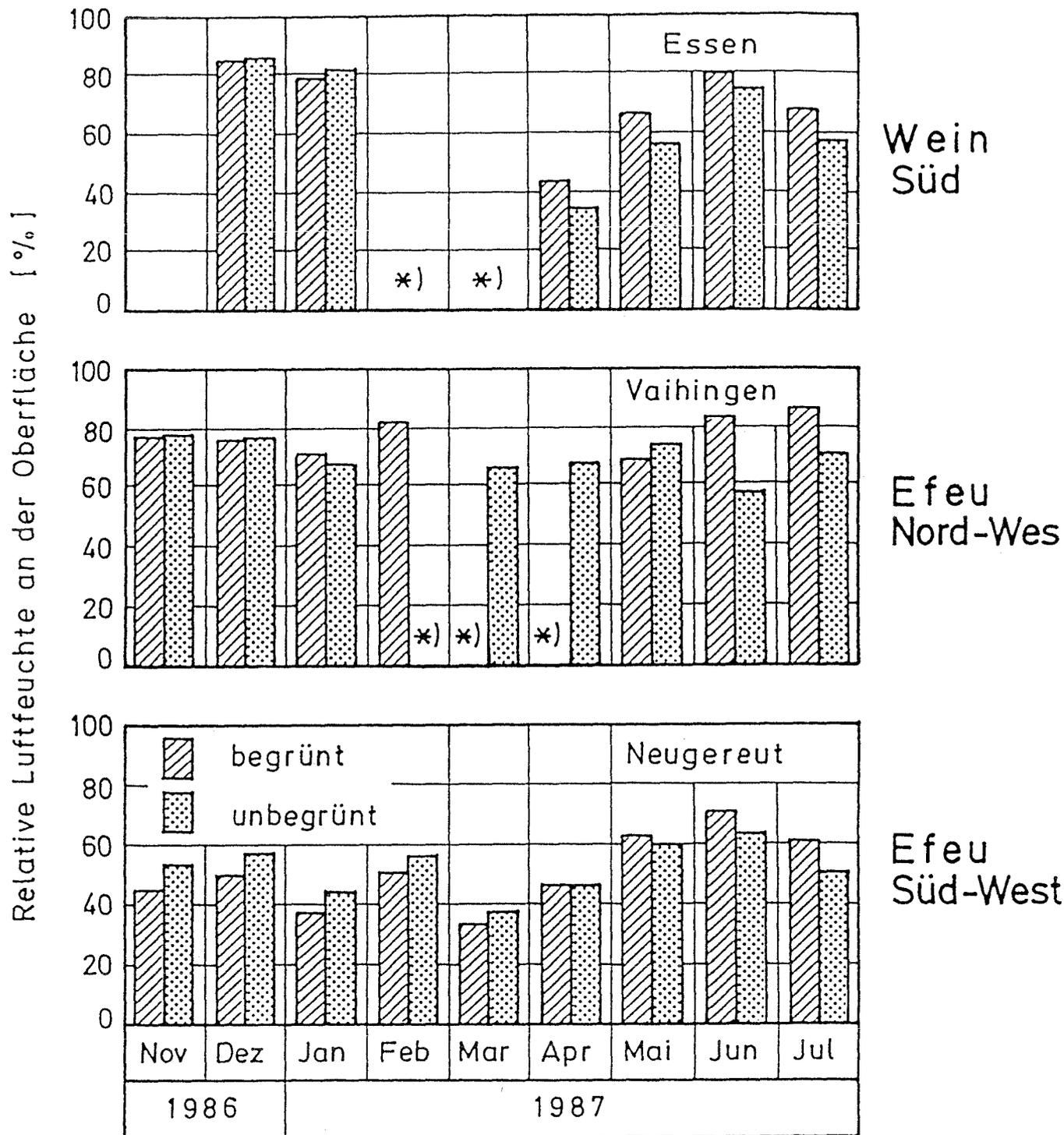


Bild 13 Monatsmittelwerte der relativen Feuchte auf der Außenoberfläche von begrüntem und unbegrüntem Fassaden an den Meßstationen Essen, Vaihingen/Enz und Stuttgart-Neugereut im Untersuchungszeitraum von November 1986 bis Juli 1987.

*) = Meßunterbrechung

Schlagregen

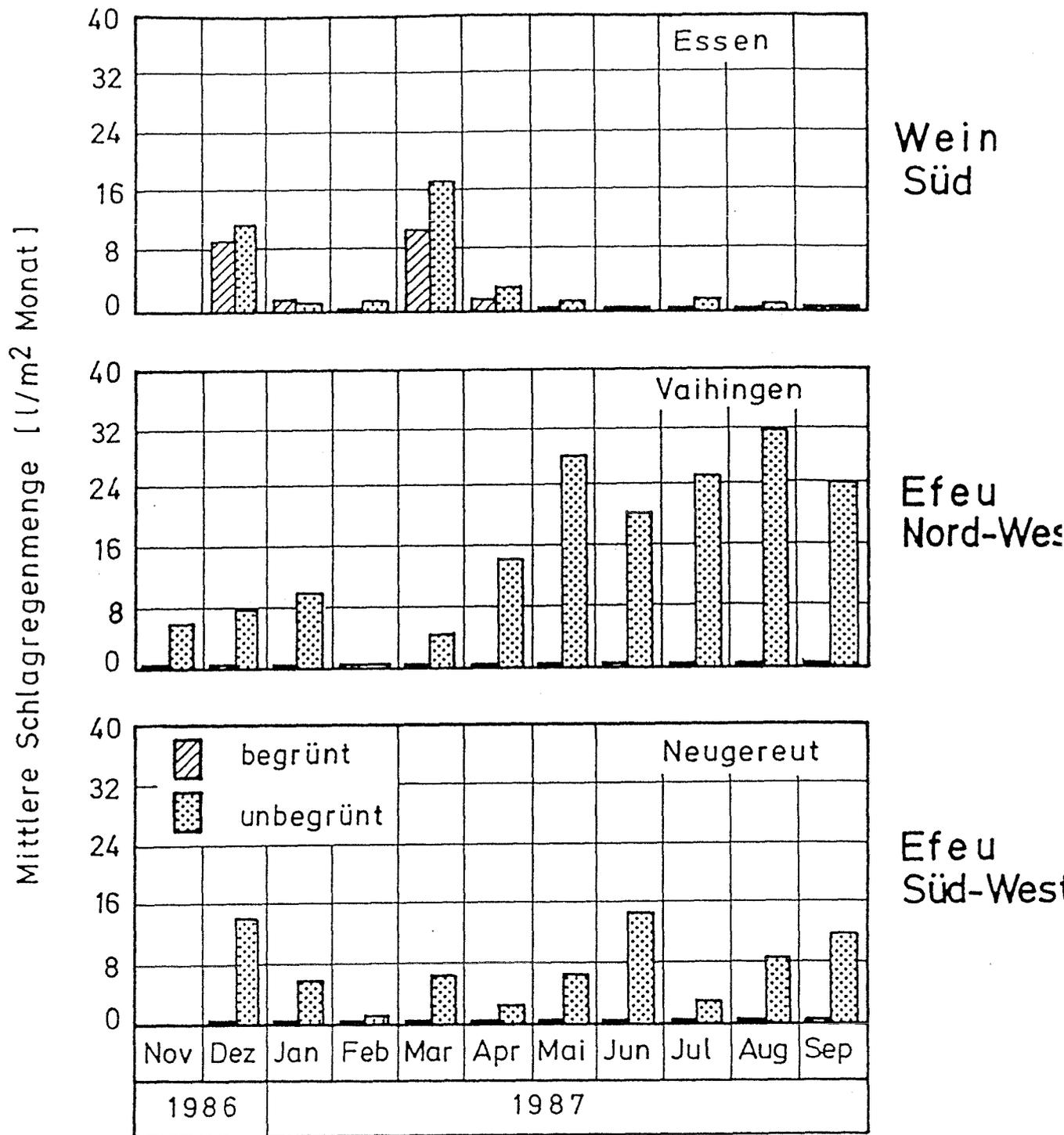


Bild 14 Gemessene monatliche Schlagregenbelastungen von begrünten und unbegrüntem Fassaden an den Meßstationen Essen, Vaihingen/Enz und Stuttgart-Neugereut im Untersuchungszeitraum von November 1986 bis September 1987.



Bild 15 Trocken-Kernbohrung an der begrünten Fassade des Objektes Essen-Margarethenhöhe zur Bestimmung des Feuchteprofils im Wandquerschnitt (Bohrkerndurchmesser 10 cm).

Feuchteprofile

Ziegel - Mauerwerk

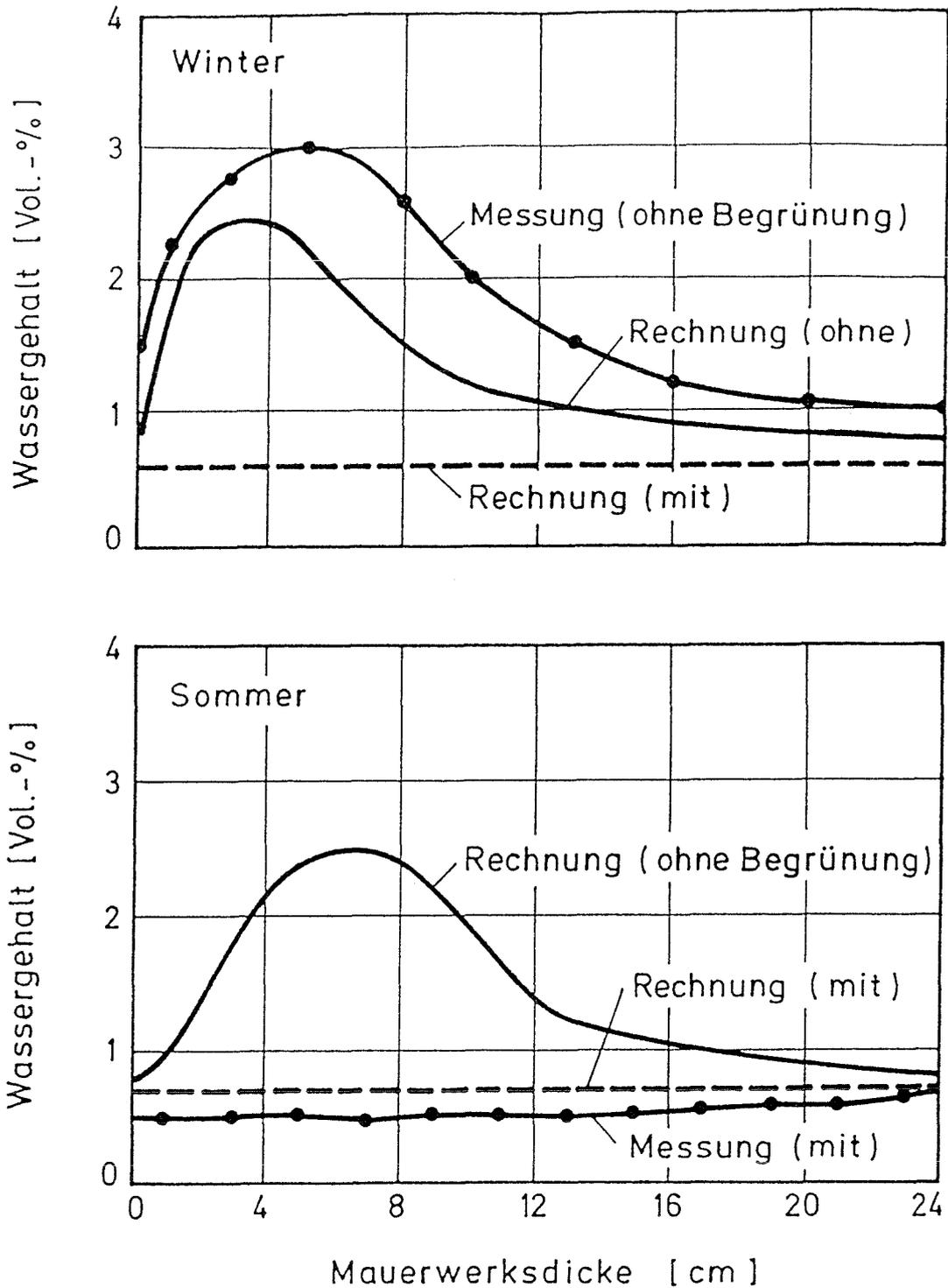


Bild 16 Feuchteverteilungen über den Mauerwerksquerschnitt einer begrüneten bzw. unbegrüneten Ziegel-Außenwand. Vergleich von rechnerischen Ergebnissen mit Messungen an einer mit Wildem Wein bewachsenen Wand für Winter- und Sommerfälle (Meßobjekt Essen).
Randbedingungen für Berechnung:
 Außen: Gemessene Klimadaten vor Ort
 Innen: 20°C, 50 % r.F. konstant.

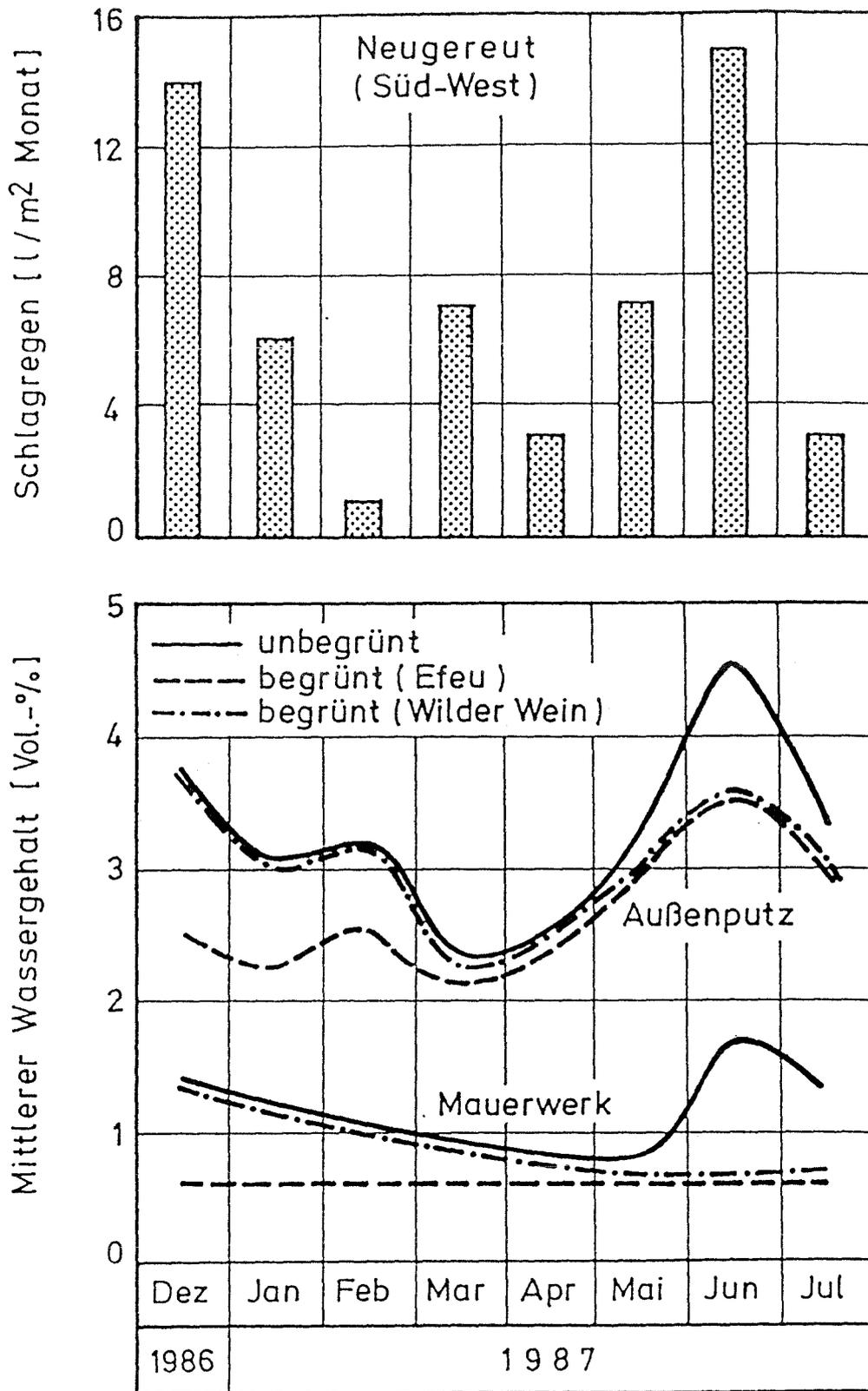


Bild 17 Gemessene monatliche Schlagregenbelastung (oben) und zeitliche Verläufe des berechneten mittleren Wassergehaltes (unten) in Außenputz und Mauerwerk einer unbegrünten sowie einer mit Wildem Wein bzw. Efeu begrünten Ziegelwand (Standort: Stuttgart-Neugereut; Südwest-Orientierung).

Abreißen

Wilder Wein

Efeu

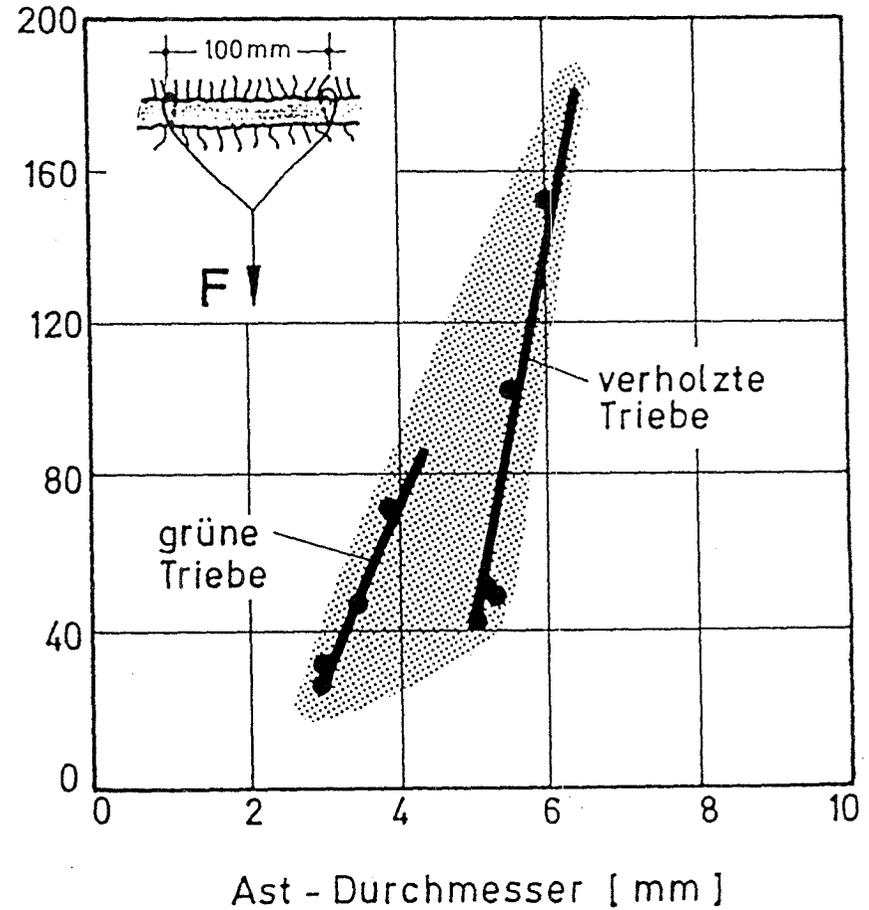
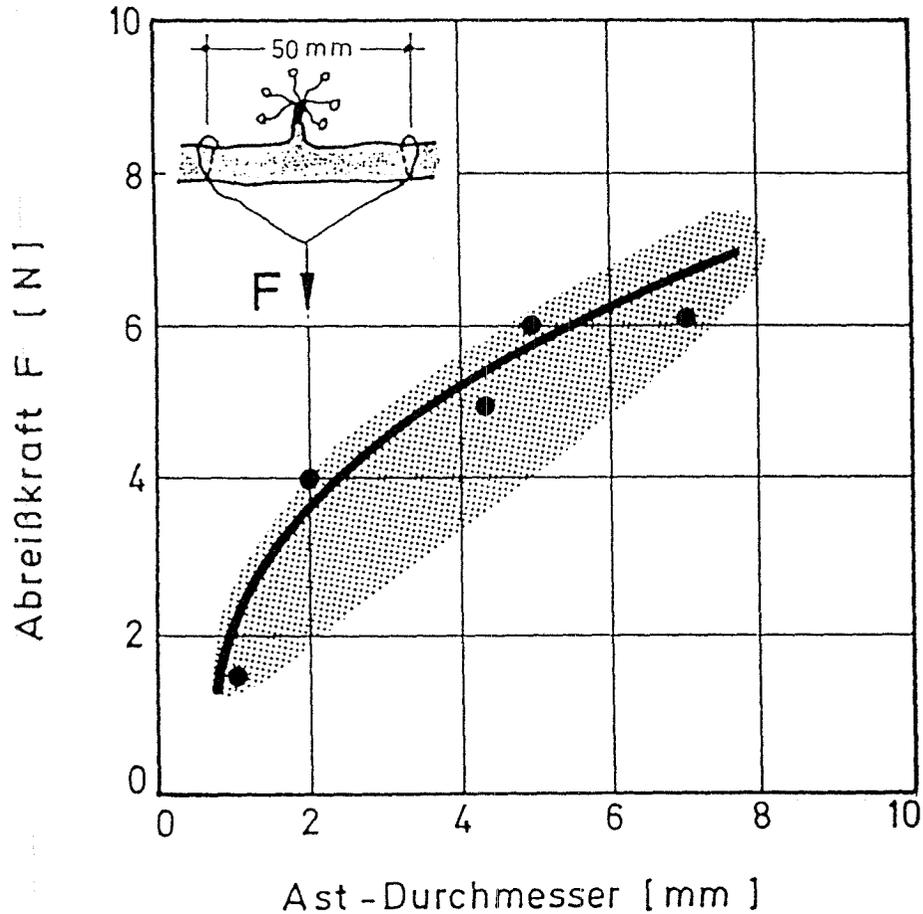


Bild 18 Zum Abreißen von Kletterpflanzen (Wilder Wein, Efeu) notwendige Kräfte in Abhängigkeit von der jeweiligen Astdicke. Der Untergrund blieb bei den durchgeführten Abreißversuchen unversehrt (Untergrund: Putz).

Gas-Konzentrationen

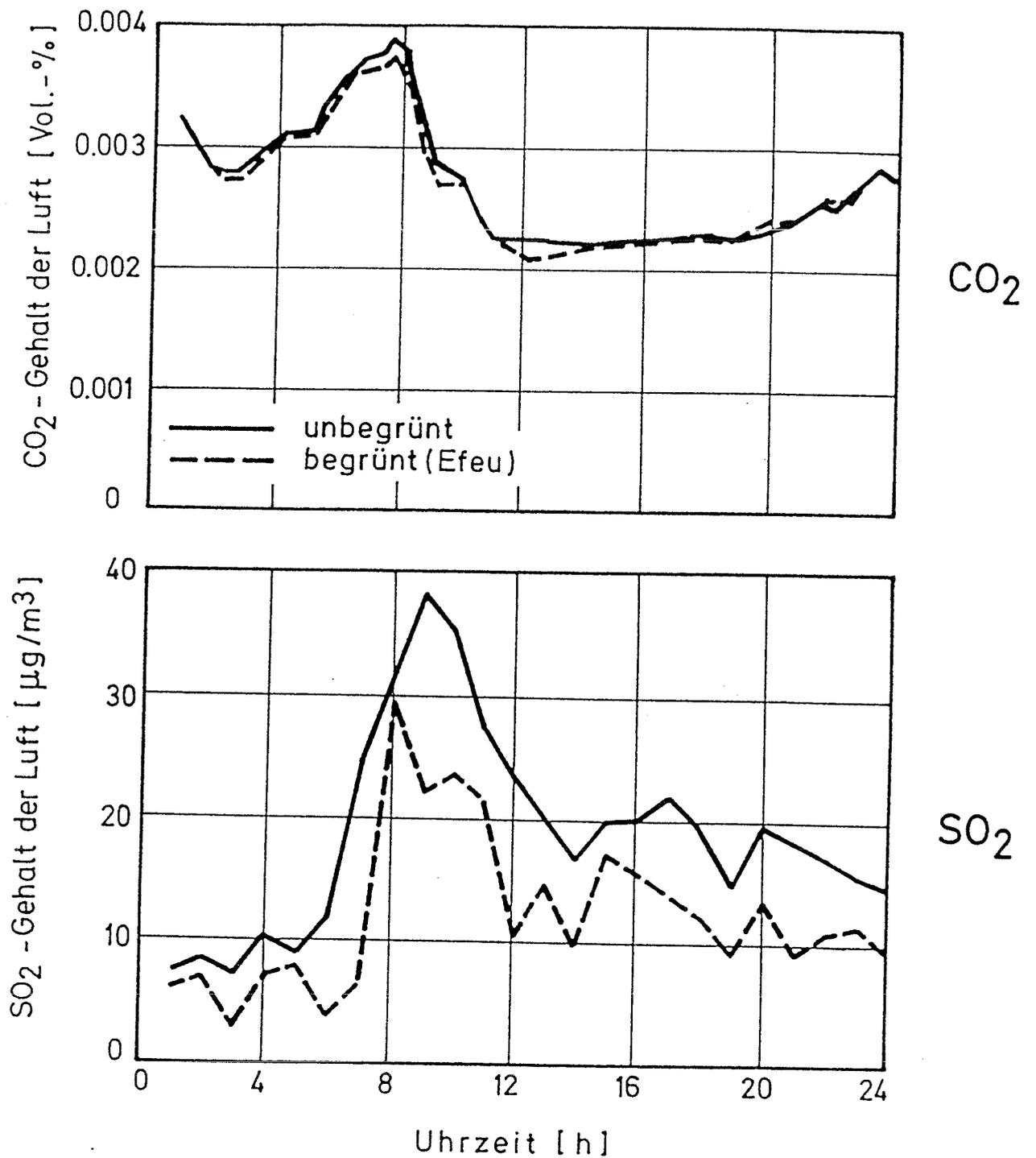


Bild 19 Gemessene Tagesgänge von CO₂- und SO₂-Konzentrationen vor begrüntem und unbegrüntem Fassaden (Efeu).
 Standort: Stuttgart-Vaihingen
 Meßzeitpunkt: April 1987

Fraunhofer-Institut für Bauphysik**Effects of facade greenery on the heat and moisture behaviour
of external walls and damage risks.**

- Brief report -

Dr.-Ing. K. Kießl und Dipl.-Met. J. Rath

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)

Department Heat and Climate

(Director: o. Prof. Dr.-Ing. habil. K.A. Gertis)

1. Aim of investigation

In the last years greenery on facades has been discussed intensively and controversially with respect to ecology, climate and building physics. But only in few cases arguments could be supported by experimental results. The aim of this investigation was to examine the influences of greenery on the microclimate in front of the surface and on the heat and moisture balance of external walls of selected objects. Short-term effects, e.g. daily temperature changes of the outer wall surface, as well as long-term effects on heat losses and moisture behaviour under seasonal climatic conditions are included. Further it will be tested whether there are damages due to the plants and changes in gas concentration of CO₂ and SO₂.

2. Investigation procedure

In order to clarify heat and moisture effects on facades with greenery measurements have been carried out over the period of about one year on the following objects:

- Virginia creeper on masonry (Essen; south orientation; summergreen)
- Ivy on exterior insulation system (Vaihingen/Enz; northwest; evergreen)
- Ivy on concrete facade (Stuttgart-Neugereut; southwest, evergreen)

Solar radiation, air temperature, air humidity, driving rain, heat flow and wind velocity have been measured and registered in greened and not greened areas of the same facade in order to find out and to evaluate greenery influences by direct comparison. Additionally, special investigations on adhesive strength of plants on the exterior plaster and of the exterior plaster

on the undercoat, on aggressive gas loads in the greenery and on moisture distributions in the masonry as well as supplementary calculations of longterm energy and moisture effects will be carried out.

3. Summary of results

Sun radiation, wind, driving rain

Fully developed greeneries are a good protection against intensive solar radiation. Between 40 % and 80 % of the radiation is reflected and absorbed by the foliage. In the case of the investigated facades 50 % of the solar energy was absorbed, 30 % reflected and only 20 % reached the surface of the wall under the greenery. The foliage changes the air flow at the wall surface, but only inside the greenery. A well developed greenery produces a sort of no wind zone near the wall surface. Within the foliage there is a circulation velocity of less than 0,5 m/s. The greenery is a very effective protection against driving rain. In the cases investigated here it was found out that no driving rain reaches the surfaces of the facade under the greenery when the foliage is developed completely.

Air temperature and air humidity in the greenery

The greatest differences between greened and non-greened areas of facades can be stated on days with high sun radiation. During the night the "windstill" zone within the greenery increases the temperature gradient across the green layer. The behaviour of air temperature about 10 cm in front of a greened wall shows that the outer region of the greenery acts as a conversion area for sun radiation. Because of the small heat capacity of the leaves the temperature at the vegetation surface changes clearly faster with thermal loads than temperature on the wall surface. Since sun radiation is absorbed at different planes across the greenery layer, instead of only at one surface, and immediately given back from the total surface of leaves by convection, there results no extreme increase in temperature inside the foliage eventhough the outer region of the vegetation can reach the same maximum temperatures as measured on the surface of the wall without greenery. About 1 m in front of the vegetation there are no temperature differences between greened and non-greened facade areas (see Fig. 1). The often supposed increase of absolute humidity in the foliage was not observed. In sommer a small increase can be measured when the plants are well supplied with water, after heavy rainfall and when there is no intensive solar radiation.

Temperature and relative humidity on the wall surface

The effects of the greenery to the thermal behaviour of the wall surface are comparable with the effects of a transparent and ventilated shell in front of the facade. The reduction of sun radiation, the facade orientation and the formation of an air pad are of practical importance. On summer days with high radiation a maximum damping of wall surface temperature amplitudes caused by greenery is measured up to about 30 K. Under winter conditions and with evergreen plants the monthly mean values for surface temperatures are about 2 K higher. Under summer conditions the monthly mean values are lower to about 1 K at northwest and about 2 to 3 K at south resp. southwest oriented facades compared with surface temperatures in the non-greened facade areas. The relative humidity on the wall surfaces under the greenery which is dependent on humidity in the foliage and on surface temperature and responsible for the sorption and desorption processes in the wall is about 2 to 8 % lower in winter and about 4 to 20 % higher in summer compared with non-greened surfaces.

Calculation Models

Since the measured values for the three investigated objects cannot be generalized as they are and since measuring of heat and moisture effects in walls caused by greenery is very difficult or even not possible, calculation models for heat and moisture transfer are used. On principle it turns out that the effects of greenery can be determined with sufficient accuracy by calculations. This is shown in Fig. 1 for the temperature on the wall surfaces and is regarded in the following.

Heat fluxes and heating energy losses

The heat fluxes at the inside surface of a south oriented exterior wall with and without greenery have been calculated for a period of one year. As given in Fig. 2 there are no remarkable differences at the beginning of the heating period in september/october. From december to february reduced heat fluxes caused by greenery can appear up to 20 %. During summer cooling effects of the greenery (shading) are to be noticed. Calculations of heating energy losses have been carried out for a 4 m x 4 m x 4 m ventilated model room without windows, with resp. without thermal insulation of the exterior walls and with greened resp. non-greened south facade. As shown in Tab. 1, there are reductions of mean heating energy losses caused by greenery of about 6 to 7 %, nearly independent on insulation level. In relation to possible energy savings by improved thermal insulation the effects of greenery are rather modest.

Messung / Rechnung
begrünt unbegrünt

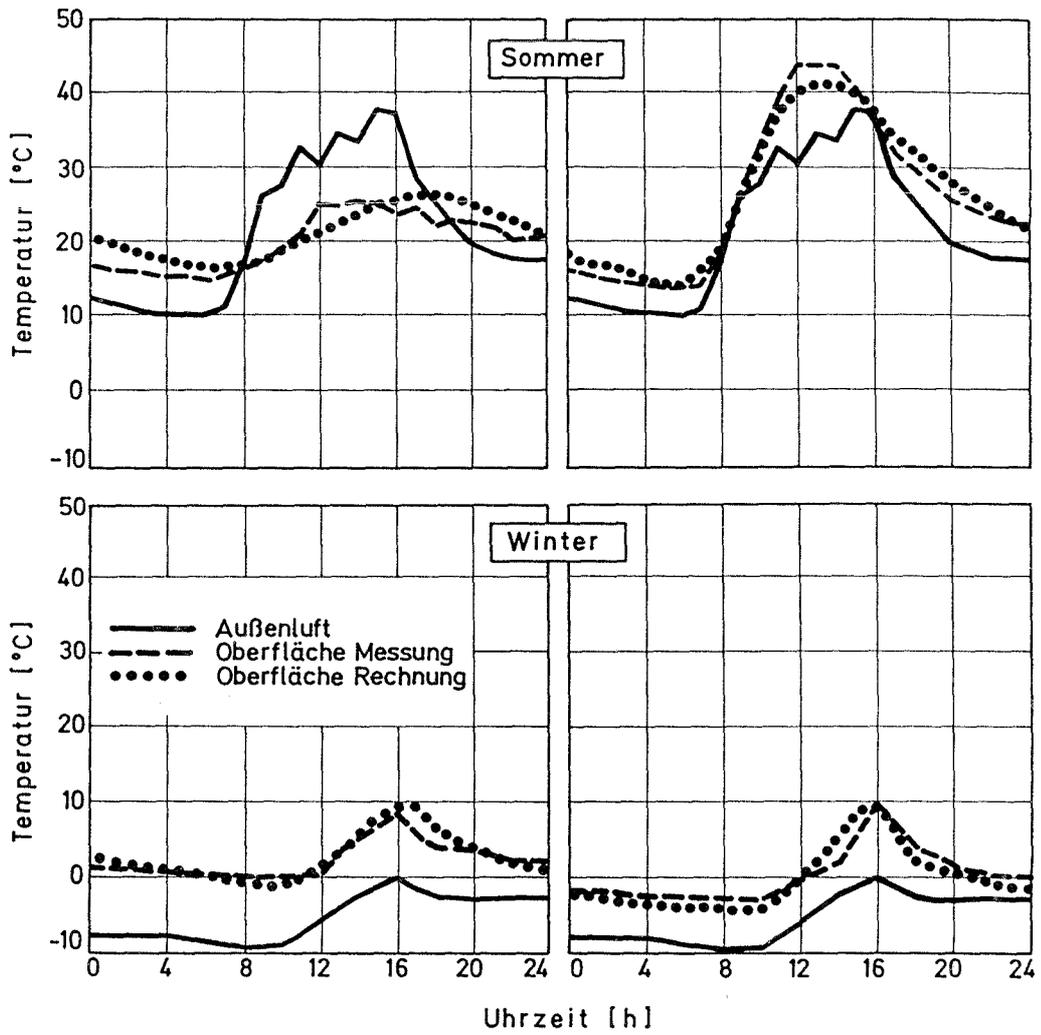


Fig. 1 Air temperatures and measured as well as calculated surface temperatures at greened and non-greened facades for the course of a clear summer day and a clear winter day.

Wärmeströme

Süd ; innen

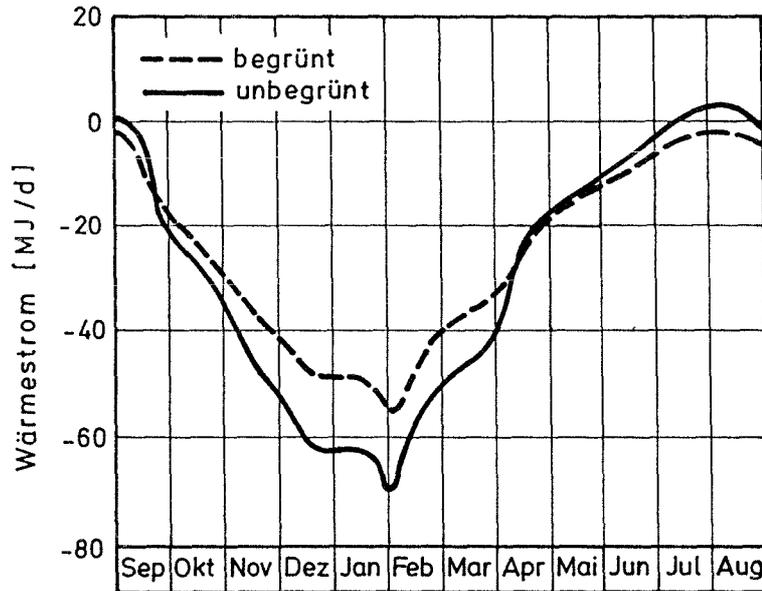


Fig. 2 Calculated year cycles of heat fluxes at the inside surface of a greened resp. non-greened south oriented facade (u-value non-greened $2.33 \text{ W/m}^2\text{K}$; wall area 16 m^2 ; evergreen; room temperature 20°C during day and 16°C during night; test-reference-year Stuttgart).

Tab. 1 Calculated heating energy losses for a model room with resp. without thermal insulation of the exterior walls and with greened resp. non-greened south façade (u-values for exterior wall insulated $0.78 \text{ W/m}^2\text{K}$, floor $0.64 \text{ W/m}^2\text{K}$; ventilation rate 0.6 h^{-1} ; greenery evergreen; boundary conditions see fig. 2).

Außen-wände	Heizwärmeverlust des Raumes		Wärmeverlust-minderung	
	Südfassade unbegrünt [kWh/a]	Südfassade begrünt [kWh/a]	[kWh/a]	[%]
gedämmt	4954	4588	366	7
ungedämmt	15245	14360	885	6

Moisture in construction elements

In addition to gravimetric determinations of moisture content in sections of a brick wall with and without greenery (Virginia creeper; summergreen) after a winter and a summer period. Calculations of the moisture behaviour have been done using the registered climatic data. The good agreement in results has made it possible to analyze moisture behaviour over longer periods. It can be shown that greenery has no negative moisture effects on walls. Because of the good rain protection of greeneries there is rather a moisture protection effect. Calculated courses of the mean water content in the rendering and in the masonry of a greened (evergreen resp. summergreen) and a non-greened brick wall during a winter/summer period including measured climatic conditions are shown in Fig. 3 demonstrating greenery influences.

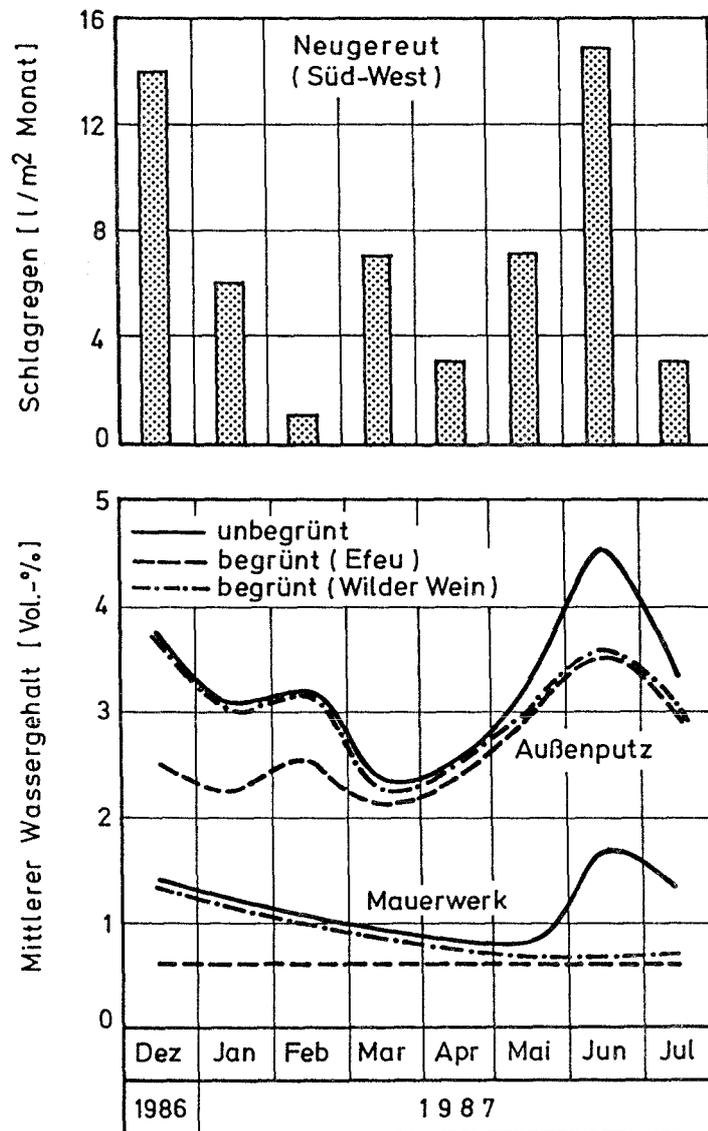


Fig. 3 Measured monthly mean values for driving rain (above) and courses of calculated mean water content (below) in rendering and masonry of a non-greened and a greened brick wall (Virginia creeper resp. ivy; location: Stuttgart-Neugereut).

Damage Risks

The often mentioned damage risks, such as penetration of roots into cracks or joints, breaking off renderings, corrosive effects of tendrils, have been pursued. None of these damages could be observed on the objects of investigation. Inquiries have shown that with proper care of the greenery and a regular underground damages can be avoided. Measurements of the forces for tearing off ivy and Virginia creeper have shown different dependences on the diameter of the branches. These forces are clearly smaller than those necessary for damaging the underground, as tensile strength and adhesion tests have shown. As to exterior insulation systems there is often suspected that the growth of climbing plants (tendrils; ivy) over several floors will cause tearing off damages because of the weight and wind forces. Although damages could neither be observed nor forced by tearing off branches at the one object with exterior insulation system and ivy-greening over one floor, these results cannot simply be transferred to higher buildings. Because of practical importance investigations on higher buildings are recommended.

Aggressive gas concentrations

Comparing measurements of CO₂ and SO₂ concentrations on adjacent surfaces with and without greenery as depicted in Fig. 4 show that

- the supposed concentration change of CO₂ in the greenery does not hold,
- the concentration of SO₂ in the greenery is clearly lower than in front of non-greened facades.

The importance of these results cannot yet be interpreted completely. Further investigations seem to be necessary concerning the consequences for the facade and for air pollution.

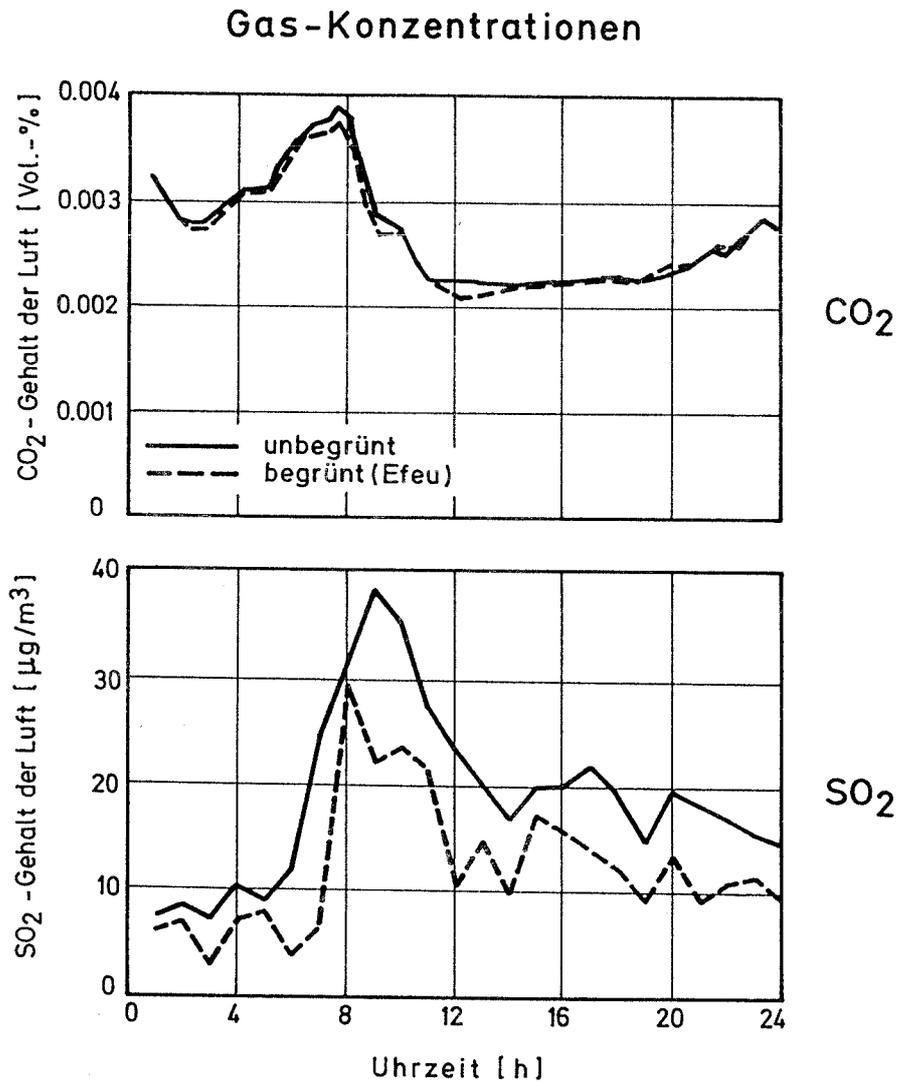


Fig. 4 Measured concentrations for CO₂ and SO₂ during one day in front of greened and non-greened facades (Stuttgart-Vaihingen, April 1987, ivy).