

METHODIK DER WIRTSCHAFTLICHEN OPTIMIERUNG
DES WÄRMEBILANZAUSGLEICHES VON RÄUMEN -
DARGESTELLT AN BEISPIELEN DER WÄRMEDÄMMUNG
UND WÄRMERÜCKGEWINNUNG IM LANDWIRTSCHAFT-
LICHEN BEREICH

Habilitationsschrift

zur Erlangung des Grades eines
habilitierten Doktors der Agrarwissenschaften (Dr.agr.habil.)

vorgelegt von

Dr.rer.nat Gerhard Englert

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Rechengrößen und Einheiten	6
1. Einleitung, Problemstellung	9
2. Stand der Forschung	11
3. Berechnungsgrundlagen	13
3.1 Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung	13
3.1.1 Definitionen der Wirtschaftlichkeit	13
3.1.2 Überprüfung der Wirtschaftlichkeit einzelner Investitionen	14
3.1.3 Bestimmung der wirtschaftlichsten Investition bei verschiedenen Investitionsmöglichkeiten	15
3.1.4 Rechenformeln	17
3.1.4.1 Kapitalwert, Jahreskosten	17
3.1.4.2 Kapitalwert bei konstant steigenden Jahreskosten	18
3.1.4.3 Gesamtinvestition bei wiederholten Investitionen im Betrachtungszeitraum	19
3.1.4.4 Gesamtinvestition bei verschiedenen Investitionsobjekten mit unterschiedlichen Nutzungsdauern	20
3.1.4.5 Jährliche Gesamtkosten zum Ausgleich der Wärmebilanzdefizite von Räumen	20
3.2 Formulierung und Lösung der Optimierungsgleichung	22
3.2.1 Methodik	22
3.2.2 Analyse der Möglichkeiten für den Ausgleich von Wärmebilanzdefiziten durch betriebliche und technische Maßnahmen	24
3.2.2.1 Bilanzgleichung für die Wärmeströme	24
3.2.2.2 Wärmeströme durch Wärmequellen im Raum (außer Heizung)	25
3.2.2.3 Lüftungswärmeströme	25
3.2.2.4 Transmissionswärmestrom	29
3.2.2.5 Zusammenfassung	31
3.2.3 Monetäre Bewertung der Wärmestrombilanz-Bestimmungsgrößen	32
3.2.3.1 Temperaturaustauschgrad als Bestimmungsgröße für die Rückgewinnung von Lüftungswärme	32
3.2.3.2 Wärmedurchlaßkoeffizient als Bestimmungsgröße von Wärmedämm-Maßnahmen	32

3.2.3.2.1	Investitionsbedarf für Wärmedämm-Maßnahmen in einem Bauelement	32
3.2.3.2.2	k-Wert-Kombination mit minimaler Gesamtinvestition bei Raumhüllen aus mehreren Bauelementen	33
3.2.3.2.3	Minimale Gesamtinvestition bei Wärmedämm-Maßnahmen in zwei Bauelementen	35
3.2.4	Berechnung der Jahreskosten für die Zusatzheizung über die Wärmebilanz des Raumes	37
3.2.4.1	Wärmeenergiebilanz belüfteter Räume	37
3.2.4.2	Wärmeenergiebilanz nicht belüfteter Räume	39
3.2.4.3	Jahreskosten für den Betriebsstoff der Heizung	40
3.2.5	Formulierung der Optimierungsgleichung	41
3.2.5.1	Belüftete Räume	41
3.2.5.2	Nicht belüftete Räume	42
3.2.6	Rechenverfahren zur Lösung der Optimierungsgleichung	43
3.2.6.1	Belüftete Räume	43
3.2.6.2	Nicht belüftete Räume	
3.3	Rechenwerte zur Erfassung des Einflusses der Außentemperatur und -feuchte	44
3.3.1	Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur, Außenfeuchte	44
3.3.2	Heizgradstunden	46
4.	Berechnungsbeispiele	47
4.1	Wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen	47
4.1.1	Problemstellung	47
4.1.2	Literaturübersicht	48
4.1.3	Rechenmodell für die wirtschaftliche Optimierung von Ställen	49
4.1.3.1	Optimierungsgleichung	49
4.1.3.2	Lüftungsmodelle zur Festlegung der Lüftungsvolumenströme	50
4.1.3.3	EDV-Rechenprogramme zur Ermittlung minimaler Jahreskosten und wirtschaftlich optimaler k-Werte	54
4.1.4	Untersuchung der Auswirkung verschiedener Einflußgrößen auf die minimalen jährlichen Gesamtkosten	57

4.1.4.1	Rechenwerte	57
4.1.4.2	Minimale Jahreskosten bei unterschiedlicher Belegung und für verschiedene Standorte	63
4.1.4.3	Auswirkung verschiedener Einflußgrößen	67
4.1.4.3.1	Ausgewählte Einflußgrößen, Rechenwerte	67
4.1.4.3.2	Veränderungen der Stalltemperatur und -feuchte	67
4.1.4.3.3	Veränderungen der Tierzahl sowie der tierspezifischen und finanziellen Kenngrößen	69
4.1.5	Zusammenfassung	76
4.2	Wirtschaftliche Investitionen in Wärmetauscher zur Rückgewinnung von Lüftungswärme in Ställen	77
4.2.1	Problemstellung, Literaturübersicht	77
4.2.2	Rechenverfahren zur Ermittlung wirtschaftlicher Investitionen in Lüftungs-Wärmetauscher	79
4.2.1.1	Bestimmungsgleichung für den Grenzwert wirtschaftlicher Investitionen	79
4.2.2.2	Berechnung der Stromkosten zum Ausgleich der Wärmetauscher-Druckverluste	80
4.2.2.3	EDV-Rechenprogramm WABILOP	82
4.2.3	Untersuchungen zum wirtschaftlichen Einsatz von Platten- und Röhrenwärmetauschern	83
4.2.3.1	Kennwerte der ausgewählten Wärmetauscher	83
4.2.3.2	Rechenwerte für den Modellstall, die Belegung und die finanziellen Kenngrößen	87
4.2.3.3	Wirtschaftlich optimaler Wärmebilanzausgleich bei unterschiedlicher Belegung und für verschiedene Standorte	88
4.2.3.4	Maximalwerte der wirtschaftlichen Investitionen bei Veränderungen der finanziellen Einflußgrößen	95
4.2.4	Zusammenfassung	102
4.3	Wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Biogasreaktoren	103
4.3.1	Problemstellung, Literaturübersicht	103
4.3.2	Rechenformeln für die Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung	104
4.3.3	Auswirkung verschiedener Einflußgrößen auf die Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung	105
4.3.3.1	Wärmeleitfähigkeit, volumenbezogener Dämmstoffpreis, Energiepreis, Heizgradstunden	105
4.3.3.2	Energiepreisteigerung, Nutzungsdauer	106

		Seite
4.3.4	Zusammenfassung	107
5.	Zusammenfassung	108
6.	Literaturverzeichnis	112

RECHENGRÖSSEN UND EINHEITEN

Die Auswahl der Kurzzeichen und Einheiten für die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Rechengrößen erfolgte in Anlehnung an DIN 18910 [38].

Die wichtigsten Rechengrößen sind mit ihren Kurzzeichen und Einheiten nachstehend tabellarisch zusammengestellt:

Kurzzeichen	Einheit	Rechengröße
α	$W/(m^2K)$	Wärmeübergangskoeffizient
γ	1/Jahr	Steigerungsfaktor der Jahreskosten (speziell: Energiepreisteigerungsfaktor)
η	-	Wirkungsgrad
λ	$W/(mK)$	Wärmeleitfähigkeit
φ	-	relative Feuchte der Luft
ϱ	kg/m^3	Dichte
ϑ	$^{\circ}C, \text{ grad}$	Temperatur
Φ_t	-	Temperaturaustauschgrad
a_N	1/Jahr	Annuitätenfaktor
a'_N	1/Jahr	modifizierter Annuitätenfaktor (bei steigenden Jahreskosten)
c_p	$Wh/(kg \text{ grad})$	spezifische Wärme bei konstantem Druck
h	Wh/m^3	spezifische Enthalpie
i	%/Jahr	Zinssatz, Zinsfuß
j	%/Jahr	jährliche Steigerung (speziell: Energiepreisteigerung)
k	$W/(m^2K)$	Wärmedurchgangskoeffizient, k-Wert
k_o	$W/(m^2K)$	Ausgangs-k-Wert
k_m	$W/(m^2K)$	mittlerer k-Wert
k_{Ti}	1/h	Kohlendioxid-Massenstrom (Kohlendioxidanfall) je Tier

Kurzzeichen	Einheit	Rechengröße
n	-	Zahl der Tiere
p	kPa	Gesamtdruck der feuchten Luft
$p_{D,S}$	kPa	Sättigungsdruck des Wasserdampfes
q	1/Jahr	Zinsfaktor
q_{Ti}	W	Wärmestrom (Wärmeanfall) je Tier
r_o	Wh/kg	Verdampfungsenthalpie
s	m	Dicke
t	h/Jahr	Zahl der Stunden pro Jahr
w_{Ti}	g/h	Wasserdampf-Massenstrom (Wasserdampfanfall) je Tier
x	g/m^3	Feuchte der Luft
A	m^2	Fläche
D_N	Jahr	Diskontierungs-, Kapitalisierungsfaktor
E	Wh	Wärmeenergie
E_E	kWh	elektrische Energie
G_h	h/Jahr	Heizgradstunden
G_t	Tage/Jahr	Heizgradtage
H_U	MJ/Einheit	Heizwert der Brennstoffeinheit
K	DM	Kapital
K_O	DM	Kapitalwert
K_I	DM	Investition, Investitionskapital, Investitionsaufwand
K'_B	DM/Einheit	Preis einer Brennstoffeinheit
K'_E	DM/Wh	Energiepreis (Wärmeenergie)
$K'_{E,E}$	DM/kWh	Energiepreis (elektr. Energie)
K^*	DM/m^2	flächenbezogener Preis

Kurzzeichen	Einheit	Rechengröße
K^{**}	DM/m^3	volumenbezogener Preis
$\dot{K}$	DM/Jahr	Jahreskosten
$\dot{K}_I$	DM/Jahr	jährliche Investitionskosten
$\dot{K}_B$	DM/Jahr	jährliche Betriebskosten
$\dot{K}_W$	DM/Jahr	jährliche Instandhaltungskosten
$\dot{K}_{BS}$	DM/Jahr	jährliche Kosten für Betriebsstoffe
$\dot{L}_E$	kW	elektrische Leistung
N	Jahre	Nutzungsdauer
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$\dot{Q}_i$	W	Wärmestrom der Wärmequellen im Raum
$\dot{Q}_L$	W	Lüftungswärmestrom
$\dot{Q}_T$	W	Transmissionswärmestrom
$\dot{V}_L$	m^3/h	Volumenstrom der Lüftung

1. EINLEITUNG, PROBLEMSTELLUNG

Die steigenden Energiepreise und die jetzt in das Blickfeld der Öffentlichkeit gerückte Gewißheit, daß der heute wichtigste Energieträger Erdöl nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen wird, haben in den letzten Jahren auch in der Landwirtschaft zu einem neuen Energiebewußtsein geführt. Das zeigt sich darin, daß alternative Energiequellen, wie die Gewinnung von Wärmeenergie in Sonnenkollektoren oder die Biogaserzeugung, und die Möglichkeiten zum Einsparen von Wärmeenergie zunehmende Aufmerksamkeit fanden. War es noch vor einem Jahrzehnt in vielen Fällen keine Frage, daß man Wärmeenergiedefizite von Räumen mit einer Heizung ausgleicht, so werden heute alle technischen und betrieblichen Maßnahmen, die zu einer Heizkosteneinsparung führen, verstärkt beachtet, besonders natürlich bei der Planung von baulichen Einrichtungen mit hohem Heizenergiebedarf. Im Bereich der Landwirtschaft gehören dazu Ställe, in denen ein hoher Anteil der von den Tieren erzeugten Wärme über die Lüftung verlorenggeht (z.B. Mastkälberställe) oder Ställe und andere Räume (z.B. Biogasreaktoren), die auf höherer Temperatur gehalten werden müssen.

Es ist sicherlich verständlich, daß bei dieser Entwicklung einer neuen Einstellung zur Energie die technischen Aspekte zunächst im Vordergrund standen. Die konstruktiven Probleme der für die Heizenergieeinsparung sich anbietenden technischen Maßnahmen Wärmedämmung und Wärmerückgewinnung sind heute weitgehend gelöst. Notwendig war und ist es allerdings, die besonderen Umwelt- und Betriebsbedingungen landwirtschaftlich genutzter Räume zu berücksichtigen, also z.B. mögliche Auswirkungen der hohen Feuchte und von Schadgasen der Stallluft auf Wärmedämmstoffe oder die von Verschmutzungen auf Wärmetauscher. Diese besonderen Probleme führten auch zu speziellen Neuentwicklungen für landwirtschaftliche Einsatzgebiete, für die z.Zt. noch nicht alle technischen Kenndaten vorliegen.

Wollte man nun allein aufgrund der Kenntnis dieser technischen Kennwerte festlegen, ob und wie die zur Verfügung stehenden Wärmedämmkonstruktionen und Anlagen zur Wärmerückgewinnung sinnvoll eingesetzt werden können, wäre man in Gefahr, eine Fehlentschei-

dung zu treffen. Es ließe sich nämlich zwar errechnen, wie weit z.B. die Wärmedämmung verbessert werden muß, um die Wärme(energie)-bilanz eines Raumes ausgeglichen zu halten, es wäre aber nicht zu übersehen, ob nicht die jährlichen Kosten für die dazu notwendige Investition größer sind als es die Heizkosten bei der Ausgangs-Wärmedämmung waren. Der Entscheidung über den sinnvollen Einsatz der sich anbietenden Maßnahmen zur Energieeinsparung muß also, wie bei allen anderen mit Investitionen und Betriebskosten verbundenen Lösungen technischer Probleme, auch eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung vorausgehen. Dazu ist es notwendig, den technischen Kenngrößen der verschiedenen Einrichtungen zur Einsparung von Heizenergie die entsprechenden finanziellen Kennwerte (Investitionen und Betriebskosten) zuzuordnen und nach einem Rechenverfahren zu suchen, mit dem die wirtschaftlich optimale Lösung für den Ausgleich der Wärmeenergiedefizite von Räumen gefunden werden kann.

Die bisherigen Veröffentlichungen zu den verschiedenen Möglichkeiten, Heizenergie bei landwirtschaftlich genutzten Räumen einzusparen, beinhalten, wenn überhaupt, nur Kostenanalysen des untersuchten Einzelfalles, deren Ergebnisse sich bestenfalls bedingt verallgemeinern lassen. Erforderlich wäre aber ein Verfahren der Wirtschaftlichkeitsprüfung, das sich bei allen in der Praxis auftretenden Gegebenheiten anwenden läßt und bei dem man, im allgemeinsten Fall, alle vorhandenen Einrichtungen zur Einsparung von Heizenergie in deren verschiedenen technischen Ausführungen in die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung einbeziehen kann. Das bedeutet aber u.a., daß das dieser Aufgabenstellung entsprechende Rechenverfahren alle Einflußgrößen in expliziter Form enthalten muß, damit sich die jeweiligen Kennwerte des untersuchten Einzelfalles berücksichtigen lassen. Die Wirtschaftlichkeitsprüfung soll dann Planungs-Kennwerte für die Einrichtungen zur Energieeinsparung angeben, die einen wirtschaftlich optimalen Ausgleich der Wärmebilanzdefizite über einen längeren Nutzungs-Zeitraum des betrachteten Raumes sicherstellen. Dazu müssen den Berechnungen Langzeit-Mittelwerte für die einzelnen Einflußgrößen zugrunde gelegt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, zunächst die methodischen Grundlagen für die wirtschaftliche Optimierung des Ausgleiches der Wärmebilanzdefizite von Räumen zu erarbeiten. Die Anwendung der zur Lösung dieser Aufgabe entwickelten Rechenverfahren auf die Wärmedämmung und Wärmerückgewinnung im landwirtschaftlichen Bereich bietet dann die Möglichkeit, diese Rechenverfahren zu veranschaulichen, vor allem aber zu untersuchen, wie sich die verschiedenen Einflußgrößen auf die Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Bilanzausgleiches auswirken. Diese Analyse erlaubt es, die Haupt-Einflußgrößen zu ermitteln, an deren Langzeit-Mittelwerte in Bezug auf die Praxisrelevanz besonders hohe Anforderungen zu stellen sein werden.

2. STAND DER FORSCHUNG

Eine systematische Sichtung und Wertung der Rechenmethoden für die Wirtschaftlichkeitsprüfung von Maßnahmen zur Einsparung von Wärmeenergie im Wohnungs- und Industriebau geben WERNER und GERTIS [34]. Als Wirtschaftlichkeits-Kenngrößen werden die Amortisationszeit und der interne Zinssatz behandelt. Die Amortisationszeit gibt die Zeitspanne an, in der ein Investitionsbetrag durch die von ihm bewirkten Einsparungen wieder zurückgeflossen ist. Der interne Zinssatz mißt die effektive Verzinsung einer Investition (siehe Abschnitt 3.1). Vorgestellt und miteinander verglichen werden: die einfache Tilgung als statisches Kalkül (Zinsen finden dabei keine Berücksichtigung) und als dynamische Rechenverfahren die Zins-Abschreibung, die Kapitalwert-Methode, die Annuitätenrechnung und die Methode des internen Zinssatzes. In den angegebenen Rechenformeln wird eine Energiepreissteigerung berücksichtigt.

WERNER [33] vergleicht als Methoden zur wirtschaftlichen Optimierung von Wärmedämm-Maßnahmen die Minimierung der jährlichen Gesamtkosten, die Bestimmung der maximalen Rentabilität des investierten Kapitals sowie die Untersuchung, ob nicht der Energieverbrauch für die Herstellung des Dämmmaterials die Verringerung des Heizenergieverbrauches aufwiegt. Es wird gezeigt, daß diese

energetische Optimierung für eine sinnvolle Wärmedämmung nicht in Frage kommt.

Die gleichen Optimierungsmethoden werden auch von ROUVEL [24] diskutiert, der darauf hinweist, daß bei der Methode der Gesamtkosten-Minimierung der Energiepreis und der Zinssatz die wirtschaftlich optimale Wärmedämmung sehr stark beeinflussen und daher die Auswahl einer geeigneten Dämmschichtdicke problematisch machen, weil die zeitliche Entwicklung dieser Parameter langfristig nicht vorhergesagt werden kann. ROUVEL favorisiert daher die Methode der maximalen Rentabilität, weil hier die optimale Dämmschichtdicke von der Höhe und zeitlichen Entwicklung des Energiepreises und Zinssatzes nicht beeinflußt wird (zumindest bei den im Wohnungsbau gemachten Rechenannahmen).

EGGENBERGER [6] unterscheidet zwei Arten der Wirtschaftlichkeitsprüfung: die Kosten-Nutzen-Analyse und die wirtschaftliche Optimierung. Für die Kosten-Nutzen-Analyse werden zwei Wirtschaftlichkeitskriterien angegeben:

1. Eine Maßnahme ist wirtschaftlich, wenn innerhalb der Nutzungsdauer die summierten Einsparungen (der Nutzen) gleich oder größer als der Kapitalbetrag der Investition (mit Zins und Zinseszinsen) sind. Dieses Kriterium eignet sich besonders für die Wirtschaftlichkeitsprüfung bei Eigenfinanzierung.
2. Eine Maßnahme ist wirtschaftlich, wenn die jährlichen Einsparungen gleich oder größer als die jährlichen Rückzahlungsraten sind. Dieses Kriterium kommt vor allem bei Fremdfinanzierung in Betracht.

Bei der Optimierungsrechnung gelten analoge Kriterien:

1. Die Gesamtaufwendungen innerhalb eines bestimmten Zeitraumes sollten minimal sein.
2. Die jährlichen Gesamtaufwendungen sollten minimal sein.

Zu beachten ist der Hinweis von EGGENBERGER, daß die üblichen Optimierungsrechnungen eigentlich nur eine Teiloptimierung bein-

halten, da spezielle Bauteile, nicht aber die Gesamtkonstruktion optimiert werden.

KÜSGEN [19] weist darauf hin, daß die Kosten-Nutzen-Analyse ("Cost-benefit"-Methode) Entscheidungshilfen geben kann, wenn zwischen alternativen Projekten, Zwecken oder Zielen entschieden werden soll. Die den Optimierungsrechnungen zugrunde liegende Gesamtkosten-Methode ("Cost in use"-Methode) sei dagegen die geeignete Entscheidungshilfe bei zwei oder mehreren alternativen Lösungen für den gleichen Zweck.

Mit derselben Fragestellung befassen sich auch die Arbeiten weiterer Autoren, wie z.B. von DÄUMLER [5], HENNESSY [12], KLINKENBERG [16].

Alle genannten Autoren behandeln Wärmedämmprobleme im Wohnungs- und Industriebau und berücksichtigen die Wärmeverluste über die Bauelemente, nicht aber die über die Lüftung. Ställe sind aber intensiv durchlüftete Räume, auf die sich die bisher erarbeiteten Rechenverfahren nicht anwenden lassen.

3. BERECHNUNGSGRUNDLAGEN

3.1 Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung

3.1.1 Definitionen der Wirtschaftlichkeit

Die sich aus den vorgestellten Arbeiten abzeichnende Uneinheitlichkeit in den für die Wirtschaftlichkeitsprüfung verwendeten Bestimmungsgrößen und Bewertungsmaßstäben ist eine Folge der verschiedenen Möglichkeiten, Wirtschaftlichkeit zu definieren und zu messen. Es erscheint daher angebracht, die Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung kurz zusammenzufassen, um ein für die landwirtschaftliche Baupraxis passendes Rechenverfahren zu erhalten. Es wird dabei auf einschlägige Bücher von KÖHNE [17], SCHNEIDER [26] und STEINHAUSER, LANGBEHN, PETERS [29] Bezug genommen.

Sinnvolle Investitionen folgen dem ökonomischen Prinzip, für das es zwei Versionen gibt (siehe [26]): Wer wirtschaftlich handeln will, strebt entweder danach, eine bestimmte Leistung mit mög-

lichst geringen Kosten zu erstellen oder mit einem gegebenen Kostenaufwand möglichst große Leistungen zu erbringen. Damit lassen sich die, von z.B. WERNER [33] dargestellten Methoden der Wirtschaftlichkeitsprüfung, die Minimierung der Gesamtkosten (möglichst geringe Kosten) und die Kosten-Nutzen-Analyse (möglichst große Leistungen), auf ein Grundprinzip zurückführen.

3.1.2 Überprüfung der Wirtschaftlichkeit einzelner Investitionen

Wie von SCHNEIDER [26] gezeigt wird, gibt es insgesamt drei Methoden, die Vorteilhaftigkeit einer einzelnen Investition bei einem gegebenen Kalkulationszinssatz zu überprüfen, wobei der Kalkulationszinssatz nicht notwendigerweise mit dem langfristigen Zinssatz des Kapitalmarktes identisch sein muß, sondern vielmehr eine bestimmte, vom Investor als angemessen angesehene Verzinsung der Investition beschreibt:

1. Die Diskontierungsmethode, bei der alle nach dem Zeitpunkt der Investition erfolgten Ein- und Auszahlungen auf den Zeitpunkt unmittelbar vor Beginn der Investition abgezinst (diskontiert) werden. Eine Investition ist bei einem gegebenen Kalkulationszinssatz dann vorteilhaft, wenn ihr Kapitalwert nicht negativ ist.
2. Die interne Zinssatzmethode, bei der man den internen Zinssatz der Investition errechnet und mit dem Kalkulationszinssatz vergleicht. Unter dem internen Zinssatz wird dabei der Zinssatz verstanden, bei dem der auf irgendeinen Zeitpunkt bezogene Kapitalwert aller Ein- und Auszahlungen gleich Null ist. Eine Investition ist vorteilhaft, wenn der Kalkulationszinssatz den internen Zinssatz nicht übersteigt.
3. Die Annuitätsmethode, bei der die durchschnittlichen jährlichen Ausgaben der Investition mit ihren durchschnittlichen jährlichen Einnahmen verglichen werden. Bei einer vorteilhaften Investition dürfen die Einnahmen nicht kleiner als die Ausgaben sein.

SCHNEIDER weist darauf hin, daß diese Methoden identisch sind und sich auf ein allgemeines Fundamentalprinzip zurückführen lassen¹:

¹[26], S. 24

"Eine geplante Investition ist bei einem gegebenen Kalkulationszinsfuß¹ für den Investor vorteilhaft, wenn ihr auf den Zeitpunkt unmittelbar vor Beginn der Investition bezogener Kapitalwert nicht negativ ist."

Die Annuitätsmethode entspricht nach SCHNEIDER dem Denken in der Praxis am besten, sie kann jedoch ohne größere rechnerische Schwierigkeiten nur in einzelnen Spezialfällen angewandt werden. Dazu gehört der Fall einer Investition mit einer Ausgabe im Zeitpunkt Null, n gleich großen Ausgaben in den Zeitpunkten $1, 2, \dots, n$ und n gleich großen Einnahmen in den Zeitpunkten $1, 2, \dots, n$. Diesem Investitionstyp lassen sich auch die Investitionen zum Ausgleich der Wärmebilanz von Räumen zuordnen, wenn man die durch die Investitionen bewirkten Einsparungen an Heizkosten als Einnahmen interpretiert. Die n gleich großen Ausgaben in den Zeitpunkten $1, 2, \dots, n$ sind dann die mit den Investitionen verbundenen Kosten für Instandhaltung und Betriebsstoffe (z.B. für die erhöhten Ventilator-Stromkosten beim Einsatz von Wärmetauschern).

Auch KÖHNE [17] schlägt vor, bei der Wirtschaftlichkeitsprüfung von baulichen Einrichtungen die Annuitätsmethode zu verwenden, in ihrer exakten Form. Die vielfach in der Praxis angewandte approximative Annuitätsmethode, bei der die Aufspaltung der Kapitalkosten in je einen Betrag für Abschreibung und Verzinsung Zinseszinsrechnungen vermeidet, führt zwar zu Resultaten, die bei Einhaltung bestimmter Voraussetzungen nur wenig von den exakt berechneten Werten abweichen, sie ist aber gerade bei baulichen Investitionen problematisch.

3.1.3 Bestimmung der wirtschaftlichsten Investition bei mehreren Investitionsmöglichkeiten

Da bei den Investitionen zum Ausgleich der Wärmebilanz von Räumen eine Auswahl zwischen mehreren Investitionsobjekten (z.B. Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme) und bei einem Teil dieser Objekte zudem noch zwischen den für die Investition wesentlichen Bestimmungsgrößen (z.B. k -Wert) möglich ist, kann der Investor zwischen einer Vielzahl von Investitionen wählen. Ein von SCHNEIDER² formuliertes Fundamentalkriterium zeigt den Weg, auf welche Weise aus den möglichen Investitionen die vorteilhafteste,

¹Zinssatz ²[26], S. 44

also wirtschaftlich optimale, gefunden werden kann:

"Von mehreren vorteilhaften Investitionen ist bei einem gegebenen Kalkulationszinsfuß diejenige Investition am vorteilhaftesten, deren Kapitalwert am größten ist."

Nach diesem Fundamentalkriterium läßt sich die wirtschaftlich optimale Lösung für den Ausgleich der Wärmebilanz von Räumen finden, indem man für die Kenngrößen der im Einzelfall in Betracht zu ziehenden, mit Investitionen und Kosten verbundenen technischen und betrieblichen Maßnahmen diejenige Wertekombination ermittelt, für die der Kapitalwert am größten ist. Will man die Wirtschaftlichkeitsrechnung auf die Annuitätsmethode abstützen, so kennzeichnet entsprechend die maximale Differenz zwischen den durchschnittlichen jährlichen Einnahmen und Ausgaben die wirtschaftlich optimale Lösung.

Eine noch bessere Anpassung an die Investitionsmotive in der Praxis, vor allem auch in der landwirtschaftlichen Praxis, ermöglicht eine Abwandlung dieser Annuitätsmethode, insbesondere für den Fall von Investitionen zur Energieeinsparung und zur Erschließung neuer Energiequellen. Investitionen in diesen Bereichen werden nämlich in den meisten Fällen nicht getätigt - schon gar nicht von Landwirten -, um einen möglichst großen Gewinn zu erzielen, sondern vielmehr um angesichts der ständig steigenden Energiekosten die zur Lösung der Energieprobleme aufzubringenden jährlichen Gesamtkosten möglichst niedrig zu halten. Dieser Investitionsgrund läßt sich in der Wirtschaftlichkeitsrechnung darstellen, indem man bei dem Problem des Ausgleiches der Wärmebilanz von Räumen die Heizkosten in die Rechnung einbezieht. Die durch die Investitionen bewirkten Einsparungen an Heizkosten werden dann nicht mehr als Einnahmen interpretiert, sondern in den dann entsprechend geringeren, nach den Investitionen verbleibenden Heizkosten verrechnet. Damit erhält die Wirtschaftlichkeitsrechnung aber nur noch Ausgaben, und zwar in Form von

- Investitionskosten (Kapitalkosten),
- mit den Investitionen verbundene Betriebskosten (für Instandhaltung und Betriebsstoffe) und
- Heizkosten.

Das Fundamentalprinzip läßt sich für diesen Fall dahingehend interpretieren, daß die wirtschaftlich optimale Lösung durch minimale jährliche Gesamtkosten gekennzeichnet ist.

Die Aufgabe, den Wärmebilanzausgleich von Räumen wirtschaftlich zu optimieren, ist also zu lösen, indem die in die Wärmebilanz eingehenden Kenngrößen der technischen und betrieblichen Investitions-Maßnahmen zum Ausgleich der Wärmebilanz verändert werden, um den Minimalwert der damit ebenfalls veränderten jährlichen Gesamtkosten zu ermitteln. Die diesem Minimalwert zugeordneten Kennwerte der technischen und betrieblichen Maßnahmen sind dann die Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Lösung des Wärmebilanzausgleiches.

3.1.4 Rechenformeln

3.1.4.1 Kapitalwert, Jahreskosten

Die für die Wirtschaftlichkeitsrechnung benötigten Rechenformeln leiten sich von folgender Verknüpfung des Gegenwartswertes $K_{O,n}$ eines Kapitals mit seinem Zeitwert K_n nach n Jahren (am Ende des n -ten Jahres, nachschüssige Betrachtung), bei einem Zinssatz i , ab (siehe z.B. [18]):

$$K_{O,n} = q^{-n} K_n = v^n K_n \quad (1)$$

mit

$q = 1 + i$	Zinsfaktor
q^n	Aufzinsungsfaktor
v^n	Abzinsungsfaktor, Diskontierungsfaktor

Interpretiert man K_n als am Ende des n -ten Jahres zu zahlende Jahreskosten, dann entspricht $K_{O,n}$ deren Kapitalwert zum Zeitpunkt unmittelbar vor dem Betrachtungszeitraum.

Sind die Jahreskosten $\dot{K}$ und der Zinssatz i in einem bestimmten Betrachtungszeitraum von N Jahren konstant, errechnet sich der Kapitalwert dieser Kosten (er entspricht dem Barwert bei der Rentenrechnung) zu:

$$\begin{aligned} K_O &= (q^{-1} + q^{-2} + \dots + q^{-N}) \dot{K} \\ &= \frac{1}{q^N} (q^{N-1} + q^{N-2} + \dots + 1) \dot{K} \end{aligned} \quad (2)$$

Die Partialsumme der geometrischen Reihe in der Klammer beträgt:

$$\sum_{n=1}^N q^{n-1} = \frac{q^N - 1}{q - 1} \quad (3)$$

Damit folgt für Gl. (2):

$$K_O = \frac{q^N - 1}{q^N (q - 1)} \quad \dot{K} = D_N \dot{K} \quad (4)$$

mit

D_N Diskontierungs- (Kapitalisierungs) faktor

Der Kehrwert von D_N ist der sogenannte Annuitätenfaktor a_N :

$$a_N = \frac{q^N (q - 1)}{q^N - 1} \quad (5)$$

Er ermöglicht die Errechnung der im Zeitraum von N Jahren jährlich anfallenden Kosten $\dot{K}_I$ einer Investition K_I :

$$\dot{K}_I = a_N K_I \quad (6)$$

3.1.4.2 Kapitalwert bei konstant steigenden Jahreskosten

Werden die Jahreskosten jeweils zu Beginn eines jeden Jahres (d.h. vorschüssig) um einen im Nutzungszeitraum konstanten Faktor j größer, gilt (siehe z.B. [16]) statt Gl. (1):

$$K_{0,n} = \gamma^{n-1} q^{-n} K_n \quad (7)$$

mit

$$\gamma = 1 + j \quad \text{Steigerungsfaktor}$$

Für Gl. (3) folgt

$$K_0 = \frac{(q/\gamma)^{N-1}}{\gamma(q/\gamma)^N [(q/\gamma) - 1]} \cdot \dot{K} \quad (8)$$

und für den "modifizierten Annuitätenfaktor":

$$a'_N = \frac{\gamma(q/\gamma)^N [(q/\gamma) - 1]}{(q/\gamma)^{N-1}} \quad \text{für } i \neq j \quad (9)$$

$$a'_N = \frac{q}{N} \quad \text{für } i = j$$

Mit den Gl. (9) läßt sich z.B. der Kapitalwert für den Fall er-
rechnen, daß in den Energiekosten eine konstante jährliche Stei-
gerung des Energiepreises zu berücksichtigen ist.

3.1.4.3 Gesamtinvestition bei wiederholten Investitionen im Betrachtungszeitraum

Müssen Investitionsobjekte der Nutzungsdauer n im Betrachtungszeit-
raum von N Jahren m -fach erneuert werden ($m \cdot n < N$), lassen sich
das Gesamtkapital $K_{I,ges}$ für die Investition K_I und die auf den
Betrachtungszeitraum bezogenen Jahreskosten $K_{I,ges}$ mit den Gl. (1)
und (6) folgendermaßen berechnen:

$$K_{I,ges} = K_I \sum_{l=0}^m q^{-ln}$$

$$\dot{K}_{I,ges} = a_N K_{I,ges} = a_N K_I \sum_{l=0}^m q^{-ln} \quad (10)$$

3.1.4.4 Gesamtinvestition bei verschiedenen Investitionsobjekten mit unterschiedlicher Nutzungsdauer

Werden k Investitionsobjekte mit den Investitionen $K_{I,1}, K_{I,2}, \dots, K_{I,k}$ und den Nutzungsdauern $n_1, n_2, \dots, n_k$ in die Untersuchung einbezogen, ergibt sich für den Betrachtungszeitraum von N Jahren und bei m_1 -, m_2 -, ... m_k -facher Erneuerung (d.h. Neuinvestition) für das Gesamtkapital $K_{I,ges}$ und für die auf den Zeitraum der N Jahre bezogenen Jahreskosten $\dot{K}_{I,ges}$:

$$K_{I,ges} = \sum_{i=1}^k K_{I,i} \left(\sum_{l=0}^{m_i} q^{-l \cdot n_i} \right) \quad (11)$$

$$\dot{K}_{I,ges} = a_N K_{I,ges}$$

Bei z.B. zwei Investitionsobjekten der Nutzungsdauern

$$n_1 = 20 \text{ (Jahre)}$$

$$n_2 = 10 \text{ (Jahre)}$$

folgt für einen Betrachtungszeitraum von $N = 20$ Jahre

$$m_1 = 0$$

$$m_2 = 1$$

und mit Gl. (11)

$$K_{I,ges} = K_{I,1} + (1 + q^{-10}) K_{I,2}$$

3.1.4.5 Jährliche Gesamtkosten zum Ausgleich der Wärmebilanzdefizite von Räumen

Werden Investitionen getätigt, um beim Ausgleich der Wärmebilanzdefizite von Räumen Heizkosten zu sparen, setzen sich die jährlichen Gesamtkosten nach Abschnitt 3.1.3 zusammen aus

- Investitionskosten (Kapitalkosten) $\dot{K}_{I,i}$
- mit den Investitionen verbundene Betriebskosten (für Instandhaltung und Betriebsstoffe) $\dot{K}_{B,i}$
- nach den Investitionen verbleibende Heizkosten $\dot{K}_{BS,H}$

Für den bei den folgenden Berechnungen i.a. zugrunde gelegten Fall, daß

- alle Investitionsobjekte im Betrachtungszeitraum von N Jahren nicht erneuert werden müssen,
- die jährlichen Betriebskosten konstant bleiben (siehe aber Abschnitt 4.2) und
- in den Heizkosten eine jährliche Steigerung des Energiepreises um j % zu berücksichtigen ist,

ergibt sich für den Gesamt-Kapitalwert zum Ausgleich der Wärmebilanzdefizite mit den Gl. (4), (8) und (9)

$$K_{O,ges} = \sum_{i=1}^k K_{I,i} + \frac{1}{a_N} \sum_{i=1}^k \dot{K}_{B,i} + \frac{1}{a_N} \dot{K}_{BS,H} \quad (12)$$

Für die jährlichen Gesamtkosten folgt:

$$\dot{K}_{ges} = a_N K_{O,ges} = a_N \sum_{i=1}^k K_{I,i} + \sum_{i=1}^k K_{B,i} + \frac{a_N}{a_N} \dot{K}_{BS,H} \quad (13)$$

Müssen die Investitionsobjekte im Betrachtungszeitraum erneuert werden, sind die Gl. (10) bzw. (11) in der Gl. (12) zu berücksichtigen. Dabei wird vorausgesetzt, daß der Zeitwert der Investitionsobjekte am Ende des Betrachtungszeitraums Null ist. Von Null verschiedene Zeitwerte $K_{N,i}$ müßten durch Subtraktion von $K_{N,i}/a_N$ in den Gl. (12) und (13) berücksichtigt werden.

3.2 Formulierung und Lösung der Optimierungsgleichung

3.2.1 Methodik

Die Aufgabe, den Wärmebilanzausgleich von Räumen wirtschaftlich zu optimieren, besteht nach Abschnitt 3.1.3 darin, die in Betracht zu ziehenden betrieblichen und technischen Maßnahmen, die zum Ausgleich der Wärmebilanz beitragen können und die mit Kosten verbunden sind, so zu dimensionieren, daß die jährlichen Gesamtkosten für den Bilanzausgleich minimal werden. Wie schon dargestellt, sollen sich die weiteren Betrachtungen auf den Fall beschränken, daß Defizite in der Wärmebilanz auszugleichen sind. Dies bedeutet, daß die Wärmebilanz für Räume zu erstellen ist, in denen eine höhere Temperatur konstant gehalten werden muß oder die im Winter betrieben werden. Die dargestellten Methoden lassen sich aber auch zwanglos auf den Fall des Wärmebilanzausgleiches von Räumen übertragen, bei denen Bilanzüberschüsse durch Kühlung abzutragen sind. Die Optimierungsaufgabe kann in folgende Teilschnitte gegliedert werden:

1. Ermittlung und Festlegung von Maßnahmen zum Ausgleich von Wärmebilanzdefiziten

Um den Wärmebilanzausgleich für ein bestimmtes System, wie hier für einen Raum, wirtschaftlich optimieren zu können, ist zunächst einmal festzustellen, welche betriebliche und technische Maßnahmen für den Bilanzausgleich überhaupt zur Verfügung stehen und welche mit Kosten verbunden sind. Diese Aufgabe erfordert die analytische Darstellung und Bilanzierung der Wärmeströme, die zwischen dem System und der Umwelt ausgetauscht werden. Es zeigt sich daraus, welche Bestimmungsgrößen der so erhaltenen Wärmestrombilanz sich durch bestimmte Maßnahmen verändern lassen, also die Auswirkung dieser Maßnahmen auf die Wärmestrombilanz beschreiben. Es ist damit auch bekannt, ob zur Veränderung dieser Bestimmungsgrößen Kosten entstehen. Für den Einzelfall muß dann noch festgelegt werden, welche der sich anbietenden Maßnahmen in die Optimierungsrechnung einzubeziehen sind.

2. Monetäre Bewertung der Wärmestrombilanz-Bestimmungsgrößen

Da der Optimierungsansatz die Jahreskosten für den Investitionsbedarf und für den Betrieb der einzelnen Maßnahmen sowie für die Zusatzheizung zusammenfaßt, ist zu erarbeiten, welchen Investitionsbedarf und welche Betriebskosten die Veränderungen der einzelnen Bestimmungsgrößen der Wärmestrombilanz erfordern.

3. Berechnung der Jahreskosten für die Zusatzheizung über die Wärmeenergiebilanz

Um berechnen zu können, welches Defizit die Wärmebilanz noch aufweist, wenn die einzelnen Bilanzierungs-Maßnahmen in bestimmter Dimensionierung durchgeführt sind, muß eine Wärmeenergiebilanz erstellt werden. Dazu sind die einzelnen Wärmeströme mit der Zeit zu multiplizieren und die so berechneten Wärmemengen zu bilanzieren. Die so erhaltene Wärmeenergiebilanzdifferenz ist eine Funktion der Bestimmungsgrößen, da sie von der Dimensionierung der Bilanzierungs-Maßnahmen abhängt. Die Jahreskosten für die Zusatzheizung ergeben sich dann durch Multiplikation der Bilanzdifferenz mit dem Energiepreis.

4. Formulierung und Lösung der Optimierungsgleichung

Die Zusammenfassung der einzelnen Kosten für den Bilanzausgleich zu jährlichen Gesamtkosten entsprechend Abschnitt 3.1.4.5 ergibt die Optimierungsgleichung. Die Optimierungsbedingung ist durch die Nebenbedingung gegeben, daß die jährlichen Gesamtkosten zu minimieren sind.

Die Optimierungsgleichung beschreibt damit den Zusammenhang zwischen den jährlichen Gesamtkosten und den Bestimmungsgrößen der Wärmebilanz, die zuvor bestimmten, mit Kosten verbundenen betrieblichen und technischen Maßnahmen zugerechnet wurden. Die Lösung der Optimierungsaufgabe besteht darin, das Minimum der jährlichen Gesamtkosten und die entsprechenden Zahlenwerte für die einzelnen Bestimmungsgrößen zu ermitteln. Damit ist dann auch bekannt, wie die einzelnen betrieblichen und technischen Maßnahmen zu dimensionieren sind, um den Wärmebilanzausgleich in wirtschaftlich optimaler Weise zu erreichen.

Die Optimierungsgleichung läßt sich nur in Spezialfällen geschlossen lösen. Normalerweise ist ein iteratives Rechenverfahren zur Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Zahlenwerte für die Wärmebilanz-Bestimmungsgrößen erforderlich.

3.2.2 Analyse der Möglichkeiten für den Ausgleich von Wärmebilanzdefiziten durch betriebliche und technische Maßnahmen

3.2.2.1 Bilanzgleichung für die Wärmeströme

In Räumen, die mit dem Außenraum über eine Lüftung in Verbindung stehen, sind bei Außenraumtemperaturen unterhalb der Raumtemperatur folgende Wärmeströme in die Wärmestrombilanz einzubeziehen:

$\dot{Q}_i$	Wärmequellen im Raum (außer Heizung)
$\dot{Q}_{LZ}$	Zuluft
$\dot{Q}_{LA}$	Abluft
$\dot{Q}_T$	Wärmeleitung (Transmission) über die Raumhülle

Bezeichnet man die Differenz zwischen den zu- und abfließenden Wärmeströmen als Wärmestrombilanz-Differenz $\Delta \dot{Q}$, so gilt:

$$\Delta \dot{Q} = \dot{Q}_i + \dot{Q}_{LZ} - \dot{Q}_{LA} - \dot{Q}_T \quad (14)$$

Um Defizite in der Wärmestrombilanz ($\Delta \dot{Q} < 0$) auszugleichen, muß entweder dem Raum ein zusätzlicher Wärmestrom durch eine Heizung ($\dot{Q}_H$) zugeführt werden, wobei die Bedingung

$$-\Delta \dot{Q} = \dot{Q}_H \quad (15)$$

zu erfüllen ist, oder aber die zufließenden Wärmeströme $\dot{Q}_i$ bzw. $\dot{Q}_{LZ}$ sind zu erhöhen bzw. die abfließenden Ströme $\dot{Q}_{LA}$ bzw. $\dot{Q}_T$ entsprechend zu erniedrigen.

Welche betrieblichen und technischen Maßnahmen für diese Veränderung der Wärmeströme in Frage kommen, zeigt die analytische Darstellung der einzelnen Wärmeströme.

3.2.2.2 Wärmeströme durch Wärmequellen im Raum (außer Heizung)

Je nach Nutzung des Raumes sind, außer der Heizung, verschiedene andere Wärmequellen im Raum denkbar. Als Beispiele seien genannt:

bei Wohnräumen: Bewohner, elektrische Geräte, Leuchten

bei Ställen : Tiere, Leuchten, IR-Strahler

bei Reaktionsgefäßen (z.B. Biogasbehälter): chemische Reaktionen.

Es zeigt sich, daß alle möglichen Veränderungen des Wärmestromes, der von den Wärmequellen im Raum ausgeht, betrieblichen Maßnahmen zuzuordnen sind, die im allgemeinen für den Ausgleich von Wärmebilanzdefiziten nicht in Frage kommen. Bei Ställen ist zu überprüfen, ob nicht die Belegdichte ein, nur bedingt mit Zusatzkosten verbundener, Einflußfaktor ist.

3.2.2.3 Lüftungswärmeströme

Für die über die Lüftungsanlagen ab- und zufließenden Wärmeströme gelten folgende Beziehungen (siehe [38]).

$$\dot{Q}_{LZ} = \frac{\rho_i}{\rho_z} h_z \dot{V}_L \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{LA} = h_i \dot{V}_L \quad (17)$$

mit

$\rho_{i(z)}$ Dichte der Abluft (i) bzw. Zuluft (z)

$h_{i(z)}$ spezifische Enthalpie der Abluft (i) bzw. Zuluft (z)

$\dot{V}_L$ Volumenstrom der Lüftung (Luftrate)

Bei den Gl. (16) und (17) wurde für die weiteren Berechnungen zugrunde gelegt, daß der Abluft- und Zuluftvolumenstrom gleich groß sind. Dies gilt auch angenähert beim Einsatz von Wärmetauschern.

Die Dichte feuchter Luft hängt in folgender Weise von der Temperatur ϑ und der relativen Feuchte φ ab (siehe z.B. [37]):

$$\rho(\vartheta) = \frac{1}{\vartheta + 273.2} [3.496 p - 1.323 \varphi p_{D,S}(\vartheta)]$$

mit

p Gesamtdruck der feuchten Luft

$p_{D,S}(\vartheta)$ Sättigungsdruck des Wasserdampfes

Für den, in den Tabellen der DIN 18910 [38] verwendeten Gesamtdruck von 725 Torr erhält man dann folgende Bestimmungsgleichung für $\rho(\vartheta)$:

$$\rho(\vartheta) = \frac{1}{\vartheta + 273.2} [337.1 - 1.323 \varphi p_{D,S}(\vartheta)] \quad (18)$$

Die Abhängigkeit des Sättigungsdruckes von der Temperatur läßt sich nach [14] mit folgenden Beziehungen annähern:

$$\begin{aligned} p_{D,S}(\vartheta) &= 0.6107 \exp \left\{ \frac{17.26939 \vartheta}{\vartheta + 237.2} \right\} \quad \text{für } 0^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 100^\circ\text{C} \\ &= 0.6107 \exp \left\{ \frac{20.1125 \vartheta}{\vartheta + 245.4} \right\} \quad \text{für } -60^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 0^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Die spezifische Enthalpie der feuchten Luft errechnet sich nach

$$h = c_{pL} \vartheta + x (r_o + c_{pD} \vartheta)$$

mit

c_{pL}, c_{pD} spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck von Luft (L) bzw. Wasserdampf (D)

r_o Verdampfungswärme

x Feuchte der Luft

Die Feuchte der Luft x errechnet sich nach [37] zu:

$$x(\vartheta, \varphi) = \frac{2173}{\vartheta + 273.2} \varphi p_{D,S}(\vartheta) \quad (18a)$$

Für die spezifische Enthalpie feuchter Luft ergibt sich dann:

$$h(\vartheta, \varphi) = \frac{1}{\vartheta + 273.2} [93.8 \vartheta + \varphi p_{D,S}(\vartheta) (0.19 \vartheta + 1505)] \quad (18b)$$

Damit sind aber die Lüftungswärmeströme Funktionen der Temperatur ϑ und der relativen Feuchte φ der Luft:

$$\dot{Q}_{LZ} = \dot{Q}_{LZ}(\vartheta_z, \varphi_z)$$

$$\dot{Q}_{LA} = \dot{Q}_{LA}(\vartheta_i, \varphi_i)$$

Eine deutliche Veränderung des Wassergehaltes der Ab- und Zuluft wäre durch Zwangskondensation (z.B. an kalten Flächen oder in Trockenmitteln) bei den großen Lüftungs-Volumenströmen in Ställen (bis zu 13000 m³/h) zwar technisch schwierig, prinzipiell aber möglich. Diese mit Kosten verbundene Maßnahme wird hier nicht betrachtet. Für die relative Feuchte der Luft werden dementsprechend konstante Rechenwerte verwendet.

Aus den Gl. (16) - (18) zeigt sich, daß dann noch eine Änderung folgender Bestimmungsgrößen durch betriebliche oder technische Maßnahmen zu beachten ist:

Luftrate	$\dot{V}_L$
Raumtemperatur	ϑ_i
Zulufttemperatur	ϑ_z

Die Luftrate $\dot{V}_L$ ist eine durch die Nutzung des Raumes festgelegte Größe. Die Raumluft muß so häufig mit Frischluft erneuert werden, daß die Konzentration von Luftbestandteilen, die für den Betrieb und die baulichen Einrichtungen des Raumes schädlich sind (z.B. Schadgase, Wasserdampf), bestimmte Maximalwerte nicht überschreitet, und zwar überall im Raum oder aber nur in bestimmten Bereichen.

Welche Luftraten in der Praxis wirklich notwendig sind, um diese Forderungen erfüllen zu können, hängt sehr stark davon ab, wie die Zuluft durch den Raum geführt wird. Bei schlechter Luftführung sind höhere $\dot{V}_L$ -Werte notwendig. Da aber die Luftführung eine mit Kosten verbundene technische Maßnahme darstellt, wäre $\dot{V}_L$ von dieser Seite aus eigentlich als eine in die Optimierungsgleichung eingehende Einflußgröße anzusehen. In den weiteren Betrachtungen wird dieser Zusammenhang jedoch nicht weiter verfolgt, weil für die monetäre Bewertung z.Zt. praktisch keine Daten vorliegen. Bei der Anwendung der Optimierungsmethode auf Räume mit bestimmter Nutzung (z.B. auf einen Stall) ist schließlich noch zu beachten, wie die Luftrate $\dot{V}_L$ im Einzelfall festzulegen ist.

Die Raumtemperatur ϑ_i ist nur dann als eine kostenfreie betriebliche Bestimmungsgröße der Wärmestrombilanz anzusehen, wenn sie sich in einem Temperaturbereich bewegt, in dem durch die Temperatur und durch die damit verbundene relative Feuchte der Raumlufte keine mit Kosten verknüpften Schäden entstehen, z.B. durch Erkrankungen der Menschen in Wohnräumen, Abfall der tierischen Leistungsfähigkeit in Ställen. Auch dieser Zusammenhang bleibt im Folgenden ausgegliedert, da Kostenangaben fehlen.

Weiter verfolgt wird dagegen die Möglichkeit der Beeinflussung der Wärmestrombilanz über die Zulufttemperatur. Im Normalfall wird die Außenluft dem Raum direkt zugeführt. Die Zulufttemperatur entspricht dann der Außentemperatur, d.h. es ist $\dot{Q}_{LZ} = Q_{LZ}(\vartheta_a)$. Eine Erhöhung der Zulufttemperatur ist mit folgenden technischen Maßnahmen möglich:

- Erwärmung der Zuluft durch eine Heizung. Diese Maßnahme entspricht der schon angeführten Raumheizung.
- Erwärmung der Zuluft in einem Lüftungswärmetauscher, Rückgewinnung von Lüftungswärme.
- Erwärmung der Zuluft in einem Transmissionswärmetauscher (siehe [3]), Rückgewinnung von Transmissionswärme.

Da für die Anlagen zur Rückgewinnung von Transmissionswärme z.Zt. noch nicht alle technischen und finanziellen Kennwerte bekannt sind, beschränken sich die weiteren Betrachtungen auf die Einbeziehung von Anlagen zur Rückgewinnung von Lüftungswärme (siehe Abschnitt 4.2).

In den Lüftungswärmetauschern wird die Zuluft durch Wärmeübertragung aus der Abluft von der Außentemperatur ϑ_a auf die Temperatur $\vartheta_{Z,LR}$ angehoben. Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Wärmetauscher läßt sich dabei mit dem vom Volumenstrom der Lüftung abhängigen Temperatúraustauschgrad $\Phi_t (\dot{V}_L)$ beschreiben (siehe [15] und Abschnitt 4.2). Es gilt

$$\vartheta_{Z,LR} = (\vartheta_i - \vartheta_a) \Phi_t (\dot{V}_L) \quad (19)$$

Damit kann aber Φ_t als eine die Rückgewinnung von Lüftungswärme kennzeichnende Bestimmungsgröße der Wärmestrombilanz angesehen werden. Für den Wärmestrom selbst ergibt sich dann

$$\dot{Q}_{LZ,LR} = \dot{Q}_{LZ,LR} (\Phi_t, \vartheta_a) \quad (20)$$

3.2.2.4 Transmissionswärmestrom

Der aus einem Raum mit der konstanten Temperatur ϑ_i abfließende Wärmestrom errechnet sich im stationären Fall (bei konstanter Außentemperatur ϑ_a) und wenn die Raumhülle aus einem einheitlichen Bauelement besteht zu:

$$\dot{Q}_T (k, \vartheta_a) = k A (\vartheta_i - \vartheta_a) \quad (21)$$

mit

A Fläche der Raumhülle

k Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert) der Raumhülle

Bilden mehrere Bauelemente die Raumhülle, so gilt:

$$\dot{Q}_T (k_m, \vartheta_a) = (\vartheta_i - \vartheta_a) \sum_{l=1}^m k_l A_l = k_m A_{ges} (\vartheta_i - \vartheta_a) \quad (22)$$

$$k_m = \frac{\sum_{l=1}^m k_l A_l}{A_{ges}} \quad (23)$$

$$A_{ges} = \sum_{l=1}^m A_l \quad (24)$$

mit

k_m mittlerer k-Wert der Raumhülle

k_l k-Wert des Bauelementes l

A_{ges} Gesamtfläche der Raumhülle

A_l Fläche des Bauelementes l

Da sich die Außentemperatur ändert und wegen der Strahlungsenergie der Sonne, sind in Wirklichkeit instationäre Verhältnisse gegeben, was bei der Berechnung der Wärmeenergiebilanz eines bestimmten Zeitraumes zu bedenken sein wird (siehe Abschnitt 3.2.4.1 und 4.1.2).

Aus der Gleichung (23) ist zu ersehen, daß die Flächen und die Wärmedurchlaßkoeffizienten der Bauelemente in der Raumhülle als durch technische Maßnahmen beeinflussbare Bestimmungsgrößen der Wärmestrombilanz zu beachten sind. Während die Verringerung der Wärmedurchlaßkoeffizienten durch entsprechende Wärmedämmmaßnahmen eine wirksame, mit Kosten verbundene technische Maßnahme darstellt, und in den folgenden Ausführungen eingehend zu behandeln ist, wird die Möglichkeit des Ausgleiches von Bilanzdefiziten durch Minimierung der Raumhüllen-Gesamtfläche hier nicht weiter verfolgt.

3.2.2.5 Zusammenfassung

Die Analyse der Wärmestrombilanz-Bestimmungsgrößen führt also zu folgenden technischen Maßnahmen, die als Alternative zur Zusatzheizung in die wirtschaftliche Optimierung des Ausgleiches von Defiziten in der Wärmebilanz von Räumen einbezogen werden könnten:

- Erwärmung der Zuluft in Lüftungswärmetauschern,
- Erwärmung der Zuluft in Transmissionswärmetauschern und
- Wärmedämmung.

Erwähnt sei noch, daß die über Lüftungs- und Transmissionswärmetauscher zurückgewonnenen Wärmeströme nicht nur direkt zur Erwärmung der Zuluft gebraucht, sondern auch indirekt unter Zwischenschaltung einer Wärmepumpe als Heizungs-Wärmestrom wieder dem Raum zugeleitet werden können.

Diese Möglichkeiten des Bilanzausgleiches bleiben im Folgenden ausgeklammert, lassen sich aber ohne Probleme in einem erweiterten Optimierungsansatz berücksichtigen.

Da hier nur die Rückgewinnung von Lüftungswärme weiter untersucht werden soll, ergibt sich für diesen Fall folgende, später gebrauchte Gleichung für die Wärmestrombilanz-Differenz eines belüfteten Raumes:

$$\Delta \dot{Q} (k_m, \phi_t, \vartheta_a) = \dot{Q}_i + \dot{Q}_{LZ,LR} (\phi_t, \vartheta_a) - \dot{Q}_{LA} - \dot{Q}_t (k_m, \vartheta_a) \quad (25)$$

Für einen nichtbelüfteten Raum gilt:

$$\Delta \dot{Q} (k_m, \vartheta_a) = \dot{Q}_i - \dot{Q}_T (k_m, \vartheta_a) \quad (26)$$

Aus den Gleichungen ist zu ersehen, daß folgende, mit Kosten verbundenen Bestimmungsgrößen im allgemeinsten hier behandelten Fall bei den weiteren Berechnungen zu beachten sind:

- der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient k_m
- der Temperatúraustauschgrad ϕ_t .

Die abgeleiteten Rechenverfahren gelten auch für Problemstellungen, bei denen nur eine der vorgestellten Maßnahmen als Alternative zur Heizung betrachtet werden soll.

3.2.3 Monetäre Bewertung der Wärmestrombilanz-Bestimmungsgrößen

3.2.3.1 Temperaturaustauschgrad als Bestimmungsgröße für die Rückgewinnung von Lüftungswärme

Die durch Messungen zu bestimmende Abhängigkeit $\Phi_t = f(\dot{V}_L)$ beschreibt die Wärmeübertragung in einem Lüftungswärmetauscher vollständig. Das bedeutet, daß jeder, durch ein bestimmtes Konstruktionsprinzip und durch eine bestimmte Ausführung definierter Wärmetauscher (mit der Laufzahl i als Kennzeichnung) durch eine einzige Abhängigkeit $\Phi_{t,i} = f_i(\dot{V}_L)$ charakterisiert wird. Entsprechend ergibt sich eine eindeutige Zuordnung zwischen $\Phi_{t,i}$ und den finanziellen Kenngrößen des Wärmetauschers i

- Investition $K_{I,LR,i}$ und
- Betriebskosten $\dot{K}_{B,LR,i}$

Bei den Betriebskosten sind vor allem die erhöhten Stromkosten zu beachten, die notwendig werden, um die Druckverluste durch den Wärmetauscher auszugleichen (siehe 4.2).

3.2.3.2 Wärmedurchlaßkoeffizient als Bestimmungsgröße von Wärmedämm-Maßnahmen

3.2.3.2.1 Investitionsbedarf für Wärmedämm-Maßnahmen in einem Bauelement

Um den Wärmedurchlaßkoeffizienten monetär bewerten zu können, geht man davon aus, daß sich der Investitionsbedarf für eine Wärmedämmkonstruktion $K_{I,WD}$ in einen flächen- und volumenabhängigen Anteil zerlegen läßt (siehe [9]):

$$K_{I,WD} = A K_{I,WD}^* + A s K_{I,WD}^{**} \quad (27)$$

mit

A Fläche des Bauelementes

s Dämmschichtdicke

$K_{I,WD}^*$ flächenbezogener Preis der für die Dämmkonstruktion zusätzlich benötigten Baustoffe (z.B. für die Außenverkleidung) und für den Arbeitsaufwand

$K_{I,WD}^{**}$ volumenbezogener Preis des Wärmedämmstoffes

Aus der Definition des den Wärmestrom durch das Bauelement kennzeichnenden Wärmedurchlaßkoeffizienten k folgt:

$$s = \lambda \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k_o} \right) \quad (28)$$

mit

λ Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffes

k_o Wärmedurchgangskoeffizient vor Durchführung der Wärmedämm-Maßnahme, Ausgangs-k-Wert

Aus den Gl. (27) und (28) ergibt sich:

$$K_{I,WD} = A K_{I,WD}^* + A K_{I,WD}^{**} \lambda \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k_o} \right) \quad (29)$$

Die Gl. (29) gibt die monetäre Bewertung des k -Wertes für den Fall an, daß die Raumhülle aus einem Bauelement gebildet wird.

3.2.3.2.2 k -Wert-Kombination mit minimaler Gesamtinvestition bei Raumhüllen aus mehreren Bauelementen

Besteht die Raumhülle aus mehreren verschiedenartigen Bauelementen, so läßt sich ein bestimmter mittlerer k -Wert der Raumhülle aus den Wärmedurchlaßkoeffizienten der einzelnen Bauelemente in sehr unterschiedlicher Weise und mit entsprechend unterschiedlichem Investitionsbedarf erstellen. Die Ermittlung der k -Wert-Kombination mit minimaler Gesamtinvestition ist ebenfalls eine Opti-

mierungsaufgabe, für die sich der Lösungsansatz in folgender Weise ableiten läßt (siehe [9]):

Aus der Definition des mittleren k-Wertes in Gl. (24) ergibt sich für die Veränderung des mittleren k-Wertes durch eine Änderung des k-Wertes im Bauelement 1:

$$(\Delta k_m)_1 = \frac{A_1}{A_{\text{ges}}} \Delta k_1 = \frac{A_1}{A_{\text{ges}}} (k_{1,o} - k_1) \quad (30)$$

mit

$k_{1,o}$ Ausgangswert von k für das Bauelement 1

Eine angestrebte Änderung Δk_m des mittleren k-Wertes läßt sich aus k-Wert-Änderungen in den insgesamt m Bauelementen folgendermaßen zusammensetzen:

$$\Delta k_m = k_{m,o} - k_m = \sum_{l=1}^m (\Delta k_m)_l = \sum_{l=1}^m x_l \Delta k_m \quad (31)$$

mit

$$x_l = \frac{A_l (k_{l,o} - k_l)}{A_{\text{ges}} (k_{m,o} - k_m)} \quad (32)$$

$$\sum_{l=1}^m x_l = 1 \quad (33)$$

$k_{m,o}$ Ausgangswert des mittleren k-Wertes

x_l Anteil der k-Wert-Änderung im Bauelement l
an der Änderung vom k_m

Aus der Gleichung (32) folgt:

$$k_l = \frac{1}{A_l} [A_l k_{l,o} - A_{\text{ges}} x_l (k_{m,o} - k_m)] \quad (34)$$

Die Gesamtinvestition ist damit entsprechend Gl. (29):

$$\begin{aligned}
 K_{I,WD} (k_m) &= \sum_{l=1}^m K_{I,WD,l} \\
 &= \sum_{l=1}^m A_l K_{I,WD,l}^* + \sum_{l=1}^m \lambda_l A_l A_{ges} K_{I,WD,l}^{**} \cdot \\
 &\quad \cdot \frac{x_l (k_{m,o} - k_m)}{A_l k_{l,o}^2 - x_l A_{ges} k_{l,o} (k_{m,o} - k_m)}
 \end{aligned} \tag{35}$$

mit

$K_{I,WD,l}^*$ flächenbezogener Preis der Wärmedämm-Maßnahme im Bauelement l

$K_{I,WD,l}^{**}$ volumenbezogener Preis für den Wärmedämmstoff im Bauelement l

λ_l Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffes im Bauelement l

Durch Variation der x_l in Gl. (35) läßt sich dann die k-Wert-Kombination mit minimaler Gesamtinvestition iterativ ermitteln.

3.2.3.2.3 Minimale Gesamtinvestition bei Wärmedämm-Maßnahmen in zwei Bauelementen

Für den Fall, daß in nur zwei Bauelementen Wärmedämm-Maßnahmen durchgeführt werden, folgt aus Gl. (35) nach Anwendung der Optimierungsbedingung

$$K_{I,WD} (k_m) = \text{Minimum}$$

bzw.

$$\frac{d [K_{I,WD} (k_m)]}{d (k_m)} = 0$$

die geschlossene Lösung der Optimierungsgleichung (siehe [9]):

$$K_{I,WD,min,1+2}(k_m) = A_1 K_{I,WD,1}^* + A_2 K_{I,WD,2}^* + \frac{c_1 x_{min}}{1-c_3 x_{min}} + \frac{c_2 (1-x_{min})}{1-c_4 (1-x_{min})} \quad (36)$$

mit

$$c_1 = \lambda_1 K_{I,WD,1}^{**} A_{ges} \frac{k_{m,o} - k_m}{k_{1,o}^2}; \quad c_3 = \frac{A_{ges} (k_{m,o} - k_m)}{A_1 k_{1,o}} \quad (37)$$

$$c_2 = \lambda_2 K_{I,WD,2}^{**} A_{ges} \frac{k_{m,o} - k_m}{k_{2,o}^2}; \quad c_4 = \frac{A_{ges} (k_{m,o} - k_m)}{A_2 k_{2,o}}$$

$$x_{min} = \frac{\sqrt{c_2/c_1} + c_4 - 1}{c_4 + c_3 \sqrt{c_2/c_1}} \quad (38)$$

Der k_m -Wert läßt sich dabei nur in folgendem Wertebereich durch Kombination von Wärmedämm-Maßnahmen bei beiden Bauelementen erreichen (siehe [9]):

$$\frac{k_{1,o} A_1}{A_{ges}} (1 - \sqrt{c_1/c_2}) < k_m < \frac{1}{A_{ges}} (k_{1,o} A_1 + k_{2,o} A_2) \quad (39)$$

k_m -Werte oberhalb dieses Bereiches sind über nur eines der Bauelemente zu realisieren, so daß der minimale Investitionsaufwand für diese k_m -Werte aus dem Vergleich der für beide Bauelemente einzeln berechneten Investitionen zu ermitteln ist. Es kann darüber hinaus vorkommen, daß für einen bestimmten k_m -Wert im Wertebereich mit möglicher Kombination beider Wärmedämm-Maßnahmen die minimale Gesamtinvestition für beide Bauelemente größer ist als die zum gleichen k_m -Wert führende Investition für nur eines der Bauelemente. Die minimale Gesamtinvestition $K_{I,WD,min}(k_m)$, mit der in die Optimierungsrechnung eingegangen wird, ergibt sich danach aus dem Vergleich folgender drei Investitionen für jeden k_m -Wert:

$$K_{I,WD,min,1+2}(k_m), K_{I,WD,1}(k_m), K_{I,WD,2}(k_m)$$

Da es weiterhin für jedes der beiden Bauelemente mehrere Ausführungsmöglichkeiten mit entsprechend unterschiedlichem Investitionsbedarf gibt, ergibt sich für diesen Fall die minimale Gesamtinvestition $K_{I,WD,min} (k_m)$ durch Vergleich folgender Investitionen:

$$K_{I,WD,min,1+2,1,m} (k_m) \quad \begin{array}{l} l = 1, \dots, n_1 \\ m = 1, \dots, n_2 \end{array}$$

$$K_{I,WD,1,1} (k_m)$$

$$K_{I,WD,2,m} (k_m)$$

3.2.4 Berechnung der Jahreskosten für die Zusatzheizung über die Wärmeenergiebilanz des Raumes

3.2.4.1 Wärmeenergiebilanz belüfteter Räume

Um die nach der Durchführung von Maßnahmen zur Wärmedämmung und Wärmerückgewinnung gegebenenfalls noch verbleibenden Jahreskosten für eine Zusatzheizung berechnen zu können, ist, wie schon in Abschnitt 3.2.1 dargestellt wurde, eine Wärmeenergiebilanz des Raumes zu erstellen. Es müssen dazu die in den Raum hinein- und aus dem Raum hinausfließenden Wärmeströme mit der Zeit multipliziert werden, in der sie fließen. Da sich während des hier zu betrachtenden Zeitraumes von einem Jahr die Außenraumtemperatur ändert, sind instationäre Verhältnisse gegeben. Das bedeutet bei einem belüfteten Raum, daß sich der Zuluft- und der Transmissionswärmestrom mit der Außenraumtemperatur verändern. Das Defizit in der Wärmeenergiebilanz läßt sich für diesen Fall angenähert berechnen, indem man die bei einer bestimmten Außenraumtemperatur gegebene Wärmestrombilanz-Differenz $\Delta \dot{Q} (k_m, \phi_{t,i}, \vartheta_a)$ von Gl. (25) mit der zeitlichen Häufigkeit (Zahl der Stunden pro Jahr) multipliziert, in der diese Außenraumtemperatur herrscht und über alle während eines Jahres herrschenden Temperaturen unterhalb der Grenztemperatur mit ausgeglichener Wärmestrombilanz summiert.

Man erhält also ein Rechenmodell für die Wärmeenergiebilanz-Differenz eines belüfteten Raumes, wenn man die Wärmestrombilanz mit

einer Häufigkeitsverteilung der Außenraumtemperatur in folgender Weise verknüpft (siehe [8]):

$$\Delta E(k_m, \phi_{t,i}) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{m_t} t(\vartheta_{a,n}) [\Delta \dot{Q}(k_m, \phi_{t,i}, \vartheta_{a,n}) + \Delta \dot{Q}(k_m, \phi_{t,i}, \vartheta_{a,n+1})] \quad (40)$$

$$\vartheta_{a,n+1} = \vartheta_{a,n} + \Delta \vartheta$$

$\Delta \vartheta$ Klassenbreite der Häufigkeitsverteilung

$t(\vartheta_{a,n})$ Zahl der Stunden im Jahr mit einer Außenraumtemperatur im Bereich $\vartheta_{a,n} \leq \vartheta_a \leq \vartheta_{a,n+1}$

$\vartheta_{a,n=0}$ untere Grenztemperatur mit $t(\vartheta_{a,0}) = 0$

$\vartheta_{a,n=m_t}$ obere Grenztemperatur mit $\Delta \dot{Q}(\vartheta_{a,m_t}) + \Delta \dot{Q}(\vartheta_{a,m_t+1}) > 0$

ΔE Wärmeenergiedifferenz pro Jahr ($\Delta E \leq 0$)

Dieses Rechenverfahren hat Modellcharakter, weil vorausgesetzt wird, daß sich der Zuluft- und der Transmissionswärmestrom ohne zeitliche Verzögerungen mit der Außenraumtemperatur ändern. Diese Annahme ist beim Zuluftwärmestrom sicherlich gerechtfertigt. Bei dem Transmissionswärmestrom wird sich dagegen die Wärmekapazität der Baustoffe in der Raumhülle bemerkbar machen und eine, je nach Ausführung der Raumhülle unterschiedlich große Dämpfung und Phasenverschiebung des Wärmestromes bewirken. An Massivwänden durchgeführte Messungen (siehe [27]) weisen allerdings darauf hin, daß sich diese Trägheitseffekte in längeren Zeiträumen ausmitteln.

3.2.4.2 Wärmeenergiebilanz nicht belüfteter Räume

Bei nicht belüfteten Räumen vereinfacht sich die Wärmeenergiebilanzierung, da nur der Transmissionswärmestrom zu berücksichtigen ist. Im stationären Fall gilt nach den Gl. (22) und (26):

$$\begin{aligned}\Delta E(k_m, \vartheta_a) &= t(\vartheta_a) \Delta \dot{Q}(k_m, \vartheta_a) = t(\vartheta_a) [\dot{Q}_i - \dot{Q}_T(k_m, \vartheta_a)] = \\ &= \dot{Q}_i t(\vartheta_a) - k_m A_{ges} t(\vartheta_a) (\vartheta_i - \vartheta_a)\end{aligned}$$

$$\Delta E(k_m, \vartheta_a) = \dot{Q}_i t(\vartheta_a) - k_m A_{ges} t(\vartheta_a) \Delta \vartheta \quad (41)$$

mit

$t(\vartheta_a)$ Zahl der Stunden im Jahr mit einer Außentemperatur ϑ_a

Bei instationären Verhältnissen ist anstelle des Produktes $t(\vartheta_a) \Delta \vartheta$ die Summe aller Produkte aus der jeweiligen Temperaturdifferenz und der zugehörigen zeitlichen Häufigkeit einzusetzen. Die sich ergebende Größe wird, je nach der gewählten Zeiteinheit, als "Heizgradstunden" G_h oder "Heizgradtage" G_t benannt, wobei gilt

$$\sum_n [t_n (\Delta \vartheta)_n] = 24 \sum (\Delta \vartheta)_m = 24 G_t = G_h \quad (42)$$

mit

$(\Delta \vartheta)_m$ mittlere Temperaturdifferenz während der Heizzeit

z Zahl der Heiztage

Werte für die Heizgradtage einzelner Orte können aus Tafeln entnommen werden. Sie beziehen sich auf eine Raumtemperatur von 20°C . Für Temperaturen unter 20°C lassen sich die entsprechenden Werte mit Umrechnungsfaktoren ermitteln.

Die Heizgradstunden lassen sich auch mit Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur in folgender Weise errechnen (siehe [10]):

$$G_h (\vartheta_i) = \sum_{n=0}^{m_t} t (\vartheta_{a,n}) \left[\vartheta_i - \frac{1}{2} (\vartheta_{a,n} + \vartheta_{a,n+1}) \right] \quad (43)$$

mit

$\vartheta_{a,n=0}$ untere Grenztemperatur mit $t (\vartheta_{a,0}) = 0$

$\vartheta_{a,n=m_t}$ obere Grenztemperatur mit $\vartheta_{a,m_t+1} = \vartheta_i$ oder
 $t (\vartheta_{a,m_t}) = 0$

$G_h (\vartheta_i)$ Heizgradstunden für die Raumtemperatur im Zeitraum, den die Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur beschreibt (d.h. hier: pro Jahr)

Auch dieses Rechenverfahren hat Modellcharakter (siehe Abschnitt 3.2.4.1), da der Transmissionswärmestrom Trägheitseffekten unterliegt.

Für die Wärmeenergiedifferenz ergibt sich damit:

$$\Delta E (k_m) = t \dot{Q}_i - k_m A_{ges} G_h \quad (44)$$

mit

t Zahl der Stunden im Jahr mit einer Außentemperatur unterhalb der oberen Grenztemperatur

3.2.4.3 Jahreskosten für den Betriebsstoff der Heizung

Die durchschnittlichen Jahreskosten für die Heizung $\dot{K}_{BS,H}$ errechnen sich aus der Wärmeenergiedifferenz ΔE und dem Energiepreis K'_E zu:

$$\dot{K}_{BS,H} (k_m, \phi_{t,i}) = - K'_E \Delta E (k_m, \phi_{t,i}) \quad (45)$$

Der Energiepreis läßt sich aus dem Brennstoffpreis nach folgender Beziehung berechnen (siehe [2]):

$$K'_E = 0.0036 \frac{K'_B}{\eta_{H_U}} \quad (46)$$

mit

K'_B	Preis für eine Brennstoffeinheit (Heizöl: DM/l)
H_U	Heizwert der Brennstoffeinheit (Heizöl: $H_U = 35.6$ MJ/l)
η	Gesamtwirkungsgrad der Heizanlage (Heizöl: $\eta = 0.75$)

3.2.5 Formulierung der Optimierungsgleichung

3.2.5.1 Belüftete Räume

Im allgemeinsten hier zu behandelnden Fall des Ausgleiches von Wärmebilanzdefiziten belüfteter Räume sind im Optimierungsansatz der jährlichen Gesamtkosten durchschnittliche Jahreskosten zu berücksichtigen für:

$\dot{K}_{I,WD,l} (k_m), \dot{K}_{W,WD,l}$	Investitionsbedarf (I) und Instandhaltung (W:Wartung) der Wärmedämmkonstruktion im Bauelement 1
$\dot{K}_{I,LR,i} (\Phi_{t,i}), \dot{K}_{W,LR,i}, \dot{K}_{BS,LR,i}$	Investitionsbedarf (I), Instandhaltung (W) und Betriebsstoffe (BS) der Anlage i zur Rückgewinnung von Lüftungswärme
$\dot{K}_{I,H}, \dot{K}_{W,H}, \dot{K}_{BS,H} (k_m, \Phi_{t,i})$	Investitionsbedarf (I), Instandhaltung (W) und Betriebsstoffe (BS) der Heizungsanlage

Die Instandhaltungskosten werden bei den weiteren Berechnungen außer Acht gelassen, da entsprechendes Datenmaterial nicht vorliegt. Im übrigen sind in einem landwirtschaftlichen Betrieb auch keine sehr hohen derartigen Kosten zu erwarten, da die Landwirte Wartungsarbeiten normalerweise selbst durchführen.

Der Investitionsbedarf für die Heizungsanlage wird im allgemeinen entsprechend der Größe des Energiedefizits unterschiedlich hoch sein, also von den Wärmebilanz-Bestimmungsgrößen k_m und Φ_t abhängen. Im folgenden wird jedoch davon ausgegangen, daß für die Heizung keine Investitionen zu tätigen sind. Damit wird der in der

Praxis häufige Fall behandelt, daß Ställe nachträglich wärmege-
dämmt werden bzw. einen Wärmetauscher erhalten, Heizanlagen also
schon vorhanden sind.

Für die jährlichen Gesamtkosten ergibt sich dann mit Gl. (13):

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\text{ges}}(k_m, \Phi_{t,i}) = \sum_{l=1}^m \dot{K}_{I,WD,l}(k_m) + \dot{K}_{I,LR,i}(\Phi_{t,i}) + \dot{K}_{BS,LR,i} + \\ + \frac{a_N}{a'_N} \dot{K}_{BS,H}(k_m, \Phi_{t,i}) \end{aligned} \quad (47)$$

mit

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^m \dot{K}_{I,WD,l}(k_m) &= a_N K_{I,WD,\min}(k_m) \\ \dot{K}_{I,LR,i}(\Phi_{t,i}) &= a_N K_{I,LR,i} \\ \dot{K}_{BS,H}(k_m, \Phi_{t,i}) &= K'_E [-\Delta E(k_m, \Phi_{t,i})] \end{aligned}$$

In der Gl. (47) ist weiterhin vorausgesetzt, daß sich der Zinssatz
und die Energiepreissteigerung im Nutzungszeitraum nicht ändern
und daß die Wärmedämm-Bauelemente sowie die Wärmetauscher die
gleiche Nutzungsdauer N haben. Die letzte Annahme ist damit zu be-
gründen, daß die üblicherweise länger anzusetzende Nutzungsdauer
für die Wärmedämmung bei den Umwelt- und Betriebsbedingungen in der
Landwirtschaft normalerweise nicht gegeben ist. So können Wärme-
dämmplatten, die in Ställen als Wärmedämmelemente im Decken- bzw.
Dachdeckenbereich weit verbreitet sind, z.B. durch Ungeziefer so-
weit geschädigt werden, daß eine frühzeitige Auswechslung notwen-
dig wird.

3.2.5.2 Nicht belüftete Räume

Für nicht belüftete Räume vereinfacht sich die Gl. (47) zu:

$$\dot{K}_{\text{ges}}(k_m) = a_N K_{I,WD,\min}(k_m) + \frac{a_N}{a'_N} K'_E [-\Delta E(k_m)] \quad (48)$$

3.2.6 Rechenverfahren zur Lösung der Optimierungsgleichung

3.2.6.1 Belüftete Räume

Wie schon aus den Bestimmungsgleichungen (35) bzw. (36) für den Investitionsbedarf von Wärmedämm-Maßnahmen ersehen werden kann, ist die Optimierungsgleichung belüfteter Räume nicht linear und daher nicht geschlossen lösbar. Es ist daher notwendig, in einem iterativen Rechenverfahren die Einflußgröße k_m zu variieren (die weitere Einflußgröße $\Phi_{t,i}$ kann nur durch Austausch des Wärmetauschers verändert werden!), um über Gl. (47) die minimalen Jahreskosten und damit den beim Einsatz des jeweiligen Wärmetauschers wirtschaftlich optimalen mittleren k -Wert ermitteln zu können.

Die bei diesem Rechenverfahren anfallenden Rechenarbeiten lassen sich nur mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung bewältigen. Bis jetzt liegen Rechenprogramme für folgende Maßnahmen-Kombinationen zum Ausgleich von Wärmebilanzdefiziten vor:

- Wärmedämmung in wahlweise ein oder zwei Bauelementen, Heizung (siehe Abschnitt 4.1)
- Wärmedämmung in wahlweise ein oder zwei Bauelementen, Rückgewinnung von Lüftungswärme, Heizung (siehe Abschnitt 4.2).

3.2.6.2 Nicht belüftete Räume

Die Optimierungsgleichung (48) für nicht belüftete Räume läßt sich nur für den Spezialfall geschlossen lösen, wenn die Raumhülle von einem einheitlichen Bauelement gebildet wird (siehe [10]):

Mit den Gl. (29) und (44) folgt für Gl. (48):

$$\begin{aligned} \dot{K}_{ges}(k) = & a_N [AK_{I,WD}^* + \lambda AK_{I,WD}^{**} (\frac{1}{k} - \frac{1}{k_o})] + \\ & + \frac{a_N}{a'_N} K'_E [-t\dot{Q}_i + kA G_h] \end{aligned} \quad (49)$$

Die Optimierungsbedingung $\dot{K}_{ges}(k) = \min$ bzw. $\frac{d(\dot{K}_{ges})}{dk} = 0$

führt zu:

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{\lambda a'_N K_{I,WD}^{**}}{G_h K'_E}} \quad (50)$$

Die entsprechende optimale Dämmschichtdicke errechnet sich über Gl. (28) zu

$$s_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{\lambda_{G_h} K'_E}{a'_N K_{I,WD}^{**}}} - \frac{\lambda}{k_o} \quad (51)$$

Die Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung eines nicht belüfteten Raumes werden damit von folgenden Bestimmungsgrößen festgelegt:

Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogener Preis des Wärmedämmstoffes, Zins- und Energiepreissteigerungsfaktor sowie Nutzungsdauer, Energiepreis und Heizgradstunden des Standortes.

Die übrigen Größen der Optimierungsgleichung beeinflussen nur die Höhe der jährlichen Gesamtkosten, nicht aber den optimalen k-Wert.

Wird der nicht belüftete Raum von mehreren unterschiedlichen Bauelementen begrenzt, so ist ebenfalls ein iteratives Rechenverfahren zur Lösung der Optimierungsgleichung erforderlich, wobei sich die Gesamtinvestition für die Wärmedämmung nach den Abschnitten 3.2.3.2.2 (3) errechnet.

3.3 Rechenwerte zur Erfassung des Einflusses der Außentemperatur und -feuchte

3.3.1 Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur, Außenfeuchte

Da bei der Planung von Maßnahmen für den Ausgleich des Wärmebilanzdefizits von Räumen immer eine mehrjährige Nutzung vorausgesetzt wird (siehe Abschnitt 1), ist für die Einbeziehung des Einflusses der Außentemperatur (siehe Abschnitt 3.2.4) eine aus möglichst langjährigen Temperaturmessungen gewonnene Häufigkeitsverteilung erforderlich (siehe [14]). Die für die vorliegende Arbeit verwendeten Häufigkeitsverteilungen für die Orte Oberstdorf, München und Hamburg wurden vom Deutschen Wetterdienst aus Temperaturmessungen im Zeitraum 1951 - 70 errechnet und lassen sich in ihrer Klasseneinteilung folgendermaßen beschreiben:

$$\Delta \vartheta = 1 \text{ K}$$

$$\vartheta_{a,n} = 0, 1, 2, \dots \text{ } ^\circ\text{C} \quad t(\vartheta_{a,n}) = t(\vartheta_{a,n} \leq \vartheta_a < \vartheta_{a,n+1})$$

$$\vartheta_{a,n} = -1^\circ\text{C} \quad t(\vartheta_{a,n} = -1^\circ\text{C}) = t(-1^\circ\text{C} < \vartheta_a < 0^\circ\text{C})$$

$$\vartheta_{a,n} = -2, -3, -4, \dots \text{ } ^\circ\text{C} \quad t(\vartheta_{a,n}) = t(\vartheta_{a,n} < \vartheta_a \leq \vartheta_{a,n+1})$$

Klassenmitte: $\pm 0.5, \pm 1.5, \pm 2.5^\circ\text{C}, \dots$

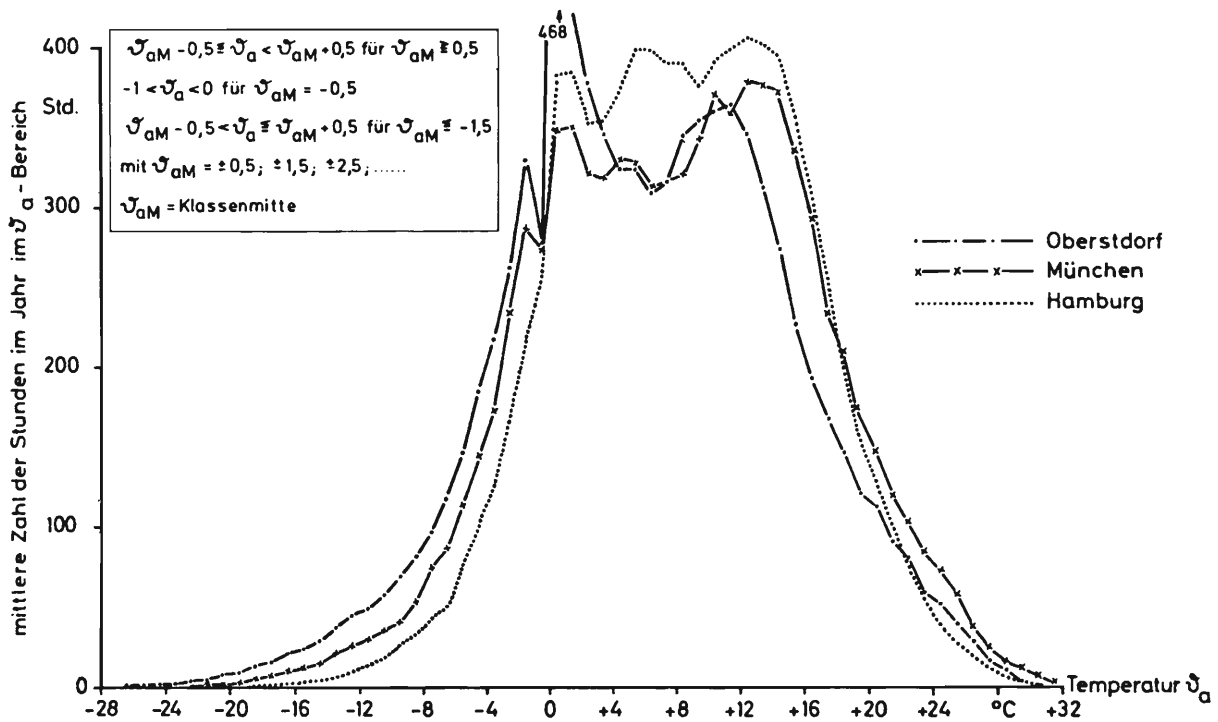


Bild 1: Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur

(mittlere Zahl der Stunden pro Jahr für den Zeitraum 1951 - 1970)

Quelle: Deutscher Wetterdienst

Bei der Darstellung dieser Verteilungen in Bild 1 wurden der Übersichtlichkeit wegen die $t(\vartheta_{a,n})$ -Werte bei den Klassenmitten miteinander verbunden. Die so erhaltenen Kurven verdeutlichen, daß sich die ausgewählten Orte u.a. in der Zahl der Stunden mit niedrigen Temperaturen deutlich unterscheiden.

Als Durchschnittswert für die Außenfeuchte wird bei allen weiteren Berechnungen $\varphi_a = 80 \%$ verwendet.

3.3.2 Heizgradstunden

Die in Abschnitt 3.3.1 vorgestellten Häufigkeitsverteilungen wurden auch dazu genutzt, um entsprechend dem in Abschnitt 3.2.4.2 mit Gl. (43) formulierten Rechenverfahren Heizgradstunden zu errechnen, und zwar für Raumtemperaturen von 15°C , 35° und 55°C (siehe Abschnitt 4.3.1). Diese sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Ein Vergleich mit den Werten, die aus den tabellierten Heizgradtagen für München (3600 Kd/Jahr) und Hamburg (3400 Kd/Jahr) für die Raumtemperatur von 15°C errechnet wurden (letzte Spalte der Tabelle) zeigt eine gute Übereinstimmung.

Tabelle 1: Heizgradstunden (in K h/Jahr) bei unterschiedlichen Raumtemperaturen für verschiedene Standorte

Standort	berechnet nach Gl. (43) für ϑ_i			berechnet für 15°C aus tabellierten Heizgradstunden
	15°C	35°C	55°C	
Oberstdorf	84 720	254 010	429 370	-
München	69 890	232 690	411 990	72 580
Hamburg	64 900	233 680	409 030	69 140

4. BERECHNUNGSBEISPIELE

4.1 Wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen

4.1.1 Problemstellung

Das Problem der Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zum Ausgleich der Wärmebilanzdefizite von Räumen stellt sich im Bereich der Landwirtschaft vor allem bei Ställen, in denen die Einhaltung tiergerechter Temperaturen im Winter hohe Heizkosten erfordert, wie z.B. bei Mastkälberställen. Durch die in den letzten Jahren gestiegenen Energiekosten wurde vielfach sogar die Wirtschaftlichkeit der Produktion in Frage gestellt.

Eine Lösung dieses Energie- bzw. Wirtschaftlichkeitsproblems suchen die meisten Landwirte in einer Verbesserung der Wärmedämmung der Stallhülle. Es ist dies eine naheliegende Lösung, weil es sich bei den Wärmedämm-Maßnahmen um auch im landwirtschaftlichen Bereich bewährte Techniken handelt, während sich die andere Alternative Wärmerückgewinnung in Bezug auf ihre Einsatzmöglichkeiten in Ställen noch im Entwicklungsstadium befindet. Diesen Gegebenheiten in der Praxis entsprechend wird in diesem Abschnitt zunächst untersucht, wie sich der Wärmebilanzausgleich eines Stalles (d.h. eines belüfteten Raumes) wirtschaftlich optimieren läßt, wenn nur die Wärmedämmung und Heizung in Betracht zu ziehen sind. In Abschnitt 4.2 erfolgt dann die Erweiterung der erarbeiteten Rechenverfahren durch Einbeziehung der Rückgewinnung von Lüftungswärme.

Die Anwendung von Wärmedämm-Maßnahmen zum Ausgleich der Wärmebilanzdefizite von Ställen führt zu der Fragestellung nach den wirtschaftlich sinnvollen mittleren k -Werten der Stallhülle bzw. Dämmschichtdicken. Die Beantwortung macht eine wirtschaftliche Optimierung entsprechend Abschnitt 3.2 notwendig. Diese führt zu EDV-Rechenprogrammen, mit denen sich die wirtschaftlich optimalen k -Werte über die minimalen Jahreskosten errechnen lassen. Die Entwicklung dieser Rechenprogramme wird im Abschnitt 4.1.3 dargestellt. Es erfolgt dann in Abschnitt 4.1.4 eine Analyse der Auswirkung einzelner Einflußgrößen auf die minimalen Jahreskosten, um die Haupt-Einflußgrößen ermitteln zu können.

4.1.2 Literaturübersicht

Die meisten Veröffentlichungen zur Wirtschaftlichkeit von Wärmedämm-Maßnahmen bei Ställen befassen sich mit Einzelobjekten. Eine Schrifttumsdurchsicht führte zu nur zwei Arbeiten, in denen ein allgemeingültiges Rechenverfahren angestrebt wird. So stellten NILSSON und SÄLLVIK [22] in einer umfangreichen Arbeit u.a. ein Verfahren vor, mit dem sich Dämmschichtdicken so auswählen lassen, daß unter gegebenen Bedingungen ein Maximum an Energie eingespart wird. Als Wirtschaftlichkeitsmaßstab dient der interne Zinssatz. Über ihn werden verschiedene Wand- und Deckenkonstruktionen mit einer Null-Alternative verglichen. Die Möglichkeit von Energiepreissteigerungen ist im Rechenverfahren berücksichtigt, eine analytische Darstellung des Problems und der Rechenmethode fehlt.

Das von CHRISTIANSON und HELICKSON [4] entwickelte Rechenverfahren und EDV-Programm ist konsequenter, erfaßt allerdings ebenfalls nicht alle Einflußgrößen in analytischer Darstellung. Es beruht auf einer stündlichen Energiebilanzierung und berücksichtigt dabei den Wärme- und Wasserdampfanzug der Tiere, den Wärmegewinn durch die Sonneneinstrahlung, den Austausch von Transmissions- und Lüftungswärme sowie die in den Baustoffen der Stallhülle gespeicherte Wärme. In einem besonderen Rechenverfahren wird die wirtschaftlich optimale Dämmschichtdicken-Verteilung der Stallhüllen-Bauelemente iterativ ermittelt. Die analytische Darstellung dieses Optimierungsverfahrens und auch der wirtschaftlichen Optimierung der Wärmedämmung fehlt. Energiepreissteigerungen sind nicht berücksichtigt. Aus einem Rechenbeispiel wird deutlich, daß die Heizung und Wärmedämmung bei den Überlegungen zur optimalen Kontrolle des Stallklimas vorrangig zu beachten sind. Die Einsparung an Heizkosten durch den Wärmegewinn infolge der Sonneneinstrahlung liegt bei etwa 1,5 % der Gesamtkosten. Dieses Ergebnis dürfte damit zu erklären sein, daß die Lüftungswärmeverluste mehr als 2/3 der Gesamtwärmeverluste ausmachen (siehe Abschnitt 4.2.1) und daß die Sonnenstrahlung im Winter nur in geringem Maße die Energiebilanz positiv beeinflusst. Der von der Sonne zugeführte Wärmestrom wird daher bei den weiteren Betrachtungen vernachlässigt.

4.1.3 Rechenmodell für die wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen

4.1.3.1 Optimierungsgleichung

Die Optimierungsgleichung (47) vereinfacht sich für den Fall des Ausgleiches von Wärmebilanzdefiziten mit Wärmedämmung und Heizung zu:

$$\dot{K}_{\text{ges}}(k_m) = a_N K_{I,WD,\min}(k_m) + \frac{a_N}{a'_N} K'_E [-\Delta E(k_m)] \quad (52)$$

Dabei wurde angenommen, daß für die Instandhaltung der Wärmedämmkonstruktionen und der Heizung keine Kosten anfallen (s. 3.2.5.1). Die Gl. (4), (9), (16), (17), (22) und (40) ergeben dann mit Gl. (52) die explizite Darstellung der Optimierungsgleichung:

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\text{ges}}(k_m) = & a_N K_{I,WD,\min}(k_m) - \frac{1}{2} \frac{a_N}{a'_N} K'_E \sum_{n=0}^{m_t} t(\vartheta_{a,n}) \cdot \\ & \cdot [\Delta \dot{Q}(k_m, \vartheta_{a,n}) + \Delta \dot{Q}(k_m, \vartheta_{a,n+1})] \end{aligned} \quad (53)$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta \dot{Q}(k_m, \vartheta_a) = & \dot{Q}_i + \dot{Q}_{LZ}(\vartheta_a) - \dot{Q}_{LA} - \dot{Q}_T(k_m, \vartheta_a) \\ = & \dot{Q}_i + \dot{V}_L \left[\frac{q_i}{q_a(\vartheta_a)} h_a(\vartheta_a) - h_i \right] - k_m A_{\text{ges}}(\vartheta_i - \vartheta_a) \end{aligned} \quad (54)$$

$$a_N = \frac{q^N(q-1)}{q^N - 1}$$

$$a'_N = \frac{\Upsilon(q/\Upsilon)^N [(q/\Upsilon) - 1]}{(q/\Upsilon)^N - 1}$$

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{Ti} = n q_{Ti} \quad (55)$$

n Zahl der Tiere

q_{Ti} von einem Tier ausgehender Wärmestrom

Die Rechenwerte Q_i und h_i lassen sich für die Temperatur ϑ_i und relative Feuchte φ_i , die entsprechend der Belegung des Stalles als konstante Größen vorgegeben werden (siehe Abschnitt 4.1.4), nach den Gl. (18) bzw. (18b) berechnen, ebenso die Q_a -, h_a -Werte für die jeweilige Außentemperatur.

Sind in einem Stall verschiedene Tierarten und -altersgruppen (Summationsindex j), so gilt

$$\dot{Q}_{Ti} = \sum_j n_j q_{Ti,j} \quad (56)$$

$$\dot{V}_L = \sum_j n_j \dot{v}_{L,j} \quad (57)$$

mit

n_j Zahl der Tiere von der Art bzw. Altersgruppe j

$q_{Ti,j}$ von einem Tier ausgehender Wärmestrom (Wärmeanfall)

$\dot{v}_{L,j}$ für ein Tier erforderlicher Lüftungs-Volumenstrom

In diesem Belegfall werden sich dann die Rechenwerte für die Temperatur und relative Feuchte im Stall i.a. nach der Tierart mit größter Belegzahl richten oder eine mittlere Temperatur und relative Feuchte angeben.

4.1.3.2 Lüftungsmodelle zur Festlegung der Lüftungs-Volumenströme

Wie schon in Abschnitt 3.2.2.3 gesagt, ist der Volumenstrom $\dot{V}_L$ eine durch die Nutzung des Raumes festgelegte Größe. Die Lüftungsanlage muß entsprechend den im Raum erforderlichen Betriebsbedingungen ausgelegt und steuerbar sein. Bei einem Stall kommt es darauf an, die Volumenströme so zu regulieren, daß unzulässige Schadgaskonzentrationen verhindert werden und daß keine Schäden durch

unzulässig hohe relative Feuchten entstehen.

In der DIN 18910 [38] wird versucht, diesen Anforderungen mit einem Lüftungsmodell gerecht zu werden, das folgende Volumenströme beinhaltet:

$$\dot{V}_L^{\text{Winter}} = \frac{\sum_j n_j k_{Ti,j}}{x_i - \frac{\rho_i}{\rho_a} x_a (\vartheta_{a,R})} \quad (58)$$

$$\dot{V}_L^{CO_2} = \frac{\sum_j n_j k_{Ti,j}}{3.2} \quad (59)$$

$$\dot{V}_L^{\text{Sommer}} = \frac{\dot{Q}_{Ti}}{0.9 \Delta T'} \quad (60)$$

mit

$w_{Ti,j}$	Wasserdampf-Massenstrom je Tier (Wasserdampfanfall)
$k_{Ti,j}$	Kohlendioxid-Volumenstrom je Tier (Kohlendioxidanfall)
$\dot{V}_L^{\text{Winter}}$	Mindest-Volumenstrom im Winter (zum Ausgleich des Wasserdampfhaushaltes bei $\vartheta_{a,R}$)
$\dot{V}_L^{CO_2}$	Volumenstrom zum Ausgleich des Kohlendioxid-Haushaltes
$\dot{V}_L^{\text{Sommer}}$	Mindest-Volumenstrom im Sommer
$x_{i(a)}$	Feuchte der Stalluft bzw. Außenraumlufte (Berechnung mit Gl. (18a))
$\vartheta_{a,R}$	standortabhängiger Rechenwert für die Temperatur im Außenraum (in DIN 18910 nach Klimazonen festgelegt)
$\Delta T'$	Zielgröße für den Temperaturunterschied zwischen Stall und Außenraum für Rinderställe: $\Delta T' = 3K$ Sommertemperaturzone $\geq 26^\circ C$ $= 4K$ Sommertemperaturzone $< 26^\circ C$

Für den Winter gilt folgende Festlegung:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L (\vartheta_a) &= \dot{V}_L^{\text{Winter}} \quad \text{für} \quad \dot{V}_L^{\text{Winter}} \geq \dot{V}_L^{\text{CO}_2} \\ &= \dot{V}_L^{\text{CO}_2} \quad \text{für} \quad \dot{V}_L^{\text{Winter}} < \dot{V}_L^{\text{CO}_2} \end{aligned} \quad (61)$$

In der DIN ist nicht festgelegt, mit welchen Volumenströmen in der Übergangszeit zwischen Winter und Sommer zu lüften ist. In der Praxis wird die Lüftung in dieser Zeit über einen Thermostaten gesteuert, d.h. im Zeitmittel ist der Volumenstrom so eingestellt, daß die Wärmebilanz des Stalles ausgeglichen bleibt (Volumenstrom zum Ausgleich der Wärmebilanz: $\dot{V}_L^{\text{WB}}$). Dieser Zeitraum trägt damit aber nicht mehr zu dem jährlichen Wärmeenergiedefizit bei.

Da der konstante Winter-Volumenstrom des Lüftungsmodells der DIN 18910 nicht bei allen Belegarten eines Stalles (z.B. nicht beim Mastkälberstall) ausreicht, um den Wasserdampfhaushalt bei etwas höheren Temperaturen ausgeglichen zu halten, entspricht das von LEUSCHNER [20] verwendete Lüftungsmodell den Anforderungen an das Stallklima besser. LEUSCHNER schlägt die Steuerung der Lüftungsanlage über Feuchtefühler vor. Der Lüftungsvolumenstrom wird also so eingestellt, daß der Wasserdampfhaushalt ausgeglichen bleibt:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L (\vartheta_a) &= \dot{V}_L^{\text{H}_2\text{O}} (\vartheta_a) \\ &= \frac{\sum_j n_j w_{\text{Ti},j}}{x_i - \frac{\rho_i}{\rho_a} x_a (\vartheta_a)} \end{aligned} \quad (62)$$

Die Stalltemperatur wird mit einem Thermostaten konstant gehalten, der die eventuell zuzuführende Heizleistung steuert.

Wie sich die verschiedenen Lüftungs-Volumenströme dieser beiden Modelle mit der Außentemperatur verändern, zeigt Bild 2 für die Belegung eines Stalles (Fläche der Stallhülle: 630 m², mittlerer k-Wert: 0.8 W/m²K) mit Milchkühen und Mastkälbern. Dabei wurde mit

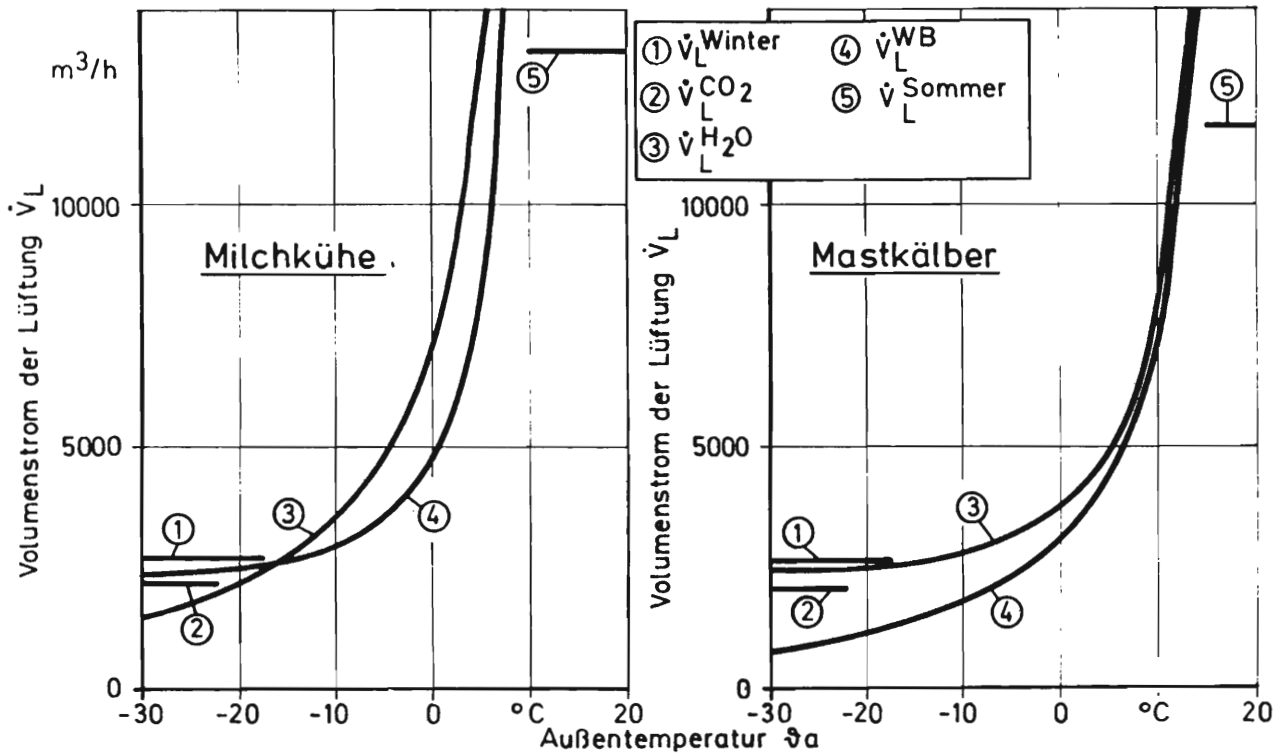


Bild 2: Veränderung der Lüftungs-Volumenströme mit der Außentemperatur

den in der Tabelle 4 des Abschnitts 4.1.4.2 zusammengefaßten Kennwerten für die Belegart und mit $\varphi_a = 80 \%$ gerechnet. Aus Bild 2 ist ersichtlich, daß die Wärmebilanz bei der Lüftungssteuerung nach dem Wasserdampfhaushalt im Falle des Milchviehstalles bei Temperaturen ab -16°C ausgeglichen ist ($\dot{V}_L^{\text{WB}} \geq \dot{V}_L^{\text{H}_2\text{O}}$). Beim Mastkälberstall bleibt selbst bei der Temperatur von $+12^\circ\text{C}$ ein Bilanzdefizit.

Die Werte der Tabelle 2 lassen erkennen, daß sich die nach Gl. (40) errechenbaren jährlichen Wärmeenergie-defizite deutlich unterscheiden, wenn man mit beiden Lüftungsmodellen rechnet. Der Unterschied wird sich allerdings im Falle der Belegung mit Milchkühen auf die

Tabelle 2: Vergleich des jährlichen Wärmeenergiedefizits eines Milchvieh- und eines Mastkälberstalles bei Lüftung nach DIN 18910 und bei Lüftungssteuerung zum Ausgleich des Wasserdampfhaushaltes $A = 630 \text{ m}^2$, $k_m = 0.8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, Standort München

Belegart	Jährliches Wärmeenergiedefizit (MWh/Jahr) bei Lüftungssteuerung nach	
	der DIN 18910	dem Wasserdampfhaushalt
Milchkühe	0.16	0.06
Mastkälber	7.45	27.45

jährlichen Gesamtkosten für den Ausgleich des Energiedefizits nur sehr wenig, bei den Mastkälbern aber stark auswirken.

Bei den weiteren Berechnungen, und damit auch bei den in Abschnitt 4.1.3.3 dargestellten EDV-Rechenprogrammen, wird das mit den Bedingungen (62) definierte Lüftungsmodell verwendet.

4.1.3.3 EDV-Rechenprogramme zur Ermittlung minimaler Jahreskosten und wirtschaftlich optimaler k -Werte

Für das gesamte Rechenverfahren zur wirtschaftlichen Optimierung der Wärmedämmung von Ställen wurden zwei EDV-Programme erstellt, die jeweils Wärmedämm-Maßnahmen in zwei Bauelementen einbeziehen und sich darin unterscheiden, wie die minimale Gesamtinvestition $K_{I,WD,min} (k_m)$ errechnet wird.

Die Struktur des EDV-Programmes WAEDAM [39] ist aus Bild 3 zu sehen. Die minimale Gesamtinvestition wird nach dem in Abschnitt 3.2.3.2.3 beschriebenen Rechen- und Vergleichsverfahren ermittelt, wobei sich der k_m -Wert in folgenden Stufen verändert:

2	$\Rightarrow$	$k_m > 1$	$\Delta k_m = 0.0200$
1	$\Rightarrow$	$k_m > 0.5$	$\Delta k_m = 0.0100$
0.5	$\Rightarrow$	$k_m > 0.35$	$\Delta k_m = 0.0020$
0.35	$\Rightarrow$	$k_m > 0.25$	$\Delta k_m = 0.0010$
0.25	$\Rightarrow$	$k_m > 0.20$	$\Delta k_m = 0.0005$

Die mit abnehmendem k-Wert verfeinerte Abstufung ist erforderlich, da die Investitionen für die Wärmedämmung mit abnehmendem k-Wert sehr stark zunehmen.

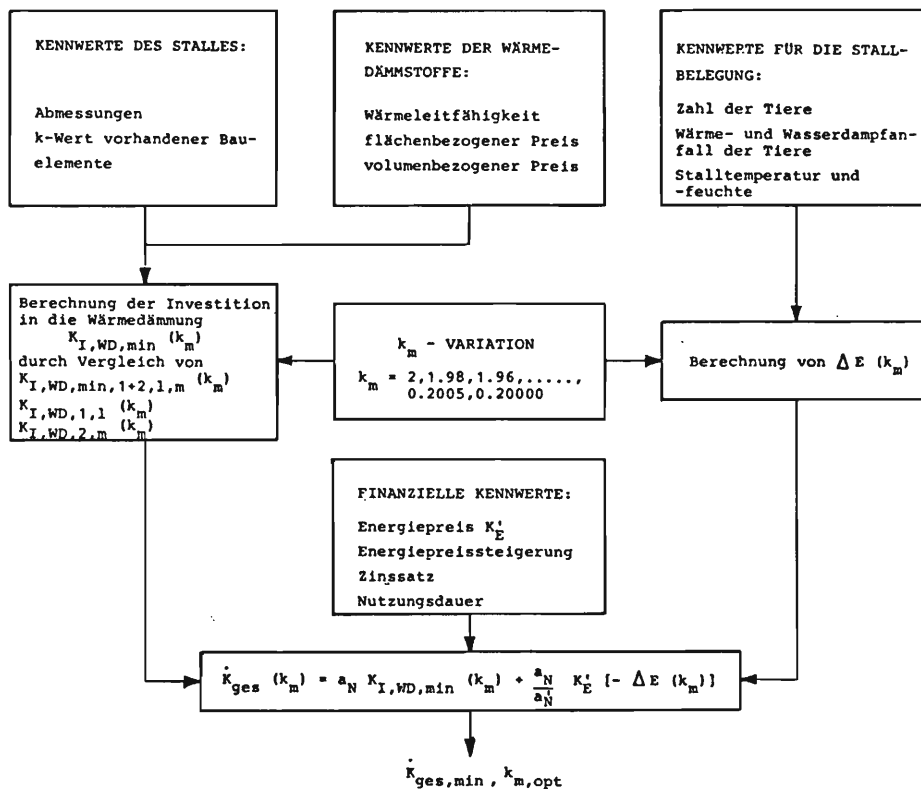


Bild 3: Struktur des EDV-Programmes WAEDAM

Bei dem für die folgenden Berechnungen verwendeten Rechenprogramm WAEDOP [40] wurde berücksichtigt, daß sich die Dämmschichtdicken i.a. nicht beliebig, sondern nur zentimeterweise verändern lassen, wie z.B. bei plattenförmigen Wärmedämmstoffen. Es wurden daher für kombinierte Wärmedämm-Maßnahmen in beiden Bauelementen sowie für Maßnahmen in jedem der Bauelemente einzeln über die k_m -Werte sowie die davon abhängigen Investitionen und Energiekosten die jährlichen Gesamtkosten bei schrittweiser Veränderung der Dämmschichtdicken im Bereich 3-100 cm (Schrittgröße: 1 cm) berechnet. Der Minimalwert der jährlichen Gesamtkosten ergibt dann den wirtschaftlich optimalen k-Wert sowie die zugeordneten Dämmschichtdicken. Die Struktur des Programmes WAEDOP zeigt Bild 4.

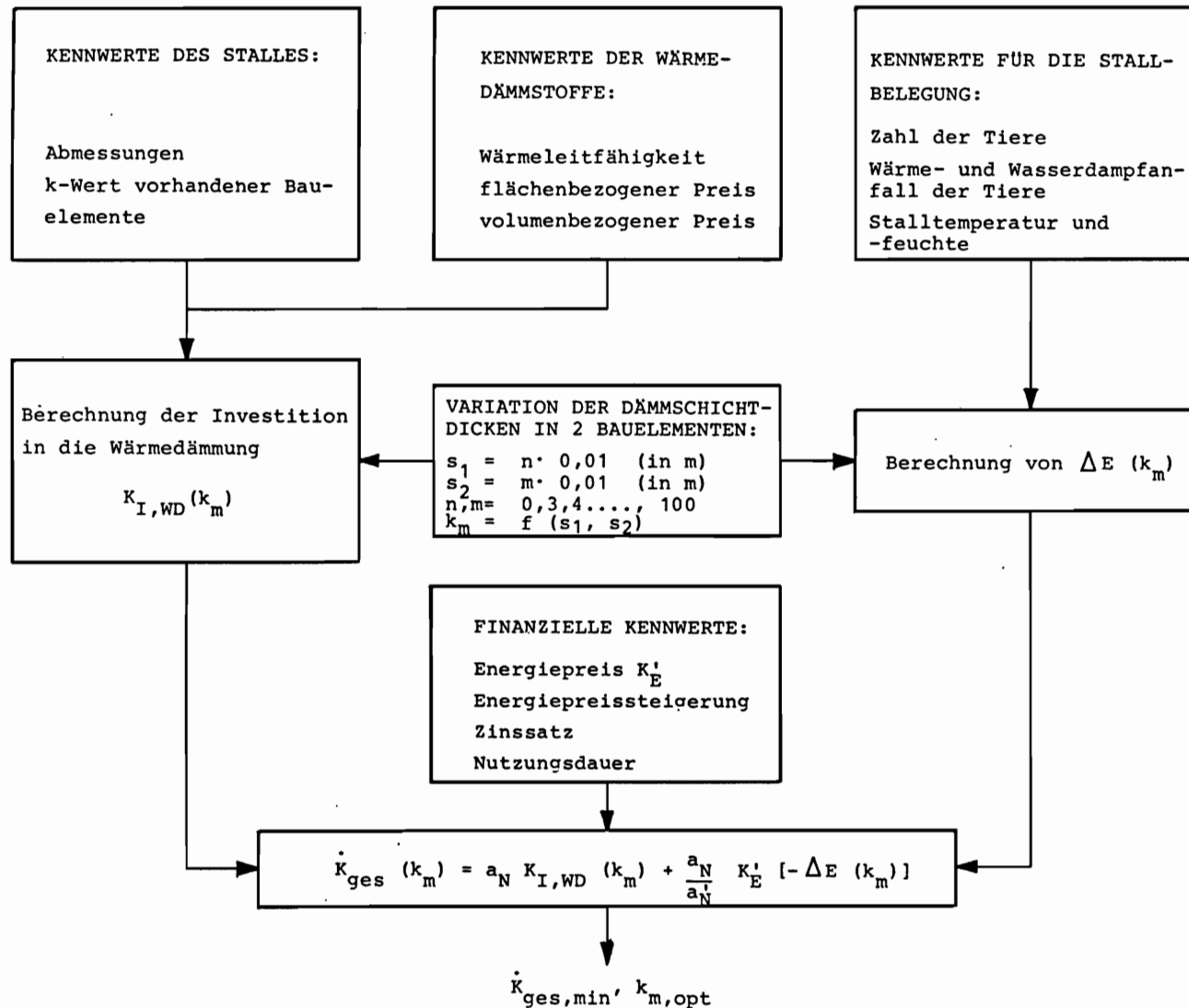


Bild 4: Struktur des EDV-Programmes WAEDOP

4.1.4 Untersuchung der Auswirkung verschiedener Einflußgrößen auf die minimalen jährlichen Gesamtkosten

4.1.4.1 Rechenwerte

Die Berechnungen zur Auswirkung verschiedener Einflußgrößen auf die minimalen Jahreskosten, und damit auf die Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung, erfolgten für einen Modellstall mit den Innenabmessungen 30 x 12.5 x 3 m. Ausgegangen wurde im Deckenbereich von einer Holzbalkendecke mit Bretterboden im Dachraum. Im Wandbereich war ein 24 cm dickes Mauerwerk aus Lochziegeln der Rohdichteklasse 1 200 kg/m³ vorhanden. Der weitere Aufbau und die Werte der Flächen sowie der Wärmedurchgangskoeffizienten des Modellstalles sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Aufbau und Rechenwerte des Modellstalles mit den Außenabmessungen 30 m x 12.5 x 3 m

Bauelement	Aufbau	Fläche A m ²	Wärmedurchgangskoeffizient k_o W/(m ² K)
Decke	Holzbalkendecke mit Bretterboden im Dachraum	375	2.2
Wand	24 cm Mauerwerk aus Lochziegeln der Rohdichteklasse 1 200 kg/m ³ , $\lambda_R = 0.52$ W/(mK); 1,5 cm Innenputz, $\lambda_R = 0.87$ W/(mK)	192.5	1.45
Fenster	16 mm dicke Plexiglas-Stegdoppelplatten $k=3.2$ W/(m ² K)	37.5	3.2
Tore	4 cm Polystyrol-Partikelschaum $\lambda_R=0.04$ W/(mK); 2x1,2 cm Sperrholz, $\lambda_R=0.14$ W/(mK)	25	0.72
	Werte für die Gesamtfläche	630	1.97

Werte für λ_R nach DIN 4108

$\alpha_i = 6$ W/(m²K); $\alpha_a = 23$ W/(m²K) bei Wand und Toren; $\alpha_a = 12$ W/(m²K) bei der Decke

Als Wärmedämmkonstruktionen wurden in die Untersuchung einbezogen (siehe Bild 5 und 6):

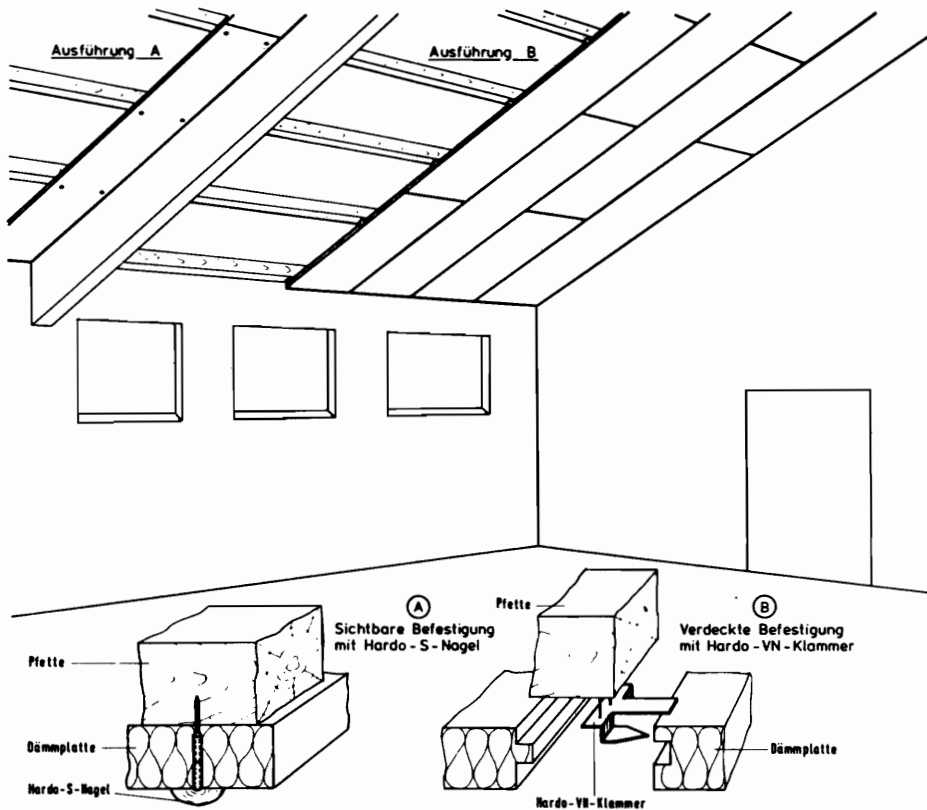


Bild 5: Wärmedämmung im Dachdeckenbereich mit Platten aus Polystyrol-Extruderschaum

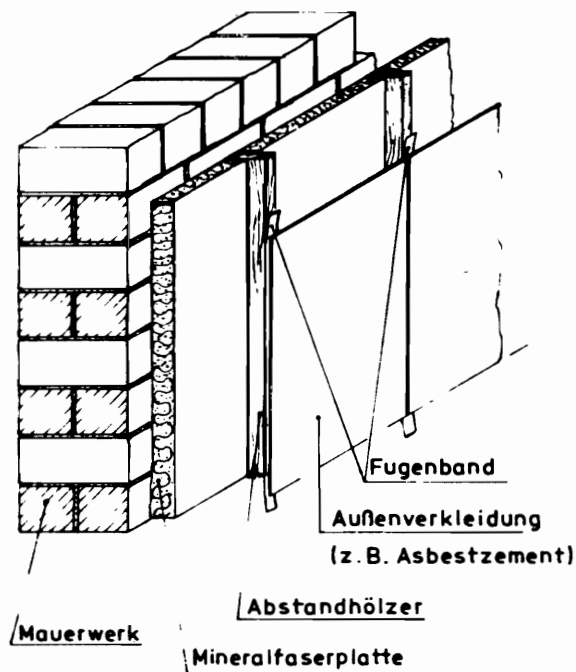


Bild 6: Außendämmung von Mauerwerk mit Mineralfaserplatten

Decke: Polystyrol-Extruderschaum als Wärmedämmstoff
 $\lambda = 0.035 \text{ W/(mK)}$

$$K_{I,WD}^* = 2.00 \text{ DM/m}^2 \text{ (für Befestigungsmaterial)}$$

$$K_{I,WD}^{**} = 420.00 \text{ DM/m}^3$$

Wand: Holzverschalung (überluchte Schalung) als Außen-
verkleidung, Mineralfaserplatten als Wärmedämmstoff
 $\lambda = 0.040 \text{ W/(mK)}$

$$K_{I,WD}^* = 10.00 \text{ DM/m}^2$$

$$K_{I,WD}^{**} = 460.00 \text{ DM/m}^3$$

Der flächenabhängige Teilbetrag der Investition enthält nur den Materialaufwand.

Planungs-Rechenwerte (d.h. Durchschnittswerte für Zeiträume in der Größenordnung der Nutzungsdauer von Ställen) für die Kenngrößen der Belegung des Stalles sind in DIN 18910 zusammengestellt. Die Werte für die Produktion von sensibler Wärme und von Schadgasen verändern sich mit der Tiermasse, wie in Bild 7 zu erkennen ist. Sie sind darüber hinaus von der Stalltemperatur abhängig (s.u.).

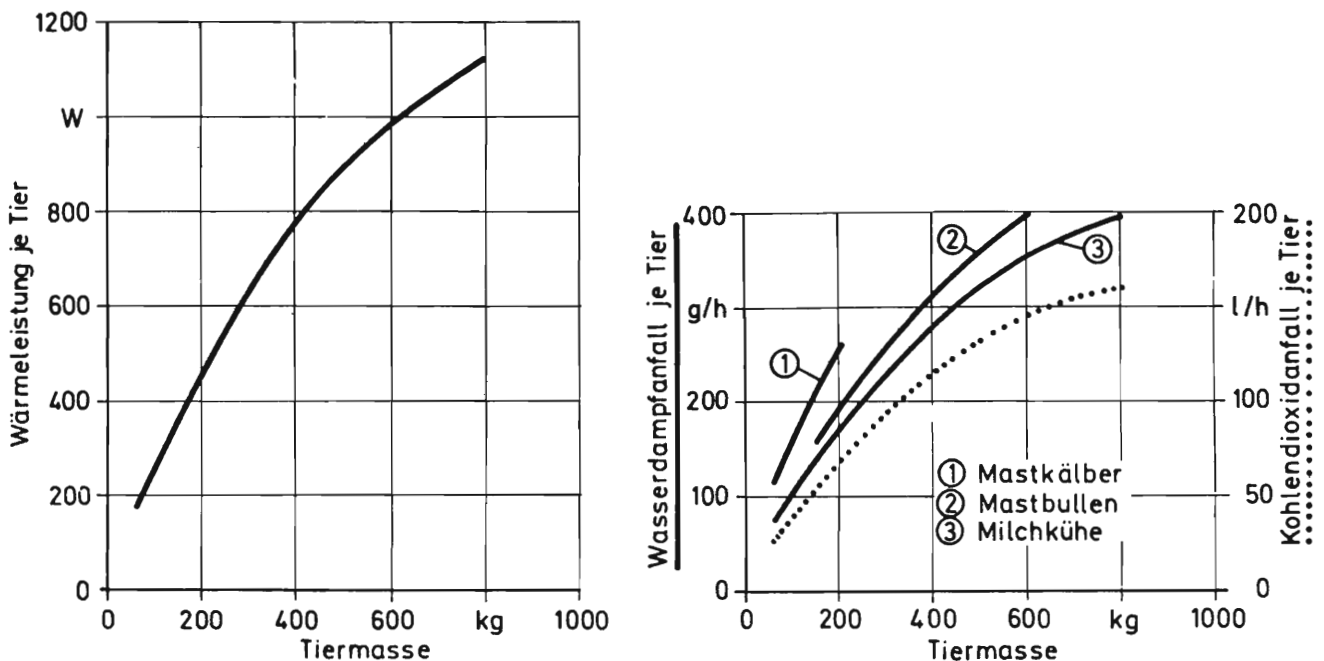


Bild 7: Rechenwerte für die Wärmeleistung, den Wasserdampf- und Kohlendioxidanfall von Rindern (nach DIN 18910)

Die Rechenwerte, mit denen zunächst die Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanzausgleiches bei unterschiedlicher Belegung des Modellstalles ermittelt werden sollten, enthält Tabelle 4. Für die Belegung mit Milchkühen, Mastbullen und Mastkälbern sind angegeben: Anzahl der Tiere, Tiermasse, die von der Tierhaltung aus gesehen optimalen Stalltemperaturen und -feuchten sowie die für diese Temperaturen geltenden Werte der DIN 18910 für den Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidanfall der Tiere. Aufgenommen sind auch die Werte für den temperaturunabhängigen Grundwert der Gesamtwärmeabgabe, die sogenannte unkorrigierte Gesamtwärmeabgabe, nach STRØM und FEENSTRA [30].

Bei der Untersuchung, wie sich Veränderungen der Stalltemperatur auf die minimalen Jahreskosten auswirken, wurden der Wärme- und Wasserdampfanfall nach folgenden, in [30] angegebenen Gleichungen berechnet:

$$q_{Ti,ges}(\vartheta_i) = f_1(\vartheta_i) q_{Ti,ges,o} \quad (63)$$

$$\begin{aligned} q_{Ti,sens}(\vartheta_i) &= f_2(\vartheta_i) q_{Ti,ges}(\vartheta_i) \\ &= f_1(\vartheta_i) f_2(\vartheta_i) q_{Ti,ges,o} \end{aligned} \quad (64)$$

$$\begin{aligned} q_{Ti,lat}(\vartheta_i) &= q_{Ti,ges}(\vartheta_i) - q_{Ti,sens}(\vartheta_i) \\ &= f_1(\vartheta_i) [1 - f_2(\vartheta_i)] q_{Ti,ges,o} \end{aligned}$$

$$w_{Ti}(\vartheta_i) = \frac{q_{Ti,lat}(\vartheta_i)}{0.68} = 1.47 f_1(\vartheta_i) [1 - f_2(\vartheta_i)] q_{Ti,ges,o} \quad (65)$$

mit

$$\begin{aligned} f_1(\vartheta_i) &= 1 + 10^{-5} (-\vartheta_i + 20)^3 \\ f_2(\vartheta_i) &= 0.8 - 1.85 \cdot 10^{-7} (\vartheta_i + 10)^4 \end{aligned} \quad (66)$$

Tabelle 4: Rechenwerte bei unterschiedlicher Nutzung des Modellstalles

Art der Stallnutzung	Anzahl der Tiere	Tiermasse	Rechenwerte nach DIN 18910					unkorrigierte Gesamtwärmeleistung je Tier		Wasserdampf-anfall
			Stalltemperatur	rel. Feuchte der Stallluft	Wärmeleistung je Tier	Wasserdampf-anfall je Tier	Kohlen-dioxidanfall je Tier	nach STRØM	berechnet	berechnet
			φ_i	ϑ_i	q_{Ti}	w_{Ti}	k_{Ti}			
		kg	°C	%	W	g/h	l/h	W	W	g/h
Milchkühe (ohne Nachzucht)	48	600	10	80	986	356	146	1 242	1 267	555
Mastbullen	100	400	16	80	766	314	116	724	1 070	626
Mastkälber	160	100	18	70	261	159	41	228	380	255

$q_{Ti,ges}$	Gesamtwärmeabgabe pro Tier
$q_{Ti,ges,o}$	unkorrigierte Gesamtwärmeabgabe pro Tier
$q_{Ti,sens}$	Abgabe von sensibler Wärme pro Tier
$q_{Ti,lat}$	Abgabe von latenter Wärme pro Tier

Mit den Gl. (63) und (64) lassen sich die ebenfalls in Tabelle 4 angegebenen unkorrigierten Gesamtwärmeabgaben aus den Werten der DIN 18910 errechnen. Mit der Gl. (65) erhält man dann die zugehörigen Werte des Wasserdampfanfalls. Ein Vergleich dieser Werte mit den Werten der DIN 18910 und der errechneten Gesamtwärmeabgaben mit den in [30] angegebenen Werten weist auf die Problematik praxisrelevanter Rechenwerte hin (s. z.B. [1, 13]).

Die Veränderung des Wärme- und Wasserdampfanfalles mit der Temperatur zeigt Bild 8 für das Beispiel von Mastkälbern. Die Berech-

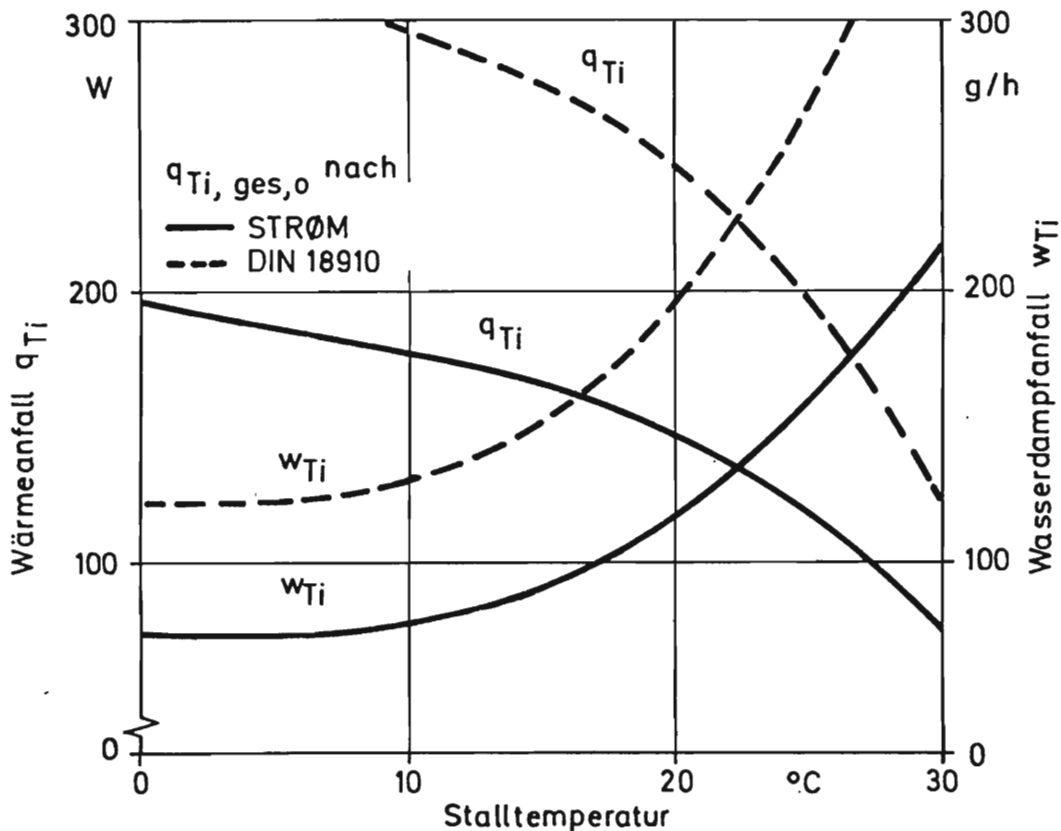


Bild 8: Wärme- und Wasserdampfanfall von Mastkälbern (Masse: 100 kg) in Abhängigkeit von der Temperatur

nungen erfolgten mit den Werten für die unkorrigierte Gesamtwärmeabgabe nach [30] und nach DIN 18910. Bei den Untersuchungen zum Einfluß der Stalltemperatur wird der DIN-Wert verwendet.

Als Ausgangswerte für die finanziellen Kenngrößen dienten:

$K'_E = 7.5 \cdot 10^{-5} \text{ DM/Wh}$ (dieser Wert entspricht ungefähr dem jetzigen Preis für Heizenergie)

$i = 5 \text{ \%/Jahr}$

$j = 10 \text{ \%/Jahr}$

$N = 20 \text{ Jahre}$

==

4.1.4.2 Minimale Jahreskosten bei unterschiedlicher Belegung und für verschiedene Standorte

Wie sich die Nutzungsart des Modellstalles auf die minimalen Jahreskosten auswirkt, zeigt die Tabelle 5 für die Belegung mit Milchkühen, Mastbullen und Mastkälbern. Die Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung gelten für den Standort München.

Die für den Bilanzausgleich notwendigen Jahreskosten sind beim Mastkälberstall um etwa das 10-fache höher als bei der Belegung mit Milchkühen und Mastbullen. Die Erklärung dafür geben die in der Tabelle 6 zusammengestellten Anteile des Lüftungswärmeverlustes am Wärmeeintrag der Tiere bei Veränderung der Außentemperatur. Bis zu einer Außentemperatur von etwa -7°C reicht die von den Mastkälbern erzeugte Wärme nicht einmal aus, um die Lüftungswärmeverluste auszugleichen, während die Milchkühe selbst bei -30°C noch mehr Wärme produzieren als über die Lüftung verlorengeht. Es entsteht also beim Mastkälberstall ein hoher zusätzlicher Energiebedarf zum Ausgleich der Wärmebilanzdefizite. Die weiteren Berechnungen erfolgen für diese energieintensive Nutzungsart des Stalles, da sich die verschiedenen zu untersuchenden Einflußgrößen hier besonders deutlich auswirken.

Der Einfluß des Außenklimas wird in den Ergebnissen der Tabelle 7 für die Standorte Oberstdorf, München und Hamburg erkennbar. Es ergeben sich Veränderungen in den jährlichen Gesamtkosten in der Größenordnung von 25 %. Die auf die Jahreskosten im Klimaraum

Tabelle 5: Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanzausgleichs durch Wärmedämmung und Heizung bei Belegung des Modellstalls mit Milchkühen, Mastbullen und Mastkälbern
Standort: München

Kenngröße	Kennwerte bei Belegung mit		
	Milchkühen	Mastbullen	Mastkälbern
JAHRESKOSTEN in DM/Jahr			
Gesamt	525.95	464.52	5 201.73
Investition in die Wärmedämmung	439.33	439.33	2 315.40
Heizenergie	86.62	25.19	2 886.33
INVESTITIONSKAPITAL in DM			
Gesamt	5 475.00	5 475.00	28 855.00
Wärmedämmung - Decke	5 475.00	5 475.00	18 075.00
- Wand	0.00	0.00	10 780.00
k-WERT in $W/(m^2K)$			
Gesamt	1.116	1.116	0.480
Decke	0.762	0.762	0.278
Wand	1.450	1.450	0.314
DÄMMSCHICHTDICKE in m			
Decke	0.03	0.03	0.11
Wand	0.00	0.00	0.10

Tabelle 6: Prozentualer Anteil des Lüftungswärmeverlustes am Wärmeeintrag der Tiere bei verschiedenen Außentemperaturen
Belegung mit Milchkühen und Mastkälbern

Außentemperatur	$(\dot{Q}_{LA} - \dot{Q}_{LZ}) / \dot{Q}_{Ti}$	
	Milchkühe	Mastkälber
°C	%	
- 30	90.9	131.9
- 25	84.1	123.8
- 20	77.8	116.6
- 15	72.1	109.7
- 10	66.8	103.7
- 5	62.3	98.7
0	59.0	95.3
5	55.1	92.4

Tabelle 7: Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanzausgleichs durch Wärmedämmung und Heizung an unterschiedlichen Standorten

Mastkälberstall

Kenngröße	Kennwerte für den Standort		
	Oberstdorf	München	Hamburg
JAHRESKOSTEN in DM/Jahr			
Gesamt	6 148.49	5 201.73	4.621.22
Investition in die Wärmedämmung	2 512.84	2 315.40	2 315.40
Heizenergie	3 635.65	2 886.33	2 305.82
INVESTITIONSKAPITAL in DM			
Gesamt	31 315.50	28 855.00	28 855.00
Wärmedämmung - Decke	19 650.00	18 075.00	18 075.00
- Wand	11 665.50	10 780.00	10 780.00
k-WERT in $W/(m^2K)$			
Gesamt	0.461	0.480	0.480
Decke	0.258	0.278	0.278
Wand	0.291	0.314	0.314
DÄMMSCHICHTDICKE in M			
Decke	0.12	0.11	0.11
Wand	0.11	0.10	0.10

Oberstdorf bezogenen jährlichen Gesamtkosten betragen in

München: 84.6 %,

Hamburg: 75.2 %.

Der errechnete mittlere k-Wert entspricht in etwa den heute in der Praxis empfohlenen Werten. Es bleibt zu untersuchen, ob sich diese k-Werte z.B. durch Verbesserungen der Wärmedämmung im Fensterbereich oder durch Flächenveränderungen mit geringeren Gesamtkosten erreichen lassen.

4.1.4.3 Auswirkung verschiedener Einflußgrößen

4.1.4.3.1 Ausgewählte Einflußgrößen, Rechenwerte

In die Untersuchung zur Auswirkung von Veränderungen wichtiger Bestimmungsgrößen der Wärmebilanzgleichung auf die minimalen jährlichen Gesamtkosten wurden folgende Größen einbezogen:

betriebliche Einflußgrößen	$n, \vartheta_i, \varphi_i$
tierspezifische Einflußgrößen	q_{Ti}, w_{Ti}
finanzielle Einflußgrößen	i, j, N

Die verwendeten Rechenwerte sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Für die übrigen Einflußgrößen werden jeweils die im Abschnitt 4.1.4.1 zusammengestellten Ausgangswerte (Mastkälberstall) verwendet.

4.1.4.3.2 Veränderungen der Stalltemperatur und -feuchte

Die beachtlichen Auswirkungen von Veränderungen der Stalltemperatur und -feuchte auf die minimalen jährlichen Gesamtkosten sind an den Ergebnissen der Tabelle 9 zu ersehen.

Eine Veränderung der Stallfeuchte von 70 auf 65 % würde zu einem Kostenanstieg von fast 70 % führen, während sich bei einer Erhöhung der Feuchte auf 75 % die Kosten um 30 % verringern ließen. Es zeigt sich hier der starke Einfluß der Lüftung auf die Wärmebilanz des Stalles.

Die Auswirkung der Stalltemperatur auf die minimalen Jahreskosten ist ebenfalls bemerkenswert. Schon eine Absenkung von 18°C, dem

Tabelle 8: Rechenwerte zur Untersuchung der Auswirkung verschiedener Einflußgrößen auf die minimalen Jahreskosten

Einflußgröße	Rechenwerte	Einheit
n	80, 96, 112, 128, 144, 160, 176, 192	-
ϑ_i	0, 1, 2,, 29, 30	°C
φ_i	60, 65, 70,, 90, 95	%
q_{Ti}	$q_{Ti} = n \cdot q_{Ti,O}^*$ n = 0.5, 0.6, 0.7, 1.4, 1.5	W
w_{Ti}	$w_{Ti} = n \cdot w_{Ti,O}^*$ n = 0.5, 0.6, 0.7, 1.4, 1.5	g/h
i	1, 2, 3,, 9, 10	%/Jahr
j	0, 2.5, 5,, 17.5, 20	%/Jahr
N	5, 10, 15,, 45, 50	Jahre

*Rechenwerte der Tabelle 4

Tabelle 9: Minimale jährliche Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Stalltemperatur und -feuchte

Stalltemperatur	Min. Jahreskosten*	Stallfeuchte	Min. Jahreskosten
°C	DM/Jahr	%	DM/Jahr
0	948.74	60	12 661.80
5	1 024.12	65	8 838.11
10	1 462.89	70	5 201.73
16	4 863.30	75	3 689.01
18	9 475.11	80	2 896.02
20	16 532.61	85	2 399.26
25	46 465.23	90	2 063.43
30	91 668.98	95	1 841.16

*Rechenwerte für q_{Ti} und w_{Ti} mit den Gl. (64) und (65) in Abschnitt 4.1.4.1

Rechenwert der DIN 18910, auf 16°C würde eine Kostensenkung von etwa 50 % ergeben. Da die Temperatur von 16°C nach DIN 18910 den, von der Tierhaltung her gesehen, optimalen Temperaturbereich nach unten begrenzt, lassen sich also schon durch Ausnutzung der Toleranzbereiche die Jahreskosten deutlich verringern.

4.1.4.3.3 Veränderungen der Tierzahl sowie der tierspezifischen und finanziellen Kenngrößen

Wie sich Veränderungen der Tierzahl, des Wärme- und Wasserdampf-anfalls der Tiere sowie des Zinssatzes und der Energiepreiserhöhung auf die minimalen jährlichen Gesamtkosten auswirken, zeigt Bild 9.

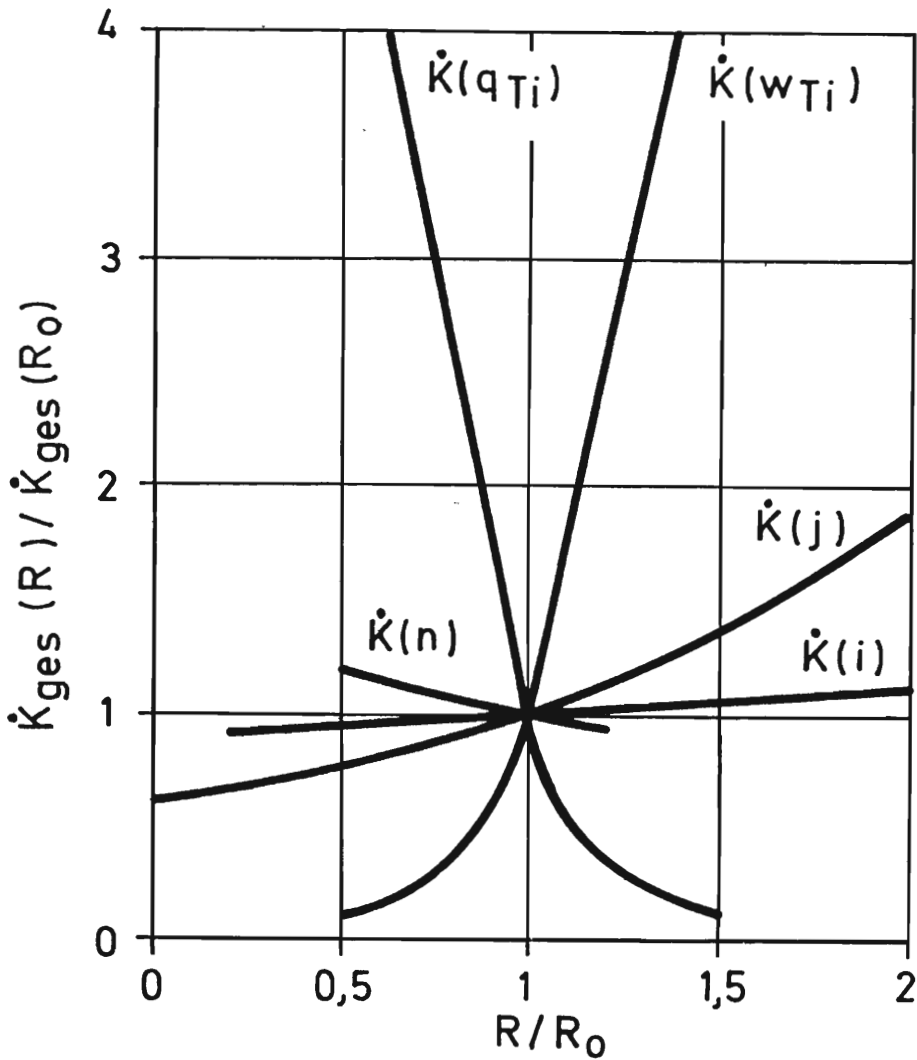


Bild 9: Minimale jährliche Gesamtkosten (bezogen auf die Kosten beim Ausgangswert R_0) bei Änderung verschiedener Einflußgrößen entsprechend dem Faktor R/R_0 ; R_0 nach Abschnitt 4.1.4.1; Belegung mit Mastkälbern; Standort: München

Bemerkenswert ist der Einfluß der beiden tierspezifischen Größen q_{Ti} und w_{Ti} . Änderungen in den Ausgangswerten dieser Größen um nur etwa 10 % bewirken Veränderungen in den minimalen Jahreskosten, die sich bei dem nächstwichtigen Einflußfaktor, der Energiepreissteigerung j , nur mit Änderungen um 100 % erreichen lassen. Dieser überragende Einfluß des Wärme- und Wasserdampfanfalls der Tiere erhält seine besondere Bedeutung dadurch, daß die in DIN 18910 festgelegten Werte für diese beiden Größen z.Zt. kontrovers diskutiert werden (siehe z.B. [1, 21]). Die vorliegende Untersuchung unterstreicht die Notwendigkeit weiterer Überprüfungen und Praxismessungen, um praxisrelevante Langzeit-Durchschnittswerte als Rechenwerte für die wirtschaftliche Optimierung des Ausgleiches von Wärmebilanzdefiziten bei Ställen zu erhalten.

Daß die Jahreskosten mit abnehmender Tierzahl n zunehmen, ist bei einem Mastkälberstall ein unerwartetes Ergebnis. Wie nämlich aus der Tabelle 10 zu ersehen ist, reicht bei der Belegung des Modellstalles mit Mastkälbern, im Gegensatz zur Belegung mit Milchkühen, die von den Tieren erzeugte Wärme bei Außentemperaturen unterhalb von etwa -5°C nicht aus, um die Wärmeverluste über die Lüftung auszugleichen. Dieses Defizit verringert sich mit abnehmender Tierzahl, da mit den Gl. (55) und (62) gilt:

$$(\Delta \dot{Q})_{Ti,L} = \dot{Q}_{Ti} - \dot{Q}_{LA} + \dot{Q}_{LZ} = n \left[q_{Ti} - \frac{w_{Ti}}{x_i - x_a} (h_i - \frac{g_i}{g_a} h_a) \right]$$

Die Zunahme der Jahreskosten mit abnehmender Tierzahl läßt sich dann nur damit erklären, daß die mit abnehmender Tierzahl zunehmende Verringerung der $(\Delta \dot{Q})_{Ti,L}$ -Überschüsse bei Außentemperaturen über etwa -5°C stärker in die Wärmeenergiebilanz eingeht als die Verringerung des Defizits bei den tieferen Außentemperaturen. Dazu muß aber die Zahl der Stunden pro Jahr mit Temperaturen zwischen -5°C und 13°C deutlich größer sein als die mit Temperaturen unterhalb -5°C . Die folgenden, mit der Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur des Abschnitts 3.3.1 für den Standort München erhaltenen Zahlenwerte zeigen, daß dies der Fall ist:

$$\vartheta_a \leq -5^{\circ}\text{C} \quad t = 541 \quad \text{Stunden/Jahr}$$

$$-5^{\circ}\text{C} < \vartheta_a < 13^{\circ}\text{C} \quad t = 5\,899 \quad \text{Stunden/Jahr}$$

Im Vergleich mit dem Zinssatz i wirkt sich die Energiepreissteigerung j deutlich stärker auf die minimalen Jahreskosten aus. Die in Bild 10 dargestellten Veränderungen der in Gl. (53) vorkommenden Faktoren a_N (Annuitätenfaktor) bzw. a_N/a'_N in Abhängigkeit vom Zinssatz und von der Energiepreissteigerung geben dafür die Erklärung. Die Abnahme des Faktors a_N/a'_N mit zunehmenden Zinssatz führt zu insgesamt nur geringfügig ansteigenden Jahreskosten bei Zunahme des Zinssatzes, während der starke Anstieg dieses Faktors bei zunehmender Energiepreissteigerung die dann merklich zunehmenden Jahreskosten erklärt.

Tabelle 10: Veränderung der Differenz aus dem tierischen Wärmeeinfall und dem Lüftungswärme-Verlust sowie der Transmissionswärme mit der Außentemperatur
Belegung mit Milchkühen (n = 48) und Mastkälbern (n = 160), $A = 630 \text{ m}^2$, $k_m = 0.8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Außentemperatur	Mastkälber		Milchkühe	
	$(\Delta \dot{Q})_{Ti,L}^*$	$\dot{Q}_T$	$(\Delta \dot{Q})_{Ti,L}^*$	$\dot{Q}_T$
$^{\circ}\text{C}$	kW			
-30	-13.3	-24.1	4.3	-20.1
-25	- 9.9	-21.6	7.5	-17.6
-20	- 6.9	-19.1	10.5	-15.1
-15	- 4.0	-16.6	13.2	-12.5
-10	- 1.5	-14.1	15.7	-10.0
- 5	0.6	-11.5	17.8	- 7.5
0	2.0	- 9.1	19.4	- 5.0
+ 5	3.2	- 6.6	21.2	- 2.5
+13	8.2	- 2.5	-	-

$$* (\Delta \dot{Q})_{Ti,L} = \dot{Q}_{Ti} - \dot{Q}_{LA} + \dot{Q}_{LZ}$$

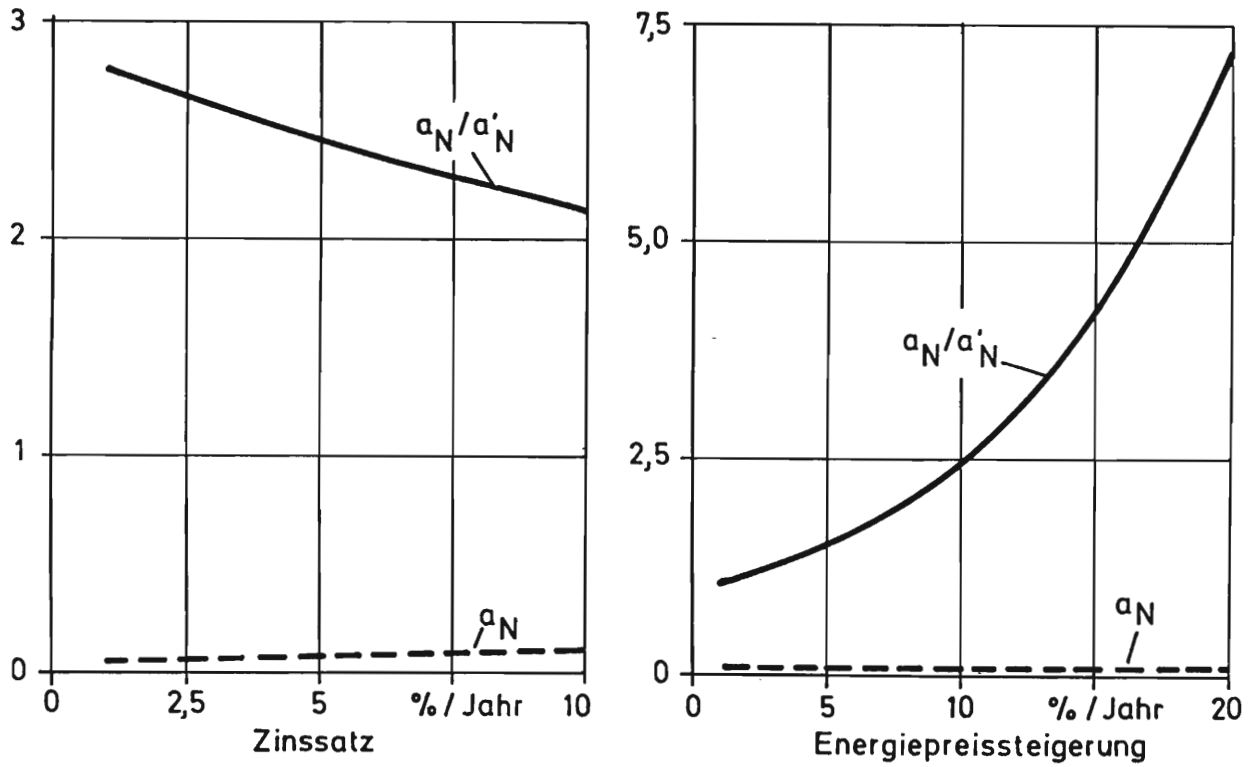


Bild 10: Veränderung der Faktoren a_N bzw. a_N/a'_N mit dem Zinssatz ($j = 10$, $N=20$) und mit der Energiepreissteigerung ($i=5$, $N=20$)

Wie sich Veränderungen der Nutzungsdauer N auf die minimalen jährlichen Gesamtkosten auswirken, zeigen die in der Tabelle 11 zusammengestellten Ergebnisse. Es ist zunächst nicht zu verstehen, warum die Jahreskosten erst abnehmen, bei einer Nutzungsdauer von 15 Jahren einen Minimalwert erreichen und dann ansteigen. Zu erwarten wäre eine gleichmäßige Abnahme mit zunehmender Nutzungsdauer. Die Darstellung der Abhängigkeit der beiden Faktoren a_N bzw. a_N/a'_N von der Nutzungsdauer in Bild 11 gibt die Erklärung für die berechneten Ergebnisse. Die Abnahme der Amortisationszeit a_N wirkt sich im Bereich bis zu einer Nutzungsdauer von 15 Jahren offensichtlich stärker auf die jährlichen Gesamtkosten aus als die Zunahme des Faktors a_N/a'_N . Entsprechend durchlaufen die Jahreskosten einen Minimalwert, eine Folge der Energiepreissteigerung.

Tabelle 11: Minimale jährliche Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer N

Belegung mit Mastkälbern, Standort: München

Nutzungsdauer	Minimale Jahreskosten
Jahre	DM/Jahr
5	5 720.50
10	5 022.42
15	4 977.80
20	5 201.73
25	5 628.43
30	6 240.22
35	7 018.54
40	7 988.50
45	9 157.39
50	10 595.63

Da der Faktor a_N/a'_N nach Bild 11 für $j = 0$ konstant ist ($a'_N = a_N$) und für $j = 20$ einen noch stärkeren Anstieg als für $j = 10$ aufweist, müßten, falls die Ergebnisse der Tabelle 11 mit der Darstellung in Bild 11 zu erklären sind, die minimalen Jahreskosten mit zunehmenden N

- für $j = 0$ abnehmen und
- für $j = 20$ eventuell ohne ein Minimum zu durchlaufen zunehmen.

Für $j = 5$ sollte sich ebenfalls ein Minimalwert ergeben. Bild 12 bestätigt diese Voraussagen an der Darstellung der Abhängigkeit der minimalen jährlichen Gesamtkosten von der Nutzungsdauer bei den Energiepreissteigerungen von 0, 5, 10 und 20 %/Jahr. Die

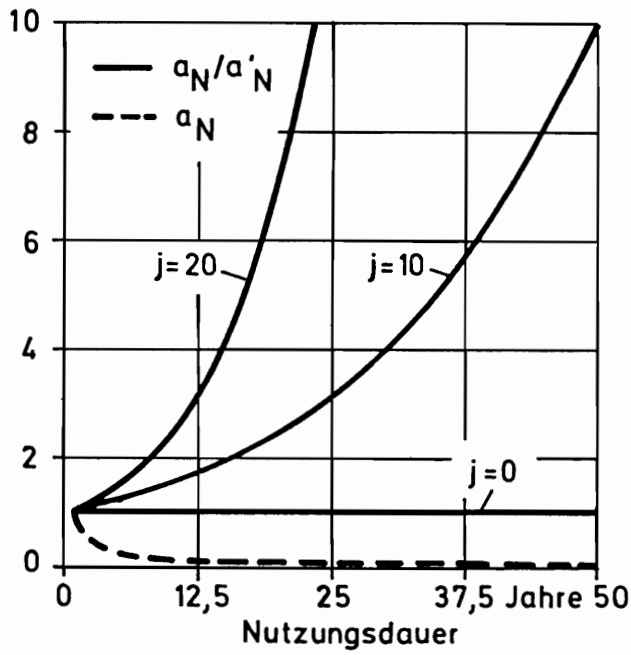


Bild 11: Veränderung der Faktoren a_N bzw. a_N/a'_N mit der Nutzungsdauer; Energiepreissteigerung j als Parameter

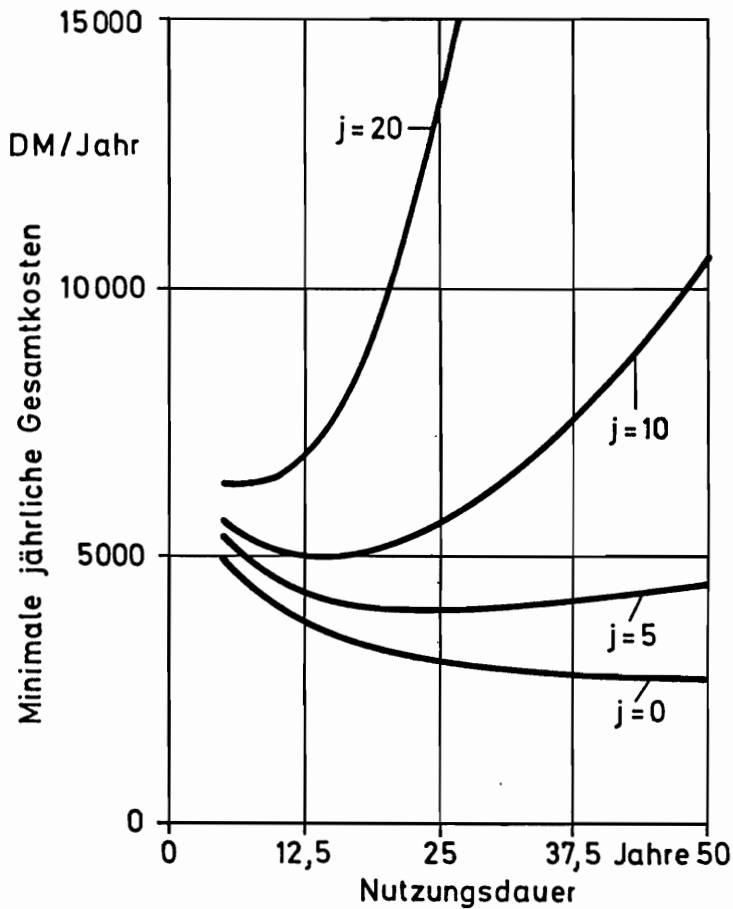


Bild 12: Minimale jährliche Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer; Energiepreissteigerung j als Parameter; Belegung mit Mastkälbern; Standort: München

Verringerung der Jahreskosten bei höherer Nutzungsdauer wird also mit zunehmender Energiepreissteigerung immer stärker überkompensiert.

4.1.5 Zusammenfassung

Das in Abschnitt 4.1 dargestellte, auf die Baupraxis abgestellte Rechenprogramm WAEDOP ermittelt die Kenndaten des wirtschaftlich optimalen Ausgleiches der Wärmebilanzdefizite von Ställen durch Wärmedämmung und Heizung in folgender Weise: Es werden die Dämmschichtdicken in wahlweise ein oder zwei Bauelementen in Zentimeterschritten verändert, die daraus sich ergebenden mittleren k-Werte bestimmt und die dafür erforderlichen jährlichen Investitionskosten sowie die nach der Investition noch verbleibenden Heizkosten ermittelt. Beim Minimalwert der jährlichen Gesamtkosten wird die optimale Kombination der Kennwerte für die Wärmedämmung und Heizung erreicht. Der Ausgleich der Wärmebilanzdefizite erfolgt dann in wirtschaftlich optimaler Weise.

Die Berechnungsgrundlagen dieser wirtschaftlichen Optimierung der Wärmedämmung wurden im Detail dargestellt. Da in den Berechnungsgleichungen alle Einflußgrößen explizit enthalten sind, läßt sich mit dem Rechenprogramm WAEDOP jeder in der Praxis auftretende Beratungsfall individuell behandeln. Es sind aber auch allgemeingültige Aussagen möglich, wie mit der Untersuchung zur Auswirkung einzelner Einflußgrößen auf die minimalen jährlichen Gesamtkosten gezeigt wurde. Bei dieser Analyse ergab sich u.a., daß an die Rechenwerte der beiden Größen Wärme- und Wasserdampfanfall der Tiere in Bezug auf die Praxisrelevanz die höchsten Anforderungen zu stellen sind. Veränderungen der Rechenwerte um nur 10 % wirken sich auf die minimalen Jahreskosten stärker aus als die praxisüblichen Veränderungen anderer Einflußgrößen, wie des Zinssatzes, der Energiepreissteigerung oder der Tierzahl. Auch der Stalltemperatur und -feuchte kommt wegen ihres starken Einflusses auf die minimalen Jahreskosten vorrangige Bedeutung zu.

4.2 Wirtschaftliche Investitionen in Wärmetauscher zur Rückgewinnung von Lüftungswärme in Ställen

4.2.1 Problemstellung, Literaturübersicht

Von den verschiedenen technischen und betrieblichen Maßnahmen, mit denen sich Wärmebilanzdefizite von Räumen ausgleichen lassen, kamen im landwirtschaftlichen Bereich bis vor wenigen Jahren praktisch nur die in Abschnitt 4.1 behandelten Möglichkeiten Wärmedämmung und Heizung zur Anwendung. Die steigenden Energiekosten haben nun bewirkt, daß auch der Rückgewinnung von Lüftungswärme in Luft/Luft-Wärmetauschern verstärktes Interesse zukommt. Dies ist nicht verwunderlich, weil bei einem Stall der Wärmeenergieverlust über die Lüftung, d.h. die Differenz zwischen Abluft- und Zuluftwärmestrom, über 2/3 des Gesamtwärmeverlustes ausmacht. Bild 13 zeigt dies für einen Mastkälberstall, wobei die Berechnungen mit den Werten der Tabelle 4 für den Standort München erfolgten. Der Lüftungs-Volumenstrom wurde so gesteuert, daß der Wasserdampfhaushalt ausgeglichen bleibt (siehe 4.1.3.2).

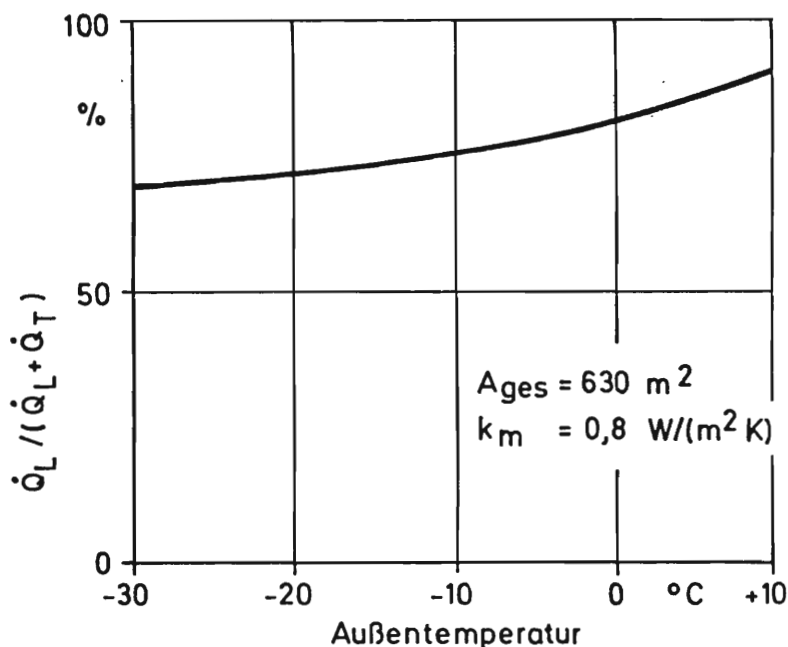


Bild 13: Anteil des Lüftungswärmeverlustes am Gesamtwärmeverlust in Abhängigkeit von der Außentemperatur
Mastkälberstall; Standort: München

Wie in Abschnitt 4.1 gezeigt wurde, ist es bei der Wärmedämmung möglich, durch Verwendung unterschiedlicher Dämmmaterialien und durch (bei den meisten Dämmstoffen schrittweise) Veränderung der Dämmschichtdicken die für die Wärmedämmung charakteristische Bestimmungsgröße der Wärmeenergiebilanz, den mittleren k-Wert, praktisch kontinuierlich zu verändern. Im Gegensatz dazu gibt es bei der Rückgewinnung von Lüftungswärme für deren charakteristische Größe, den Temperaturaustauschgrad Φ_t , nur so viele Bestimmungsgleichungen $\Phi_t = f(\dot{V}_L)$ wie viele unterschiedliche Wärmetauscher im Einzelfall in Betracht zu ziehen sind. Es wurde ja schon in Abschnitt 3.2.3.1 darauf hingewiesen, daß sich die technischen Eigenschaften eines Wärmetauschers mit der Abhängigkeit $\Phi_t = f(\dot{V}_L)$ eindeutig beschreiben lassen. Zu beachten ist dann noch der ebenfalls für jeden Wärmetauscher spezifische elektrische Energiebedarf zum Ausgleich der Druckverluste (siehe 4.2.3).

Die wirtschaftliche Optimierung des Ausgleiches von Wärmebilanzdefiziten bei gleichzeitiger Anwendung der drei technischen Maßnahmen

- Wärmedämmung,
- Rückgewinnung von Lüftungswärme und
- Heizung

auf der Basis der Minimierung der jährlichen Gesamtkosten müßte also in folgenden Teilschritten vor sich gehen:

1. Ermittlung der minimalen jährlichen Gesamtkosten an Hand der Gl. (47) durch Variation des mittleren k-Wertes für jeden der in Betracht kommenden Wärmetauscher. Es werden dabei die jeweiligen Φ_t -Abhängigkeiten, Investitionen und Betriebskosten der einzelnen Wärmetauscher in die Rechnung einbezogen.

2. Feststellung, bei welchem Wärmetauscher die insgesamt geringsten jährlichen Gesamtkosten anfallen.

Da von den für den landwirtschaftlichen Bereich interessanten Luft/Luft-Wärmetauschern z.Zt. noch nicht alle technischen und finanziellen Kennwerte bekannt sind, soll hier eine Wirtschaftlichkeitsprüfung in der Weise erfolgen, daß wirtschaftlich sinnvolle Investitionen in diese Wärmetauscher abgegrenzt werden. Es geht dabei

um die Fragestellung, bis zu welchem Kaufpreis die Investition in einen bestimmten Wärmetauscher wirtschaftlich noch sinnvoll ist.

Es werden zunächst die rechnerischen Grundlagen dieser Wirtschaftlichkeitsprüfung dargestellt. Ein Vergleich zweier, in Ställen eingesetzter Luft/Luft-Wärmetauscher dient dann der Veranschaulichung des erarbeiteten Rechenverfahrens. Weiterhin wird untersucht, wie sich die finanziellen Kenngrößen Zinssatz, Energiepreissteigerung und Nutzungsdauer auf die Grenzwerte der wirtschaftlich sinnvollen Investitionen, d.h. auf die maximalen Kaufpreise auswirken.

Diese Untersuchung von Auswirkungen einzelner Einflußgrößen ist möglich, weil diese in den Bestimmungsgleichungen des in diesem Abschnitt erarbeiteten Rechenverfahrens explizit enthalten sind. Die bisher in der Literatur dargestellten Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (z.B. [25, 36]) behandelten dagegen einzelne Objekte. Sie enthielten keine Ansätze für ein Rechenverfahren, das allgemein gültige Aussagen zuläßt.

4.2.2 Rechenverfahren zur Ermittlung wirtschaftlicher Investitionen in Lüftungs-Wärmetauscher

4.2.2.1 Bestimmungsgleichung für den Grenzwert wirtschaftlicher Investitionen

Die in Abschnitt 4.1 behandelte Optimierungsgleichung (52)

$$\dot{K}_{\text{ges}}(k_m) = \dot{K}_{\text{ges,WD}}(k_m) = a_N K_{I,WD,\min}(k_m) + \frac{a_N}{a'_I} [-\Delta E(k_m)]$$

verändert sich bei Einbeziehung der Rückgewinnung von Lüftungswärme mit dem Wärmetauscher der Laufzahl i entsprechend Gl. (47) zu:

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\text{ges}}(k_m, \Phi_{t,i}) &= a_N K_{I,WD,\min}(k_m) + \frac{a_N}{a'_I} [-\Delta E(k_m, \Phi_{t,i})] + \\ &+ a_N K_{I,LR} + \frac{a_N}{a'_I} \dot{K}_{BS,LR,i} \end{aligned} \quad (67)$$

Dabei wurde vorausgesetzt, daß keine Wartungskosten für den Wärmetauscher anfallen ($\dot{K}_{W,LR,i} = 0$) und daß bei den erhöhten Stromkosten ($\dot{K}_{BS,LR,i}$), die zum Ausgleich der Druckverluste durch den Wärmetauscher anfallen, eine jährliche Steigerung des Strompreises um

ebenfalls den Faktor j zu berücksichtigen ist.

Trennt man in der Gl. (67) von den jährlichen Gesamtkosten $\dot{K}_{ges}$ die Investitionskosten für den Wärmetauscher ab, dann beschreibt

$$\begin{aligned} \dot{K}_{ges,WD+LR}(k_m, \Phi_{t,i}) &= a_N K_{I,WD,min}(k_m) + \frac{a_N}{a_N^I} [-\Delta E(k_m, \Phi_{t,i})] + \\ &+ \frac{a_N}{a_N^I} \dot{K}_{BS,LR,i} \end{aligned} \quad (68)$$

die jährlichen Gesamtkosten für den Ausgleich der Wärmebilanz durch Wärmedämmung und Rückgewinnung von Lüftungswärme, wenn für den Wärmetauscher keine Investition erforderlich ist.

Da sich beim Einsatz des Wärmetauschers das Defizit der Wärmeenergiebilanz ΔE verringert, werden die mit Gl. (68) durch Variation des mittleren k -Wertes zu bestimmenden minimalen Jahreskosten $\dot{K}_{ges,WD+LR,min}$ geringer sein als die mit Gl. (52) erhaltenen minimalen Jahreskosten $\dot{K}_{ges,WD,min}$, es sei denn, die jährlichen Stromkosten gleichen diese Kostendifferenz aus.

Damit die Investition in den Wärmetauscher wirtschaftlich sinnvoll ist, muß gelten:

$$\dot{K}_{ges,WD+LR,min}(k_m, \Phi_{t,i}) + a_N K_{I,LR,i} \leq \dot{K}_{ges,WD,min}(k_m)$$

Der Grenzwert wirtschaftlich sinnvoller Investitionen, d.h. der maximale Kaufpreis des Wärmetauschers, kann damit aus folgender Gleichung berechnet werden:

$$K_{I,LR,i,max} = \frac{1}{a_N} (\dot{K}_{ges,WD,min} - \dot{K}_{ges,WD+LR,min}) \quad (69)$$

4.2.2.2 Berechnung der Stromkosten zum Ausgleich der Wärmetauscher-Druckverluste

Der elektrische Leistungsbedarf zum Ausgleich der vom Wärmetauscher verursachten Druckverluste läßt sich nach folgender Gleichung bestimmen (siehe z.B. [15]):

$$\dot{L}_E = \frac{\dot{V}_A (\Delta p)_A + \dot{V}_Z (\Delta p)_Z}{3.6 \cdot 10^4 \eta_G \eta_M} \quad (70)$$

mit

$(\Delta p)_{A(Z)}$ Druckverlust auf der Abluft (A)- bzw. Zuluft (Z)-
Seite

η_G Wirkungsgrad des Gebläses

η_M Wirkungsgrad des Motors

Mit der schon in Abschnitt 3.2.2.3 gemachten Annahme

$$\dot{V}_A = \dot{V}_Z = \dot{V}_L$$

und mit (nach [35])

$$\eta_G = 0.65 \quad (\text{Axialgebläse})$$

$$\eta_M = 0.78 \quad (1.2 \text{ kW Motor})$$

folgt:

$$\dot{L}_E = 5.48 \cdot 10^{-5} \dot{V}_L [(\Delta p)_A + (\Delta p)_Z] \quad (71)$$

Die Abhängigkeit der Druckverluste vom Volumenstrom der Lüftung ist für jeden Wärmetauscher experimentell zu bestimmen. Die Annahme des gleichen Volumenstromes auf der Ab- und Zuluftseite und die verwendeten Rechenwerte für die Wirkungsgrade sind Näherungen, die bei der Berechnung von Praxisfällen angepaßt werden müssen.

Problematisch ist die Ermittlung der im Laufe eines Jahres zum Ausgleich der Druckverluste benötigten elektrischen Energie. Der Wärmetauscher ist im Temperaturbereich zwischen der Außentemperatur, oberhalb der die Wärmebilanz mit Wärmetauscher ausgeglichen ist, und der Außentemperatur, oberhalb der, beim gleichen mittleren k-Wert, der Bilanzausgleich auch ohne Wärmetauscher erreicht wird, nur zeitweise im Betrieb, da sonst ein Wärmeüberschuß entsteht. Um einen Näherungswert für die tatsächlich benötigte elektrische Energie $E_{E,i}$ zu erhalten, wird der Mittelwert aus den Energieverbrauchswerten für die beiden Zeiträume gebildet, in denen die

Wärmebilanz mit bzw. ohne Wärmetauscher nicht ausgeglichen ist.

Die Berechnung erfolgt in Verbindung mit Gl. (40):

Die jährlichen Stromkosten ergeben sich dann aus folgender Gleichung:

$$\dot{K}_{BS,LR,i} = K'_{E,E} E_{E,i} \quad (72)$$

mit

$K'_{E,E}$ Preis für eine Einheit (hier: kWh) elektrischer Energie

Der Preis für die elektrische Energie unterscheidet sich dabei deutlich von dem mit Gl. (46) eingeführten Energiepreis K'_E für Heizenergie aus Brennstoffen (siehe [32]).

4.2.2.3 EDV-Rechenprogramm WABILOP

Um die nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten maximal mögliche Investition in einen Wärmetauscher nach Gl. (69) berechnen zu können, sind also die minimalen Jahreskosten nach den Gl. (52) und (68) zu ermitteln. Dies geschieht mit dem EDV-Programm WABILOP [41], das auf dem Programm WAEDOP aufbaut.

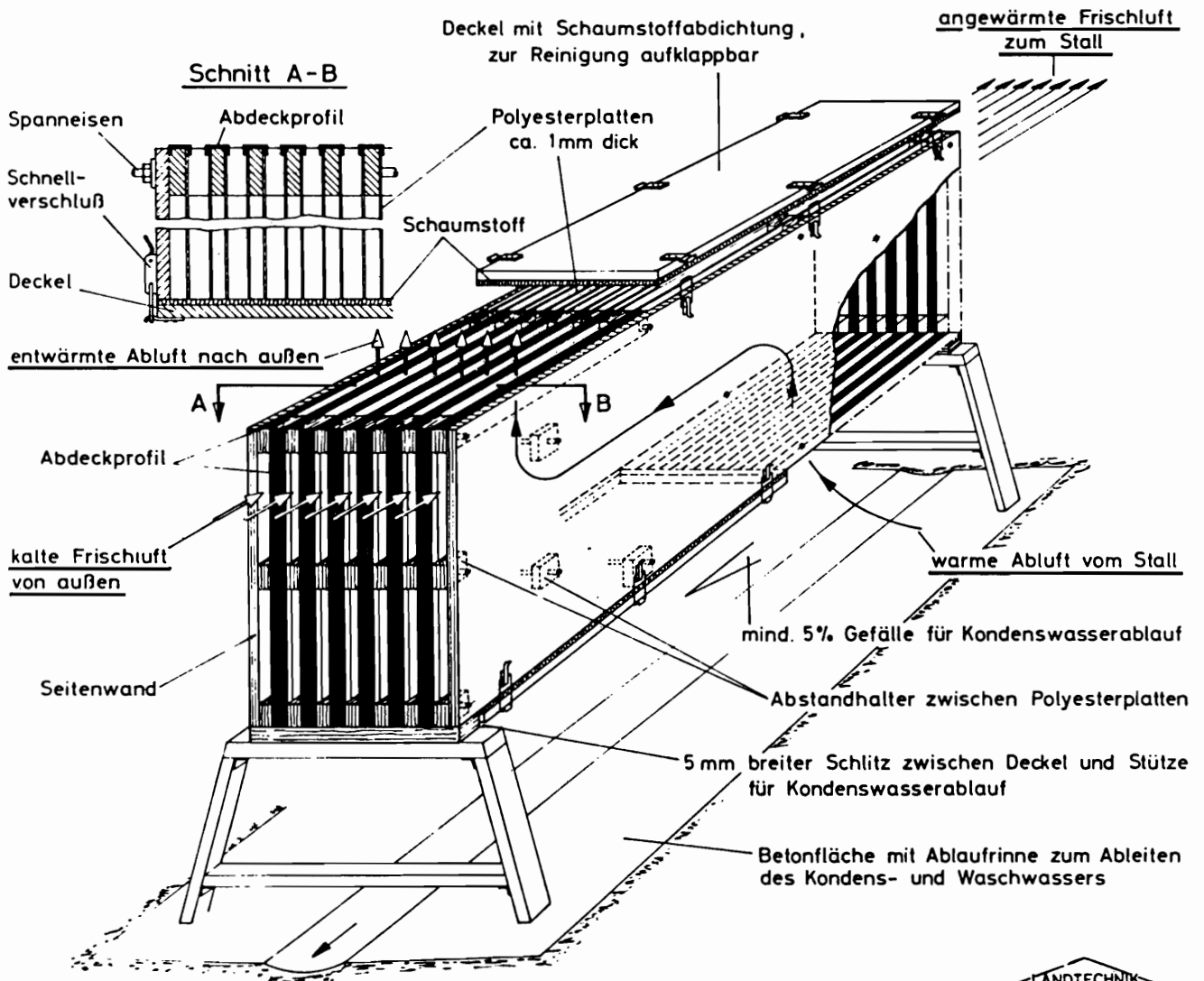
Ein erster Rechenschritt ergibt die minimalen Jahreskosten $\dot{K}_{ges,WD,min}$ für den Bilanzausgleich durch Wärmedämmung und Heizung mit dem Programm WAEDOP. Bei dem zweiten Durchlauf des Rechenprogrammes werden die Auswirkung des Wärmetauschers über die Kenngröße Φ_t und der (erhöhte) Stromverbrauch in die Berechnung einbezogen. Man erhält dann mit einer Modifikation des Programmes WAEDOP die minimalen Jahreskosten $\dot{K}_{ges,WD + WR,min}$ für den Bilanzausgleich durch Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme und Heizung nach Gl. (68). Aus den erhaltenen beiden Werten ergibt sich schließlich mit der Gl. (69) die maximale Investition in den Wärmetauscher.

4.2.3 Untersuchungen zum wirtschaftlichen Einsatz von Platten- und Röhrenwärmetauschern

4.2.3.1 Kennwerte der ausgewählten Wärmetauscher

Zur Veranschaulichung des in Abschnitt 4.2.2 dargestellten Rechenverfahrens und für die Untersuchungen zum Einfluß der finanziellen Kenngrößen i , j und N auf die Maximalwerte der wirtschaftlich sinnvollen Investitionen wurden folgende Wärmetauscher ausgewählt:

- Im Selbstbau aus glasfaserverstärkten Polyester (GUP)-Platten hergestellter Plattenwärmetauscher (Bild 14),
- Handelsüblicher Glas-Röhrenwärmetauscher (Bild 15)



Seitenwände, Deckel u. Abstandhalter aus Sperrholz 12mm AW 100 (wasserfest verleimt)

Bild 14: Luft/Luft-Wärmetauscher aus Polyesterplatten zur Wärmerückgewinnung aus Stallabluft (Kreuz-Gegenstrom-Prinzip)

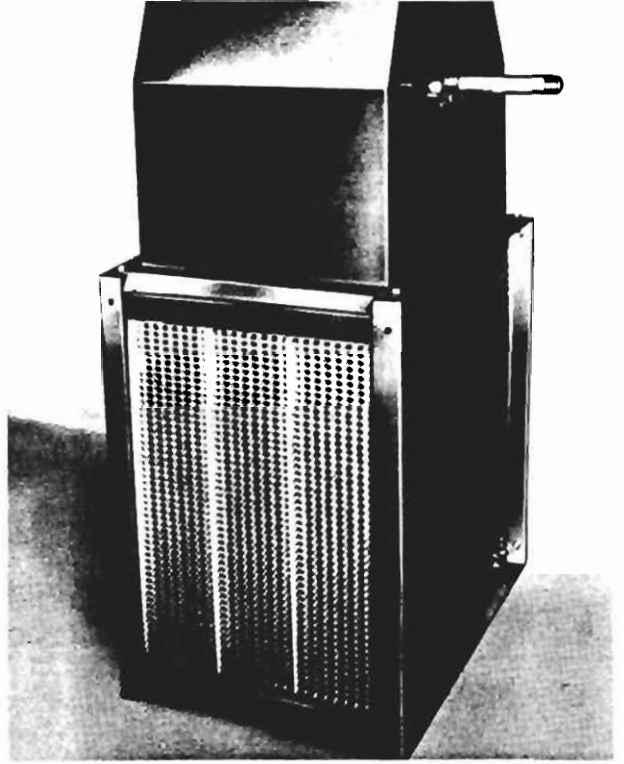
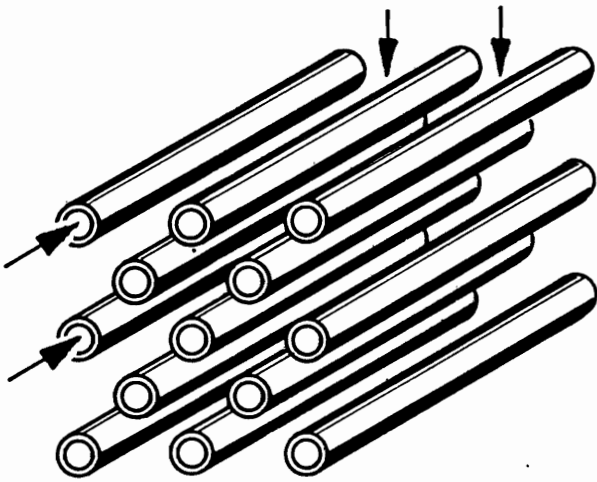


Bild 15: Konstruktionsprinzip und technische Ausführung (Fabrikat der Firma PRIX) eines Glas-Röhrenwärmetauschers

Die für beide Wärmetauscher-Typen von VOGT [31] gemessenen Abhängigkeiten $\Phi_t = f(\dot{V}_L)$ und $\Delta p = f(\dot{m}_L)$ * zeigen die Bilder 16 und 17. Danach hat der Glas-Röhrenwärmetauscher bei etwas größeren Φ_t -Werten fast doppelt so hohe Druckverluste. Für die erhaltenen Φ_t - bzw. Δp -Abhängigkeiten wurden mit einer Regressionsanalyse (multiple Regression) die folgenden Bestimmungsgleichungen ermittelt (mit $\dot{V}_R = 0.001 \dot{V}_L$):

* $\dot{m}_L$: Massenstrom der Lüftung, $\dot{V}_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho}$

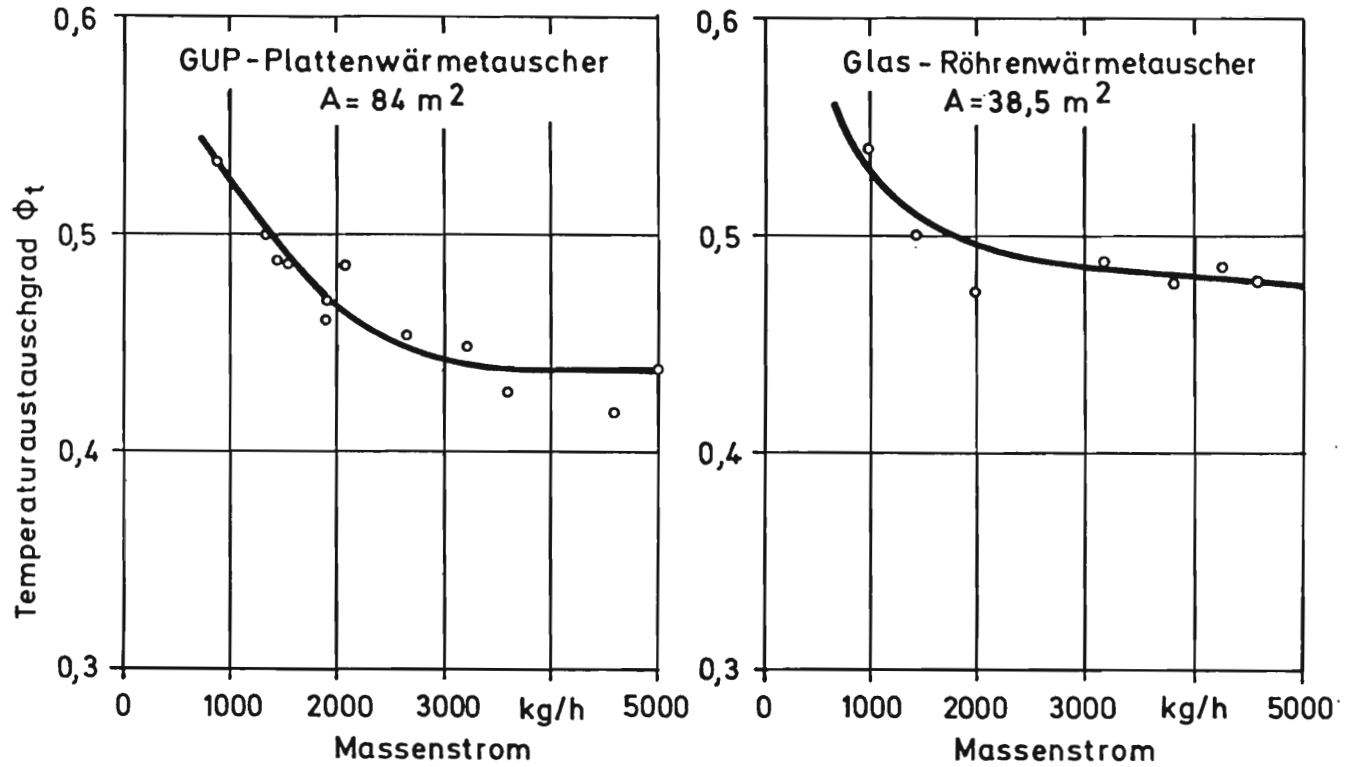


Bild 16: Temperaturaustauschgrad von Wärmetauschern in Abhängigkeit vom Massenstrom (nach VOGT)

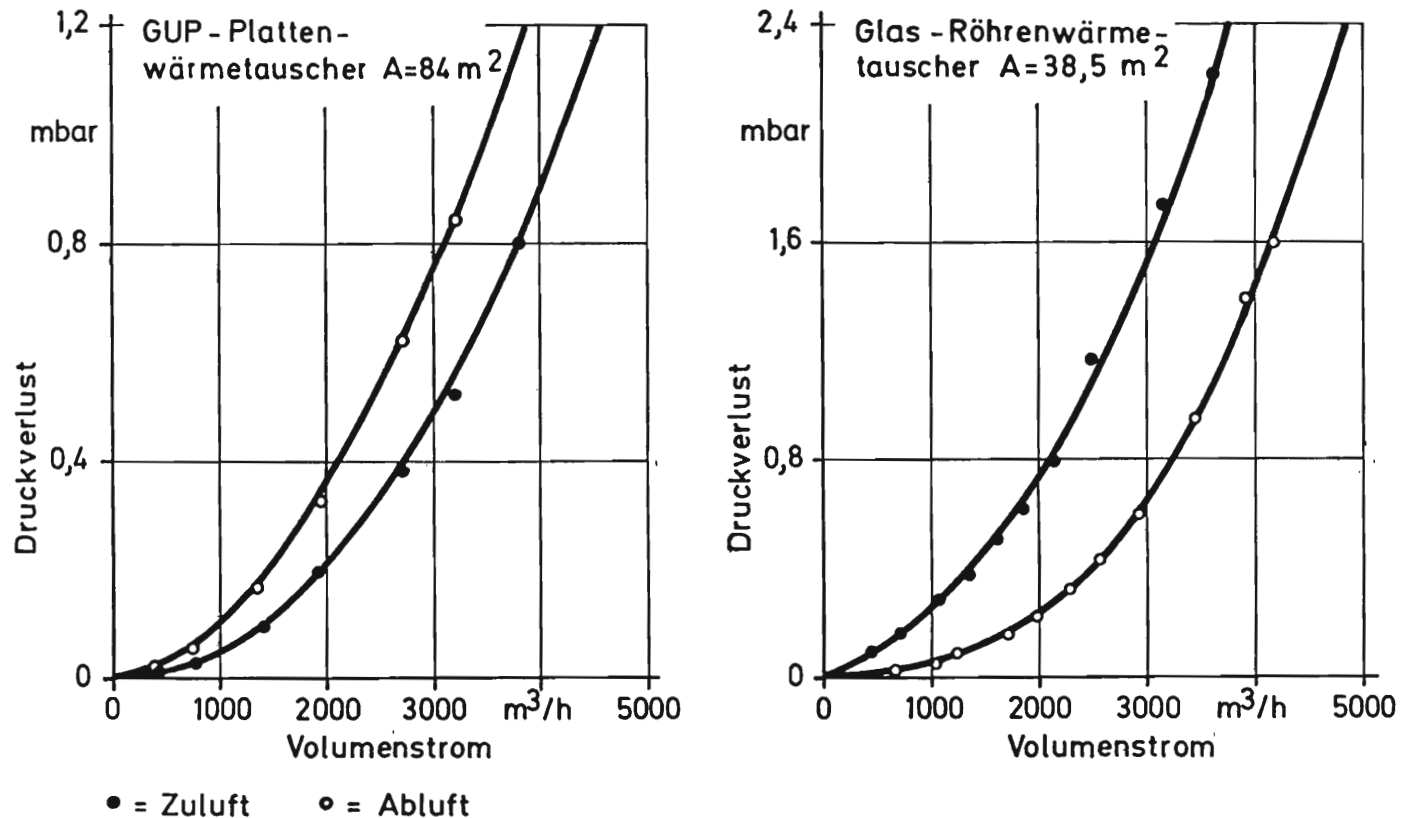


Bild 17: Druckverlust von Wärmetauschern in Abhängigkeit vom Volumenstrom (nach VOGT)

GUP-Plattenwärmetauscher:

$$\Phi_t = 0.4896 - \frac{0.4692}{\dot{V}_R} + \frac{1.2761}{\dot{V}_R^2} - \frac{1.0008}{\dot{V}_R^3} + \frac{0.2394}{\dot{V}_R^4}$$

$$(\Delta p)_A = -0.01 + 0.042 \dot{V}_R + 0.0681 \dot{V}_R^2 \quad (73)$$

$$(\Delta p)_Z = -0.0065 + 0.0393 \dot{V}_R^2 + 0.004 \dot{V}_R^3$$

Glas-Röhrenwärmetauscher:

$$\Phi_t = 0.4656 + \frac{0.0599}{\dot{V}_R}$$

$$(\Delta p)_A = -0.006 + 0.0284 \dot{V}_R + 0.0208 \dot{V}_R^3$$

$$(\Delta p)_Z = -0.0323 + 0.2709 \dot{V}_R + 0.0265 \dot{V}_R^3$$

$$(74)$$

Die in Bild 16 dargestellten Φ_t -Meßwerte gelten für Luftfeuchten um 50 % r.F. Für die Abluft aus Ställen mit einer relativen Feuchte von 80 % wären an sich größere Φ_t -Werte in Rechnung zu stellen (siehe Bild 18).

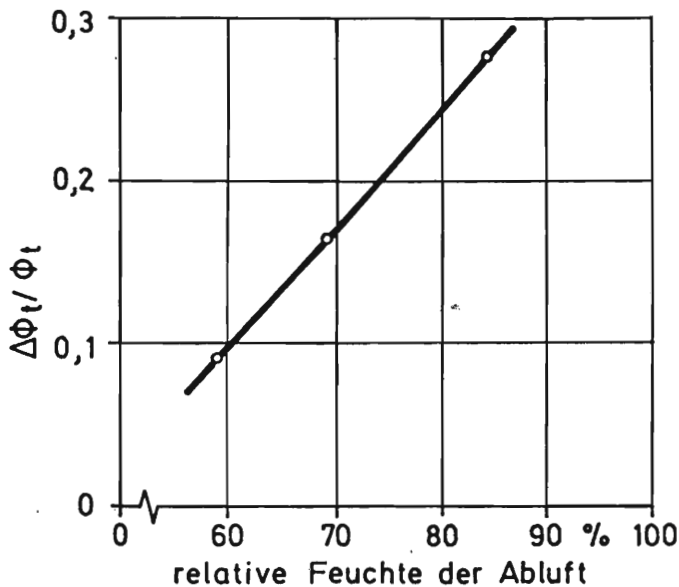


Bild 18: Veränderung des Temperaturaustauschgrades mit der relativen Feuchte der Abluft bei einem Glas-Röhrenwärmetauscher (nach VOGT)

Es ist aber damit zu rechnen, daß sich diese erhöhten Φ_t -Werte wegen der Verschmutzung des Wärmetauschers (siehe z.B. [28]) als Langzeit-Durchschnittswerte nicht realisieren lassen. Da z.Zt. über die wegen der Verschmutzung notwendigen Korrekturen, auch für die Druckverluste, keine Meßergebnisse vorliegen, wurden die unkorrigierten Bestimmungsgleichungen (73) und (74) bei den weiteren Berechnungen verwendet.

Für den Fall der Belegung mit Milchkühen und Mastbullen wird angenommen, daß sich der gesamte Luftdurchsatz des Modellstalles im Winter mit einem Ventilator bewältigen läßt und daß dementsprechend nur ein Wärmetauscher zum Einsatz kommt. Bei beiden Belegfällen ist die Wärmebilanz, auch wenn kein Wärmetauscher eingesetzt wird, bei Außentemperaturen von unterhalb -10°C ausgeglichen. Die nach Bild 2 in diesem Temperaturbereich gegebenen Lüftungs-Volumenströme von bis zu $3\,000\text{ m}^3/\text{h}$ lassen sich ohne Problem durch einen Wärmetauscher hindurchleiten. Die auftretenden Druckverluste sind noch relativ gering (siehe Bild 17). Bei einem Mastkälberstall dagegen ist die Wärmebilanz erst bei höheren Außentemperaturen und entsprechend hohen Lüftungs-Volumenströmen (siehe Bild 2) ausgeglichen, so daß bei den weiteren Berechnungen davon auszugehen ist, daß in diesem Fall zwei Ventilatoren und zwei Wärmetauscher notwendig sind. Der Volumenstrom der Lüftung verteilt sich dann gleichmäßig auf beide Wärmetauscher. Dies hat insgesamt niedrigere Kosten für die Heizung und für den erhöhten Stromverbrauch zur Folge, da sich der Temperaturaustauschgrad mit abnehmendem Volumen- (bzw. Massen-)strom verbessert und der Druckverlust überproportional abnimmt (siehe Bild 16 und 17). Diesen Einsparungen steht eine doppelt so hohe Investition gegenüber.

4.2.3.2 Rechenwerte für den Modellstall, die Belegung und die finanziellen Kenngrößen

Die Berechnungen der Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanzausgleiches und der maximalen Investition beim Einsatz der vorgestellten Wärmetauscher erfolgten mit den Rechenwerten für den Modellstall, die Belegung und die finanziellen Kenngrößen aus Abschnitt 4.1.4.1. Für den Strompreis wurde $K'_{E,E} = 0.20\text{ DM/kWh}$ angesetzt.

Bei einer Wärmeenergie-Bilanzierung unter Einbeziehung der Rückgewinnung von Lüftungswärme ist für den Wärmestrom der Tiere mit der Gesamtwärmeabgabe, d.h. der Summe aus sensiblem und latentem Wärmestrom, zu rechnen. Die latente Wärme ist an den von den Tieren ausgehenden Wasserdampf gebunden und wird im Wärmetauscher bei der Kondensation des Wasserdampfes in sensible Wärme umgewandelt. Da diese Kondensationswärme in der Φ_t -Abhängigkeit von der relativen Feuchte der Abluft erfaßt wird, kann auch weiterhin mit den DIN-Werten für die sensible Wärme gerechnet werden. Die Erhöhung der Φ_t -Werte wird hier allerdings nicht berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.2.3.1).

4.2.3.3 Wirtschaftlich optimaler Wärmebilanzausgleich bei unterschiedlicher Belegung und für verschiedene Standorte

Die Kenndaten des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanzausgleiches durch Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme und Heizung bei Belegung des Modellstalles mit Milchkühen, Mastbullen und Mastkälbern am Standort München sind in den Tabellen 12 (GUP-Plattenwärmetauscher) und 13 (Glas-Röhrenwärmetauscher) zusammengestellt.

Im Vergleich mit den Werten der Tabelle 5 zeigt sich, daß der Einsatz der Wärmetauscher zu einer deutlichen Verringerung der minimalen jährlichen Gesamtkosten führt. Diese betragen jetzt, in % der Kosten ohne Wärmerückgewinnung:

	Plattenwärmetauscher	Röhrenwärmetauscher
Milchkühe	40.2	43.8
Mastbullen	17.8	21.4
Mastkälber	37.2	53.8

Die höheren Gesamtkosten beim Glas-Röhrenwärmetauscher erklären sich im Falle der Belegung mit Milchkühen und Mastbullen aus den fast doppelt so hohen Kosten für die elektrische Energie. Beim Mastkälberstall sind die Stromkosten geringer, weil ein niedrigerer mittlerer k-Wert und entsprechend höhere Investitionskosten wirtschaftlicher sind. Bei niedrigeren k-Werten ist aber die Wärmebilanz schon bei tieferen Außentemperaturen ausgeglichen, so daß der erhöhte Strombedarf für den Ausgleich der Druckverluste durch

Tabelle 12: Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanzausgleiches durch Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme und Heizung bei Belegung des Modellstalles mit Milchkühen, Mastbullen und Mastkälbern

GUP-Plattenwärmetauscher, Standort: München

Kenngröße	Kennwerte bei Belegung mit		
	Milchkühen	Mastbullen	Mastkälbern
JAHRESKOSTEN in DM/Jahr			
Gesamt	211.69	82.66	1 932.73
Investition in die Wärmedämmung	0.00	0.00	933.34
elektr. Energie	49.01	36.13	803.08
Heizenergie	162.67	46.54	196.31
INVESTITIONSKAPITAL in DM			
Gesamt	0.00	0.00	11 631.50
Wärmedämmung -Decke	0.00	0.00	7 050.00
-Wand	0.00	0.00	4 581.50
k-WERT in $W/(m^2K)$			
Gesamt	1.972	1.972	0.804
Decke	2.200	2.200	0.626
Wand	1.450	1.450	0.695
DÄMMSCHICHTDICKE in m			
Decke	0.00	0.00	0.04
Wand	0.00	0.00	0.03
MAXIMALE INVESTITION FÜR DEN WÄRMETAUSCHER in DM			
	3 916.00	4 759.00	40 739.00*

*für zwei Wärmetauscher

Tabelle 13: Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanz-
ausgleiches durch Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme
und Heizung bei Belegung des Modellstalles mit Milchkühen, Mast-
bullen und Mastkälbern

Glas-Röhrenwärmetauscher, Standort: München

Kenngröße	Kennwerte bei Belegung mit		
	Milchkühen	Mastbullen	Mastkälbern
JAHRESKOSTEN in DM/Jahr			
Gesamt	230.22	99.63	2 799.03
Investition in die Wärmedämmung	0.00	0.00	2 457.51
elektr. Energie	86.52	65.13	335.46
Heizenergie	143.80	34.50	6.06
INVESTITIONSKAPITAL in DM			
Gesamt	0.00	0.00	30 626.00
Wärmedämmung -Decke	0.00	0.00	18 075.00
-Wand	0.00	0.00	12 551.00
k-WERT in W/(m ² K)			
Gesamt	1.972	1.972	0.467
Decke	2.200	2.200	0.278
Wand	1.450	1.450	0.271
DÄMMSCHICHTDICKE in m			
Decke	0.00	0.00	0.11
Wand	0.00	0.00	0.12
MAXIMALE INVESTITION FÜR DEN WÄRMETAUSCHER in DM			
	3 684.00	4 547.00	29 943.00*

*für zwei Wärmetauscher

den Wärmetauscher in entsprechend weniger Stunden pro Jahr benötigt wird. Die jährlichen Stromkosten verringern sich dementsprechend mit abnehmenden mittleren k-Wert.

Anzumerken ist, daß der Verzicht auf Wärmedämm-Maßnahmen beim Milchvieh- und Mastbullenstall zwar wirtschaftlich sinnvoll sein mag, eine Verbesserung der Wärmedämmung in Wand und Decke ist aber dennoch unumgänglich, da bei den gegebenen k-Werten der Wasserdampf im Stall schon bei Außentemperaturen in der Nähe von bzw. knapp unter 0°C an den Bauelementen kondensiert. Der Mindest-Wärmeschutz zur Vermeidung von Oberflächenkondensation muß auf alle Fälle sichergestellt sein.

Vergleicht man die errechneten maximalen Investitionen für die Wärmetauscher mit dem tatsächlichen Investitionsbedarf für den Plattenwärmetauscher in Höhe von etwa 2 500 DM (Materialaufwand) bzw. für den Röhrenwärmetauscher in Höhe von etwa 6 000 DM, so folgt, daß der Einsatz des Plattenwärmetauschers bei allen drei Nutzungsarten des Stalles wirtschaftlich sinnvoll ist, während der Glas-Röhrenwärmetauscher nur im Mastkälberstall zu einem wirtschaftlichen Bilanzausgleich führt, dies auch, wenn man, wie bei den Berechnungen, 2 Wärmetauscher einsetzt.

Die Tabellen 14 und 15 enthalten die Ergebnisse für die Belegung des Modellstalles mit Mastkälbern an den Standorten Oberstdorf, München und Hamburg. Die unterschiedlichen Klimata machen sich in den Maximalwerten der wirtschaftlich sinnvollen Investitionen deutlicher bemerkbar als in den minimalen jährlichen Gesamtkosten.

Daß die Jahreskosten beim Einsatz des Glas-Röhrenwärmetauschers in Hamburg größer sind als in München, ist darauf zurückzuführen, daß in Hamburg höhere Stromkosten anfallen. Da aber in beiden Städten die Wärmeenergiebilanz bei jeweils den gleichen Außentemperaturen ausgeglichen ist (ohne Wärmetauscher bei 14°C , mit Wärmetauscher bei -15°C), müssen diese Unterschiede in den Stromkosten nach Abschnitt 4.2.2.2 auf unterschiedliche Zeiten mit erhöhtem Strombedarf zurückgeführt werden. Aus den Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur des Abschnittes 3.3.1 ergeben sich für Außentemperaturen unterhalb der genannten Bilanzausgleichs-Temperatur -15°C folgende Stunden pro Jahr:

Tabelle 14: Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanzausgleiches durch Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme und Heizung an unterschiedlichen Standorten

GUP-Plattenwärmetauscher, Belegung mit Mastkälbern

Kenngröße	Kennwerte am Standort		
	Oberstdorf	München	Hamburg
JAHRESKOSTEN in DM/Jahr			
Gesamt	2 129.65	1 932.73	1 824.91
Investition in die Wärmedämmung	933.34	933.34	806.96
elektr. Energie	800.29	803.08	877.72
Heizenergie	396.01	196.31	140.23
INVESTITIONSKAPITAL in DM			
Gesamt	11 631.50	11 631.50	10 056.50
Wärmedämmung	-Decke	7 050.00	7 050.00
	-Wand	4 581.50	4 581.50
k-WERT in $W/(m^2K)$			
Gesamt	0.804	0.804	0.885
Decke	0.626	0.626	0.762
Wand	0.695	0.695	0.695
DÄMMSCHICHTDICKE in m			
Decke	0.04	0.04	0.03
Wand	0.03	0.03	0.03
MAXIMALE INVESTITION FÜR 2 WÄRMETAUSCHER in DM			
	50 084.00	40 739.00	34 848.00

Tabelle 15: Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanz-
ausgleiches durch Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme
und Heizung an unterschiedlichen Standorten
Glas-Röhrenwärmetauscher, Belegung mit Mastkälbern

Kenngröße	Kennwerte am Standort		
	Oberstdorf	München	Hamburg
JAHRESKOSTEN in DM/Jahr			
Gesamt	2 847.54	2 799.03	2 835.37
Investition in die Wärmedämmung	2 457.51	2 457.51	2 457.51
elektr. Energie	365.61	335.46	377.47
Heizenergie	24.42	6.06	0.38
INVESTITIONSKAPITAL in DM			
Gesamt	30 626.00	30 626.00	30 626.00
Wärmedämmung -Decke	18 075.00	18 075.00	18 075.00
-Wand	12 551.00	12 551.00	12 551.00
k-WERT in W/(m ² K)			
Gesamt	0.467	0.467	0.467
Decke	0.278	0.278	0.278
Wand	0.271	0.271	0.271
DÄMMSCHICHTDICKE in m			
Decke	0.11	0.11	0.11
Wand	0.12	0.12	0.12
MAXIMALE INVESTITION FÜR 2 WÄRMETAUSCHER in DM			
	41 137.00	29 943.00	22 256.00

München: 44

Hamburg: 8

In diesem Temperaturbereich fallen dementsprechend in München höhere Stromkosten an als in Hamburg. Diese Kostenvorteile des Standortes Hamburg gehen allerdings wegen der höheren Stromkosten bei Außentemperaturen über 0°C wieder verloren. Bei diesen Temperaturen, für die auch der elektrische Leistungsbedarf wegen der höheren Lüftungs-Volumenströme größer ist als unterhalb -15°C , ergeben sich aus den Häufigkeitsverteilungen die in Tabelle 16 zusammengestellten Stundenzahlen. In Hamburg hat danach die Außentemperatur in mehr Stunden pro Jahr Werte im Bereich 0° bis 14°C als in München (siehe auch Bild 1). Die höheren Stromkosten in

Tabelle 16: Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur im Bereich 0°C bis 15°C

Temperaturbereich	Zahl der Stunden pro Jahr am Standort	
	München	Hamburg
0.0 - 0.9	349	383
1.0 - 1.9	352	385
2.0 - 2.9	322	353
3.0 - 3.9	319	355
4.0 - 4.9	331	374
5.0 - 5.9	328	400
6.0 - 6.9	313	399
7.0 - 7.9	317	391
8.0 - 8.9	322	390
9.0 - 9.9	344	376
10.0 - 10.9	372	393
11.0 - 11.9	361	400
12.0 - 12.9	379	407
13.0 - 13.9	377	403
14.0 - 14.9	373	396

diesem Temperaturbereich führen dann zu den insgesamt höheren Stromkosten des Standortes Hamburg. Dieses Ergebnis ist letztlich eine Folge der in Abschnitt 4.2.2.2 getroffenen Festlegung, daß die zum Ausgleich der Druckverluste durch den Wärmetauscher benötigte elektrische Energie errechnet werden soll als Mittelwert aus den Energieverbrauchswerten für die beiden Zeiträume, in denen die Wärmebilanz mit bzw. ohne Wärmetauscher nicht ausgeglichen ist.

4.2.3.4 Maximalwerte der wirtschaftlichen Investitionen bei Veränderung der finanziellen Einflußgrößen

Die finanziellen Einflußgrößen Zinssatz i , Energiepreissteigerung j und Nutzungsdauer N wurden in folgenden Wertebereichen verändert:

i : 1 - 15 %/Jahr
 j : 0 - 20 %/Jahr
 N : 5 - 50 Jahre

Die mit dem Rechenprogramm WABILOP erhaltenen Maximalwerte der wirtschaftlich sinnvollen Investitionen in 2 Wärmetauscher für einen Mastkälberstall am Standort München sind in den Bildern 19, 20 und 21 dargestellt. Die maximalen Kaufpreise verringern sich danach mit steigendem Zinssatz, während Zunahmen in der Energiepreissteigerung bzw. Nutzungsdauer zu höheren Maximalwerten führen. Dabei hat nach Bild 22 die Energiepreissteigerung eine deutliche Auswirkung darauf, wie stark die maximale Investition mit steigender Nutzung zunimmt.

Die Unstetigkeiten der einzelnen Kurven in den Bildern 19 - 21 bzw. die Ungleichmäßigkeiten im Verlauf der beiden Kurven sind eine Folge des Zusammenwirkens folgender Gegebenheiten:

1. Die Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur sind keine stetigen Funktionen. Angegeben sind vielmehr die Stunden pro Jahr mit den Außentemperaturen in Intervallen von jeweils 1 K.
2. Die Dämmschichtdicken werden bei den Berechnungen mit dem EDV-Programm WABILOP im Bereich 3 - 100 cm in Schnitten von jeweils 1 cm verändert. Daraus folgen schrittweise Veränderungen des

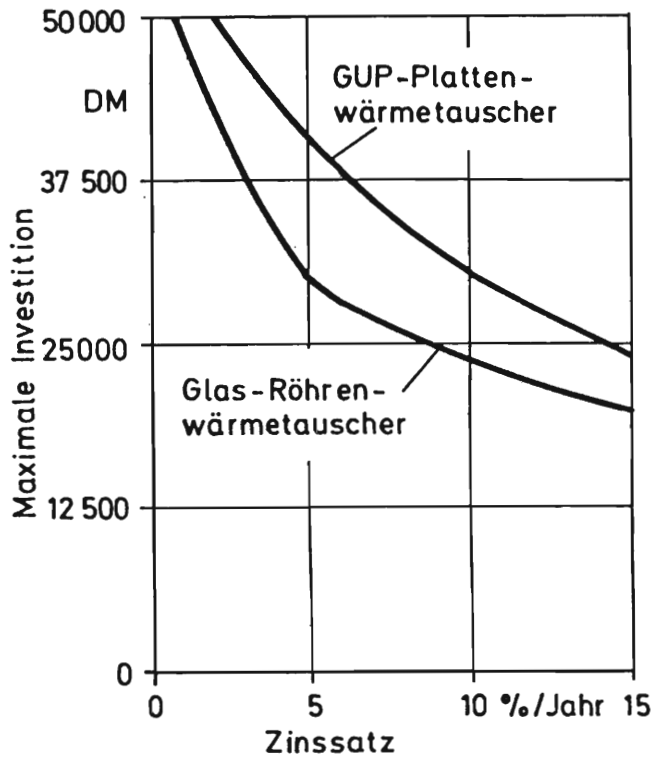


Bild 19: Maximale Investition für 2 Wärmetauscher in Abhängigkeit vom Zinssatz

Belegung mit Mastkälbern; Standort: München

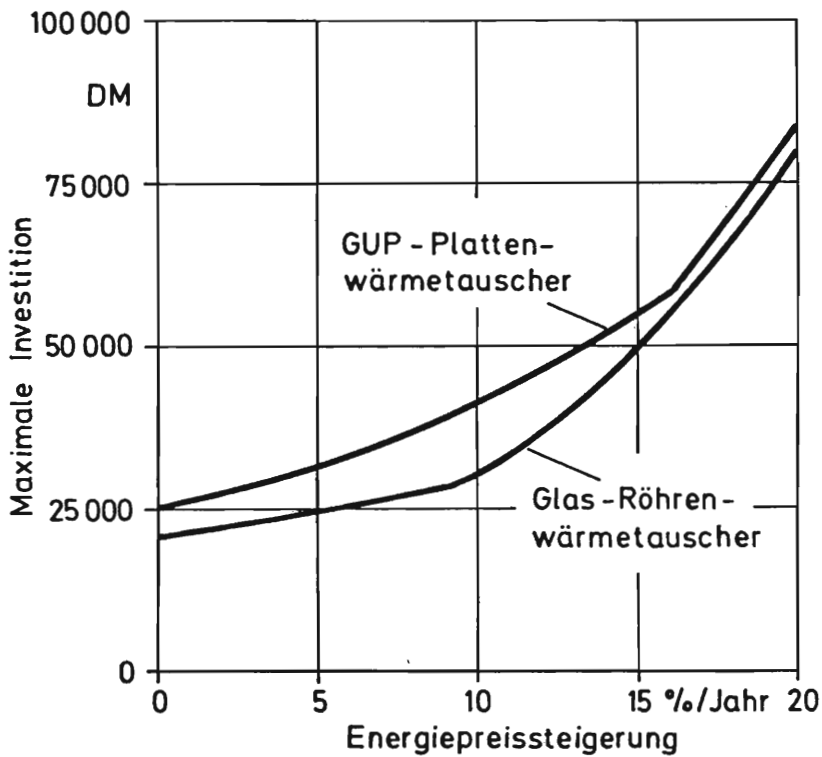


Bild 20: Maximale Investition für 2 Wärmetauscher in Abhängigkeit von der Energiepreissteigerung

Belegung mit Mastkälbern; Standort: München

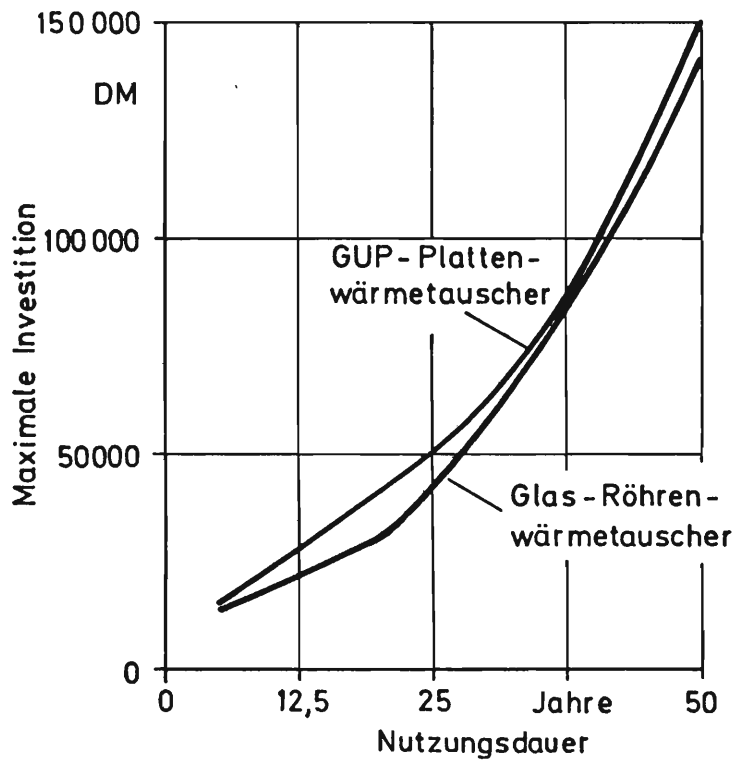


Bild 21: Maximale Investition für 2 Wärmetauscher in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer

Belegung mit Mastkälbern; Standort: München

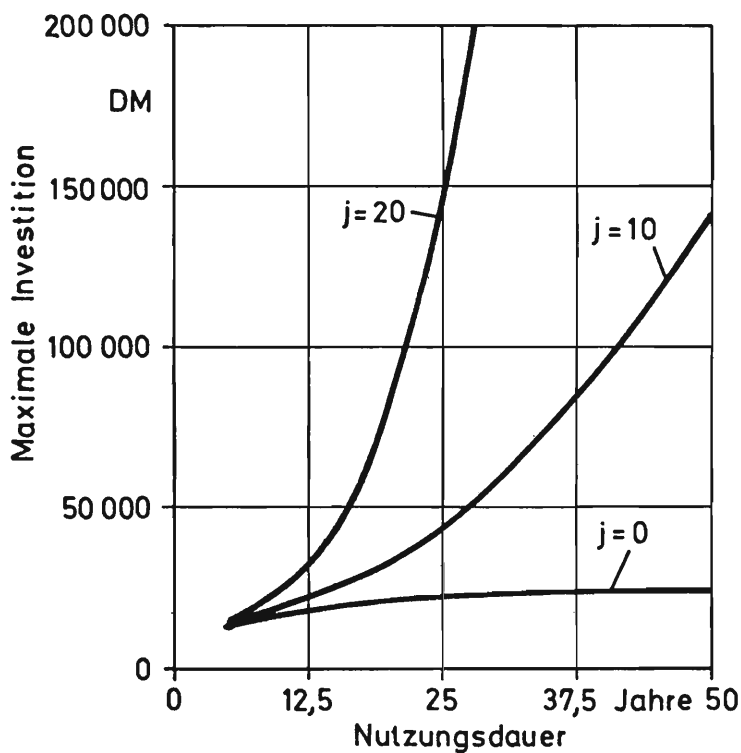


Bild 22: Maximale Investition für 2 Glas-Röhrenwärmetauscher in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer mit der Energiepreissteigerung j als Parameter

Belegung mit Mastkälbern, Standort: München

k-Wertes und aller vom k-Wert abhängigen Größen.

3. Die Veränderungen des k-Wertes werden mit zunehmender Dämmschichtdicke immer geringer, wie Bild 23 für einen Baustoff mit der Wärmeleitfähigkeit 0.035 W/(mK) zeigt.

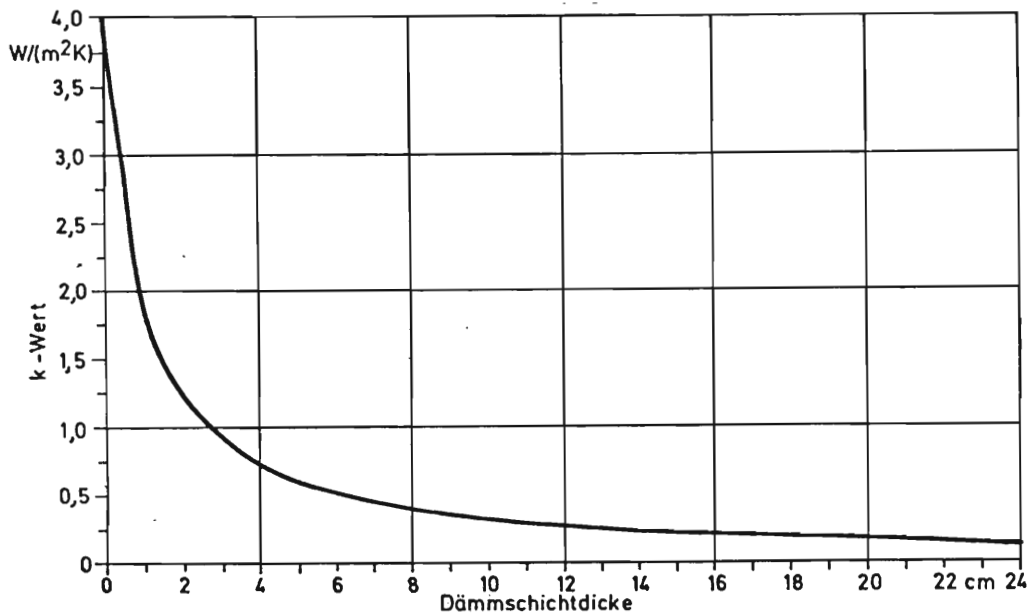


Bild 23: Veränderung des k-Wertes mit der Dämmschichtdicke bei einem Baustoff mit dem λ -Wert $0,035 \text{ W/(mK)}$

4. Die Veränderungen des in die Berechnung der Jahreskosten für den Strom und die Heizung eingehenden Faktors a_N/a'_N mit den finanziellen Kenngrößen (siehe Bild 10 und 11) ergeben Veränderungen dieser Jahreskosten, deren Ausmaß dem Betrag des Produktes aus Energiepreis und Energie proportional ist. Hat man z.B. für die elektrische Energie nach Gl. (72) Jahreskosten in Höhe von 300 DM errechnet, so ergibt sich für den durchschnittlichen Anteil dieser Energiekosten an den Gesamtkosten nach Gl. (67):

$$\dot{K} = a_N/a'_N \cdot 300$$

Bei einer Veränderung der Energiepreissteigerung von 10 auf 12 %/Jahr errechnen sich die folgenden Werte (mit $j = 5$, $N = 10$)

$j = 10 \%$	$a_N/a'_N = 2.4643$	$\dot{K} = 739.29$
$j = 12 \%$	$a_N/a'_N = 3.0212$	$\dot{K} = 906.36$

Die Differenz in den Jahreskosten in Höhe von 167.07 DM/Jahr beträgt dann z.B. bei den 4-fachen Jahreskosten für die elektrische Energie entsprechend das 4-fache, also 668.28 DM/Jahr. Dieser Steigerungsbetrag könnte jetzt so groß sein, daß eine weitere Verbesserung der Wärmedämmung wirtschaftlich sinnvoller wird. Dies ist der Fall, wenn der Steigerungsbetrag größer ist als die Zunahme der Investitionskosten abzüglich der Einsparung an Energiekosten durch die verbesserte Wärmedämmung.

In einer Analyse der beiden Kurven in Bild 20 soll das Zusammenwirken dieser Einflüsse an einem Beispiel dargestellt werden. Die Kurve für den Plattenwärmetauscher zeigt eine Unstetigkeit bei $j = 16 \%$ /Jahr, die des Röhrenwärmetauschers bei $j = 10 \%$ /Jahr. In den Darstellungen der minimalen jährlichen Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Energiepreissteigerung in Bild 24 wiederholen sich diese Unstetigkeiten bei den gleichen Werten der Energiepreissteigerung. Da die Abhängigkeit der minimalen Jahreskosten für den Bilanzausgleich ohne Wärmetauscher keine Unstetigkeiten aufweist, läßt sich aus dem Verlaufen der Kurven in Bild 24 ersehen, warum die beiden in Bild 20 dargestellten Abhängigkeiten zueinander ungleichmäßig verlaufen.

Um die Unstetigkeiten in den Kurven des Bildes 24 erklären zu können, wurden in der Tabelle 17 die für die verschiedenen Energiepreissteigerungen errechneten Jahreskosten und mittleren k -Werte zusammengestellt, und zwar für die beiden Fälle der Wärmerückgewinnung mit einem Platten- bzw. Röhrenwärmetauscher. Bei Verwendung des Plattenwärmetauschers ergibt sich beim Anstieg der Energiepreissteigerung von 14 auf 16 %/Jahr eine derartige Steigerung der Energiekosten, daß eine sprunghafte Verringerung des k -Wertes und damit der Energiekosten zu insgesamt geringeren minimalen jährlichen Gesamtkosten führt. Auf gleiche Weise erklärt sich die Unstetigkeit für den Fall des Röhrenwärmetauschers bei $j = 10 \%$ /Jahr.

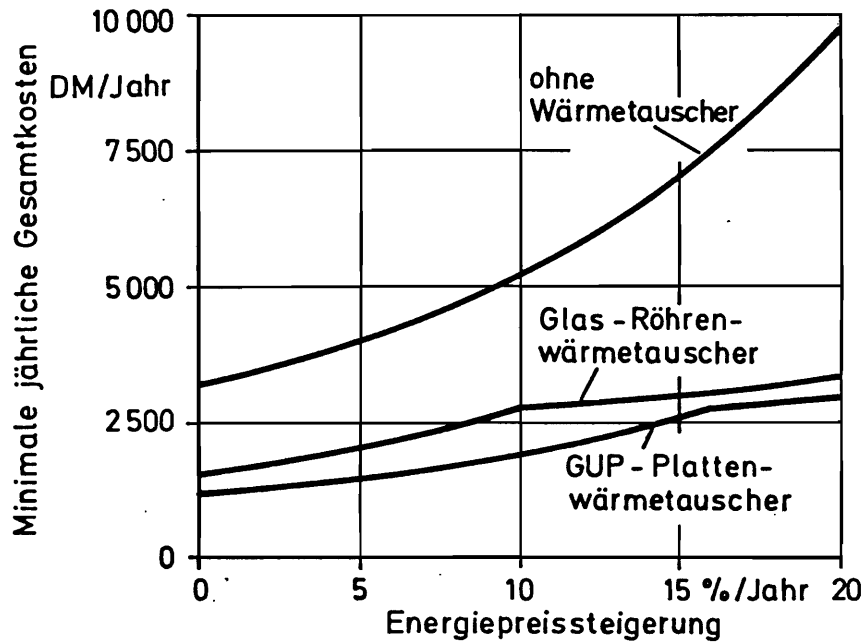


Bild 24: Minimale jährliche Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Energiepreissteigerung

Belegung mit Mastkälbern; Standort: München

Die Auswirkungen der anderen genannten Einflüsse werden z.T. ebenfalls in den Werten der Tabelle 17 erkennbar.

Tabelle 17: Jahreskosten und mittlerer k-Wert in Abhängigkeit von der Energiepreissteigerung j
Belegung mit Mastkälbern, Standort: München

j	$\dot{K}_{ges}$	$\dot{K}_{I,WD}$	$\dot{K}_{BS,LR}$	$\dot{K}_{BS,H}$	k_m
%/Jahr	DM/Jahr				W/(m ² K)
GUP-PLATTENWÄRMETAUSCHER					
0	1 189	566	332	291	1.035
2	1 299	566	391	342	1.035
4	1 437	566	465	406	1.035
6	1 576	807	548	221	0.885
8	1 737	807	663	267	0.885
10	1 932	933	803	196	0.804
12	2 159	933	985	241	0.804
14	2 444	933	1 214	297	0.804
16	2 817	2 458	350	9	0.467
18	2 905	2 458	435	12	0.467
20	3 010	2 568	430	12	0.458
GLAS-RÖHRENWÄRMETAUSCHER					
0	1 564	566	703	295	1.035
2	1 741	566	828	347	1.035
4	1 961	566	983	412	1.035
6	2 204	807	1 163	234	0.885
8	2 495	807	1 405	283	0.885
10	2 799	2 458	335	6	0.467
12	2 876	2 458	411	7	0.467
14	2 974	2 458	507	9	0.467
16	3 071	2 568	494	9	0.458
18	3 195	2 568	616	11	0.458
20	3 352	2 568	770	14	0.458

4.2.4 Zusammenfassung

Die wirtschaftliche Optimierung des Ausgleiches von Wärmebilanzdefiziten durch Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme in Luft/Luft-Wärmetauschern und Heizung erfordert im allgemeinsten Fall die Berechnung der minimalen jährlichen Gesamtkosten für die verschiedenen möglichen bzw. in Betracht zu ziehenden Kombinationen von Wärmedämm-Maßnahmen und Wärmetauschertypen bzw. -ausführungen. Die insgesamt geringsten jährlichen Gesamtkosten führen dann zu der Kombination aus Wärmedämmung-Wärmetauscher, die den Wärmebilanzausgleich in wirtschaftlich optimaler Weise ermöglicht.

Die für die Berechnungen erforderlichen technischen und finanziellen Kenndaten sind z.Zt. noch nicht von allen, für den Einsatz in Ställen in Frage kommenden Wärmetauschern bekannt. Es wurde daher zunächst ein Rechenverfahren entwickelt, mit dem sich die Maximalwerte wirtschaftlich sinnvoller Investitionen in einen bestimmten Wärmetauscher bei den verschiedenen, sich in der Praxis anbietenden Einsatzfällen ermitteln lassen. Der Vergleich mit dem Investitionsaufwand für den Wärmetauscher erlaubt es dann, die wirtschaftlich sinnvollen Einsatzfälle abzugrenzen.

Vergleichsberechnungen für einen im Selbstbau erstellbaren Plattenwärmetauscher und einen auf dem Markt erhältlichen Glas-Röhrenwärmetauscher ergaben, daß der Plattenwärmetauscher bei Belegung des für die Berechnungen verwendeten Modellstalles mit Milchkühen, Mastbullen und Mastkälbern wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden könnte, während der um den Faktor 2.4 teurere Glas-Röhrenwärmetauscher nur im Mastkälberstall einen wirtschaftlichen Ausgleich der Wärmebilanzdefizite zuläßt.

Die Untersuchung der Abhängigkeiten der Maximalwerte wirtschaftlich sinnvoller Investitionen von den finanziellen Kenngrößen ergab, wie erwartet, eine Abnahme der maximalen Investitionen mit steigendem Zinssatz. Zunehmende Energiepreissteigerungen und Nutzungsdauern führen dagegen zu höheren Investitionen.

4.3 Wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Biogasreaktoren

4.3.1 Problemstellung, Literaturübersicht

Bei der mit den steigenden Energiepreisen wieder interessant gewordenen Biogasgewinnung spielt die Prozeßtemperatur eine wesentliche Rolle. Die anaerobe Vergärung der organischen Substanzen in einem luftdicht abgeschlossenen Biogasreaktor hat, je nachdem welche Bakterienstämme für den Gärprozeß verantwortlich sind, verschiedene hinsichtlich der Gasausbeute optimale Temperaturbereiche. Folgende Prozeßtemperaturen werden für den Betrieb von Biogasanlagen angegeben:

15°C	psychrophile Vergärung
35°C	mesophile Vergärung
55°C	thermophile Vergärung

Die mesophile und thermophile Vergärung erfordern damit das ganze Jahr über, die psychrophile Vergärung während des größten Teiles des Jahres eine Zufuhr von Wärmeenergie, damit der Transmissionswärme-Verlust über die Wand des Biogasreaktors ausgeglichen und die Prozeßtemperatur konstant gehalten werden kann.

Wie schon in Abschnitt 3.2 gezeigt, läßt sich die Wärmebilanz eines nicht belüfteten Raumes, wie ihn der Biogasreaktor darstellt, über die Wärmedämmung der Behälterwand verbessern und mit zugeführter Wärmeenergie ausgleichen, z.B. durch Verbrennen eines Teiles der erzeugten Biogasmenge. Die Fragestellung, welcher Investitionsaufwand für die Wärmedämmung, d.h. welcher k-Wert und welche Dämmschichtdicke wirtschaftlich sinnvoll sind, führt dann zu der Aufgabe, die Wärmedämmung des Biogasreaktors wirtschaftlich zu optimieren.

Derartige Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen erfolgten bisher nur für einzelne Objekte (siehe z.B. [23]). Die gewonnenen Aussagen lassen sich daher nur in begrenztem Umfang verallgemeinern. Die Rechenformeln des folgenden Abschnitts dagegen sind allgemeingültig und erlauben zudem eine Analyse der Einflußgrößen.

4.3.2 Rechenformeln für die Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung

Die in Abschnitt 3.2.6.2 abgeleiteten Gl. (50) und (51) für den optimalen k-Wert bzw. die optimale Dämmschichtdicke der Hülle eines nicht belüfteten Raumes:

$$k_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{\lambda a'_N K_{I,WD}^{**}}{G_h K'_E}}$$

$$s_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{\lambda G_h K'_E}{a'_N K_{I,WD}^{**}}} - \frac{\lambda}{k_o}$$

gelten auch für die Wärmedämmung eines Biogasreaktors, sofern nur ein Bauelement die Reaktorwand bildet bzw. wärmegeklämt wird. Dies ist in der Praxis im allgemeinen der Fall. Bei mehreren Bauelementen gilt das in Abschnitt 3.2.6.2 Gesagte.

Die im Biogasbehälter anfallende Reaktionswärme ist eine zusätzliche Wärmequelle, deren Größe aber nicht den optimalen k-Wert, sondern nur die Höhe der minimalen Jahreskosten beeinflusst.

Mit den Gl. (9) und (46)

$$a'_N = \frac{\Upsilon (q/\Upsilon)^N [(q/\Upsilon) - 1]}{(q/\Upsilon)^N - 1} \quad \text{für } i \neq j$$

$$a'_N = \frac{q}{N} \quad \text{für } i = j$$

$$K'_E = 0.0036 \frac{K'_B}{\eta_{H_U}^H}$$

sowie mit den Werten G_h in Tabelle 1 sind dann alle Berechnungsgrundlagen gegeben, um im Einzelfall den wirtschaftlich optimalen k-Wert und die entsprechende Dämmschichtdicke zu errechnen, aber auch, um untersuchen zu können, wie sich die einzelnen Bestimmungsgrößen auf die Werte dieser Bauelement-Kenngrößen auswirken.

4.3.3 Auswirkung verschiedener Einflußgrößen auf die Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung

4.3.3.1 Wärmeleitfähigkeit, volumenbezogener Dämmstoffpreis, Energiepreis, Heizgradstunden

Der Einfluß der baustoffspezifischen Größen λ -Wert und volumenbezogener Baustoffpreis sowie des Energiepreises und der standortabhängigen Heizgradstunden auf den optimalen k -Wert und die entsprechende Dämmschichtdicke läßt sich vergleichbarer machen und verdeutlichen, wenn man die mit den Bestimmungsgrößen F geänderten k_{opt} - und s_{opt} -Werte auf ihre Werte bei den Ausgangswerten F_o der Bestimmungsgrößen bezieht.

Es gilt nach Gl. (50):

$$\begin{aligned} \frac{k_{\text{opt}} (F = n F_o)}{k_{\text{opt}} (F_o)} &= \sqrt{n} \quad \text{für } F = \lambda, K_{I,WD}^{**} \\ &= \sqrt{\frac{1}{n}} \quad \text{für } F = K_E', G_h \end{aligned} \quad (75)$$

λ und $K_{I,WD}^{**}$ wirken sich also in gleicher Weise auf k_{opt} aus, ebenso K_E' und G_h . Eine Verdoppelung des volumenbezogenen Preises oder des λ -Wertes führt zu einem um den Faktor $\sqrt{2} = 1.41$ vergrößerten optimalen k -Wert, während sich für einen doppelt so hohen Energiepreis oder G_h -Wert ein k_{opt} -Wert in Höhe des $\sqrt{1/2} = 0.71$ fachen des Ausgangswertes errechnet.

Für die optimale Dämmschichtdicke läßt sich eine ähnliche Vergleichsbasis schaffen, wenn man die auf der rechten Seite von Gl. (51) stehende Größe λ/k_o als Ausgangs-Dämmschichtdicke s_o interpretiert und zu s_{opt} addiert:

$$s_{\text{opt,ges}} = s_{\text{opt}} + s_o$$

Es folgt dann:

$$\begin{aligned} \frac{s_{\text{opt,ges}} (F = n F_o)}{s_{\text{opt,ges}} (F_o)} &= \sqrt{\frac{1}{n}} \quad \text{für } F = K_{I,WD}^{**} \\ &= \sqrt{n} \quad \text{für } F = K_E', G_h \end{aligned} \quad (76)$$

Diese vereinfachte Darstellung ist für die Untersuchung des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit nicht möglich, da s_o von λ abhängt.

4.3.3.2 Energiepreissteigerung, Nutzungsdauer

Wie sich die Energiepreissteigerung und die Nutzungsdauer auf die optimale Dämmschichtdicke auswirken, ist in Bild 25 für das Beispiel der Wärmedämmung einer Reaktorbehälterwand aus 16 cm Beton mit Polystyrol-Extruderschaum darstellt. Die Berechnungen erfolgten für die mesophile Vergärung ($\vartheta_i = 35^\circ\text{C}$) am Standort München ($G_h = 232\,690\text{ Kh/Jahr}$) mit folgenden Rechenwerten:

λ	=	0.035	W/(mK)
$K_{I,WD}$	=	460.00	DM/m ³
k_o	=	3.5	W/(m ² K)
K'_E	=	$7.5 \cdot 10^{-5}$	DM/Wh
i	=	5	%/Jahr

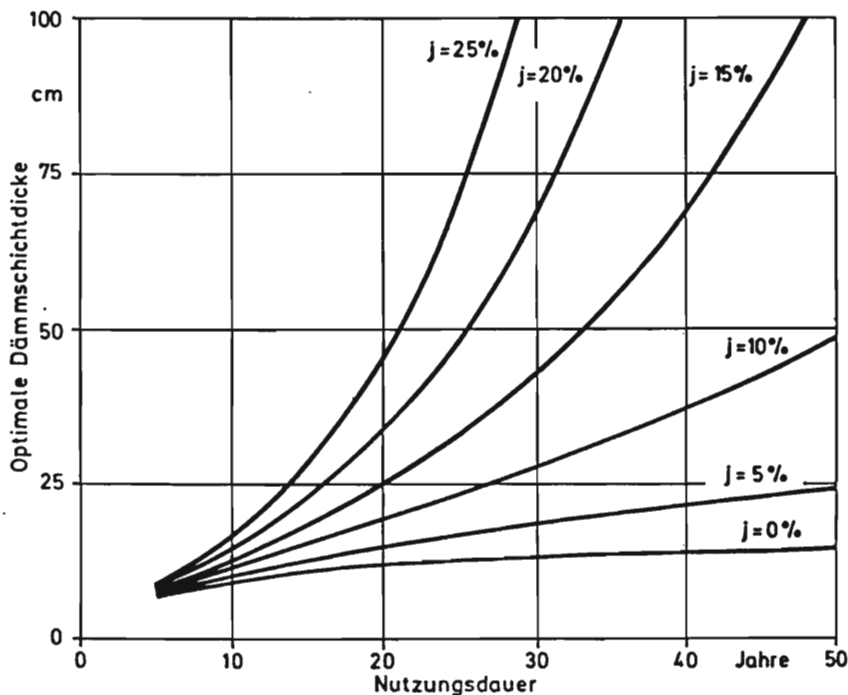


Bild 25: Wirtschaftlich optimale Dämmschichtdicken für Polystyrol-Extruderschaum in der Betonbehälterwand eines Biogasreaktors in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer; Energiepreissteigerung j als Parameter

Es zeigt sich, daß bei der heutzutage realistischen Energiepreissteigerung von 10 %/Jahr bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren 12 cm Polystyrol-Extruderschäum wirtschaftlich optimal sind. Bei der sicherlich gegebenen Nutzungsdauer von 20 Jahren kommt man sogar auf 19 cm Dämmschichtdicke.

Bei einer Wertung dieser Ergebnisse ist zu beachten, daß das für diese Dämmschichtdicken erforderliche Investitionskapital nicht in allen Fällen zur Verfügung steht.

4.3.4 Zusammenfassung

Die Anwendung der für einen nichtbelüfteten Raum abgeleiteten Gleichungen zur Bestimmung der Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanzausgleiches auf die Wärmedämmung von Biogas-Reaktorbehältern ermöglicht es, für die Berechnung des wirtschaftlich optimalen k-Wertes und der entsprechenden Dämmschichtdicke eine Rechenformel anzugeben. Der wirtschaftlichste k-Wert hängt danach von folgenden Größen ab:

- Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogener Preis des Wärmedämmstoffes,
- Heizgradstunden für die Reaktortemperatur,
- Energiepreis.

Über den modifizierten Annuitätenfaktor bestehen weitere Abhängigkeiten vom Zinssatz sowie von der Energiepreissteigerung und der Nutzungsdauer.

Es wurde untersucht, in welcher Weise sich diese Einflußgrößen auf den wirtschaftlich optimalen k-Wert und auf die wirtschaftlichste Dämmschichtdicke auswirken.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die zunehmende Energieverteuerung ist auch im Bereich der Landwirtschaft Ausgangspunkt neuer Überlegungen und Entwicklungen, die das Ziel verfolgen, Energie einzusparen und konventionelle Energieträger, vor allem das Erdöl, zu ersetzen. Dabei kommt es nicht nur darauf an, die Funktionsfähigkeit geeigneter technischer Einrichtungen sicherzustellen, letztlich ist es für die breite Einführung von Neuentwicklungen entscheidend, daß sie die Energieprobleme kostengünstiger lösen können.

Besondere Bedeutung kommt dabei der Aufgabe zu, Wärmeenergie einzusparen und Alternativen zur Heizung zu entwickeln, da auch im landwirtschaftlichen Betrieb sehr viel Energie als Wärmeenergie verbraucht wird, also um die Temperatur in Räumen konstant halten, d.h. aber um Defizite in der Wärmeenergiebilanz der Räume ausgleichen zu können. Dafür bieten sich als Alternativen zur Heizung eine Verbesserung der Wärmedämmung sowie bei belüfteten Räumen die Rückgewinnung von Lüftungs- und Transmissionswärme an. Es ergibt sich damit das Problem, eine Entscheidung zwischen mehreren Alternativen treffen zu müssen. Als Entscheidungskriterien reichen die technischen Kennwerte der Wärmedämmkonstruktionen und der Anlagen zur Wärmerückgewinnung nicht aus, es müssen auch die anfallenden Investitionen und die laufenden Betriebskosten in einem Rechenverfahren zusammengeführt werden, mit dem sich die wirtschaftlichste Kombination der sich anbietenden technischen Maßnahmen ermitteln läßt.

In der vorliegenden Arbeit wurde zunächst eine allgemeine Methode zur Lösung dieses Problems dargestellt. Als Wirtschaftlichkeitskenngröße dienen dabei die jährlichen Gesamtkosten, die sich aus den Investitions- und Betriebskosten der technischen Einrichtungen zur Verminderung der Wärmebilanzdefizite und aus den Energiekosten für den Ausgleich des nach den Investitionen noch verbleibenden Bilanzdefizites zusammensetzen. Die wirtschaftlichste Kombination aller in eine Untersuchung einbezogenen technischen Einrichtungen ergibt sich dann aus deren Kennwerten bei dem Minimum der jährlichen Gesamtkosten.

Um die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten des entwickelten Verfahrens der wirtschaftlichen Optimierung aufzeigen zu können, wur-

den drei Beispiele von Maßnahmen zum Ausgleich von Wärmebilanzdefiziten aus dem landwirtschaftlichen Bereich ausgewählt:

- Wärmedämmung und Heizung von Ställen,
- Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme und Heizung in Ställen,
- Wärmedämmung und Heizung von Biogasreaktoren.

Die Berechnungen erfolgten zunächst für bestimmte Anwendungsfälle, wie sie in der Praxis vorkommen können. Da in den Berechnungsgleichungen des Optimierungsverfahrens alle Einflußgrößen explizit enthalten sind, war es weiterhin möglich, zu untersuchen, wie sich Veränderungen einzelner Einflußgrößen auf die minimalen jährlichen Gesamtkosten auswirken. Diese Analyse führt zu den Haupteinflußgrößen, deren Rechenwerte die tatsächlichen Gegebenheiten besonders genau beschreiben müssen, um bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung praxisrelevante Ergebnisse erhalten zu können.

Für den Fall, daß die Wärmebilanzdefizite von Ställen über die Wärmedämmung und mit einer Heizung ausgeglichen werden sollen, erhält man die minimalen jährlichen Gesamtkosten durch Variation des k-Wertes der Stallhülle. Es ist dies ein mittlerer k-Wert, wenn die Stallhülle aus mehreren unterschiedlichen Bauelementen besteht. Jeder mittlere k-Wert läßt sich dann aus einer Vielzahl von Kombinationen der Bauelement-k-Werte erreichen, mit entsprechend unterschiedlichen Investitionen. Es ergibt sich als weitere Optimierungsaufgabe, die k-Wert-Verteilung mit minimaler Gesamtinvestition zu ermitteln. Bei Wärmedämm-Maßnahmen in nur zwei Bauelementen ist eine exakte Berechnung möglich. Das EDV-Rechenprogramm WAEDAM enthält die entsprechenden Berechnungsgleichungen. Da die handelsüblichen Wärmedämmstoffe vielfach nur in zentimeterweise veränderlichen Dicken erhältlich sind, wurde weiterhin das Rechenprogramm WAEDOP ausgearbeitet, bei dem die minimalen Jahreskosten durch Veränderung der Dämmschichtdicken zweier Bauelemente in Zentimeterschritten iterativ ermittelt werden. Mit den minimalen Jahreskosten sind dann auch der wirtschaftlich optimale mittlere k-Wert der Stallhülle und die k-Werte, Dämmschichtdicken und Investitionen für die beiden Bauelemente festgelegt. Die Berech-

nungsgrundlagen beider Rechenprogramme wurden im Detail dargestellt.

Die Anwendung des Rechenprogrammes WAEDOP auf einen Modellstall, der an den Standorten Oberstdorf, München und Hamburg mit Milchkühen, Mastbullen und Mastkälbern belegt sein sollte, diente der Veranschaulichung des entwickelten Rechenverfahrens zur wirtschaftlichen Optimierung der Wärmedämmung von Ställen. Bei der Untersuchung zur Auswirkung einzelner Einflußgrößen auf die minimalen jährlichen Gesamtkosten zeigte es sich, daß die Rechenwerte der beiden Größen Wärme- und Wasserdampfverlust der Tiere in Bezug auf die Praxisrelevanz die höchste Genauigkeit aufweisen müssen.

Soll zusätzlich zur Wärmedämmung und Heizung auch noch die Rückgewinnung von Lüftungswärme als weitere Alternative für den Wärmebilanzausgleich von Ställen in Betracht gezogen werden, läßt sich die Auswirkung des Wärmetauschers auf die Wärmeenergiebilanz mit der technischen Kenngröße Temperaturaustauschgrad beschreiben.

Über die für jede Art und Ausführung von Luft/Luft-Wärmetauschern charakteristische Abhängigkeit des Temperaturaustauschgrades vom Volumenstrom der Lüftung ist zu berechnen, wie stark die Außenluft (Zuluft) im Wärmetauscher von der Abluft erwärmt wird. Der Einsatz des Wärmetauschers führt dann zu niedrigeren Bilanzdefiziten und entsprechend geringeren Heizkosten denen aber Kosten für den erhöhten Strombedarf zum Ausgleich der Druckverluste durch den Wärmetauscher gegenüberstehen. Auch für diesen Fall führen die durch Variation des k-Wertes ermittelten minimalen jährlichen Gesamtkosten zu dem wirtschaftlich optimalen k-Wert, d.h. aber zu den Kennwerten des wirtschaftlich optimalen Wärmebilanzausgleiches durch Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme und Heizung beim Einsatz eines bestimmten Wärmetauschers.

Der Maximalwert wirtschaftlich sinnvoller Investitionen in diesen Wärmetauscher läßt sich dann aus der Differenz der minimalen jährlichen Gesamtkosten für den Bilanzausgleich ohne bzw. mit Wärmetauscher errechnen. Dafür wurde das EDV-Rechenprogramm WABILOP ausgearbeitet, bei dem in einem ersten Rechengang die minimalen Jahreskosten für den Bilanzausgleich ohne Wärmetauscher mit dem Programm WAEDOP errechnet werden. Der zweite Rechengang berücksichtigt in einer Modifikation des Programmes WAEDOP die erhöhten Zulufttemperaturen und die Stromkosten beim Einsatz des Wärmetauschers.

Zur Veranschaulichung des Rechenverfahrens wurde untersucht, wie sich der Einsatz eines Platten- bzw. eines Röhrenwärmetauschers auf die Kennwerte des wirtschaftlich optimalen Bilanzausgleiches auswirkt und welche maximalen Investitionen den Bereich wirtschaftlicher Investitionen in diese Wärmetauscher begrenzen. Der betrachtete Glas-Röhrenwärmetauscher hatte höhere Temperatúraustauschgrade als der Wärmetauscher aus glasfaserverstärkten Polyesterplatten, aber auch fast doppelt so hohe Gesamtdruckverluste. Die Berechnungen ergaben, daß der Einsatz des Plattenwärmetauschers bei der Belegung des für die Untersuchung verwendeten Modellstalles mit Milchkühen, Mastbullen und Mastkälbern wirtschaftlich ist, während der um den Faktor 2.4 teurere Glas-Röhrenwärmetauscher nur im Mastkälberstall zu einem wirtschaftlichen Bilanzausgleich führt.

Die Untersuchungen zur Abhängigkeit der Maximalwerte wirtschaftlich sinnvoller Investitionen von den finanziellen Kenngrößen brachten erwartete Ergebnisse: Zunehmende Energiepreisssteigerungen und Nutzungsdauern ergeben steigende Investitionen, während höhere Zinssätze eine Abnahme der maximalen Investitionen zur Folge haben.

Die Anwendung des Optimierungsverfahrens auf das Problem des Wärmebilanzausgleiches eines Biogasreaktors durch Wärmedämmung und Heizung ergab, wenn nur ein Bauelement zu betrachten ist, eine Rechenformel für den wirtschaftlich optimalen k-Wert und für die zu diesem k-Wert führende Dämmschichtdicke. Folgende Einflußgrößen bestimmen diese beiden Kennwerte der wirtschaftlich optimalen Wärmedämmung:

- Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogener Preis des Dämmstoffes,
- Heizgradstunden für die Reaktortemperatur,
- Energiepreis,
- Zinssatz, Energiepreisssteigerung, Nutzungsdauer sowie
- bei der Dämmschichtdicke: der Ausgangs-k-Wert.

Die Auswirkung von Änderungen dieser Größen auf den k-Wert und die Dämmschichtdicke wurde untersucht.

6. LITERATURVERZEICHNIS

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- /1/ ABSHOFF, A.J.: Stallklima und Stallklimagegestaltung
Vortrag anlässlich einer Arbeitssitzung der KTBL-Arbeits-
gemeinschaft "Agrartechnik in der Rinderhaltung"
am 23. 11. 79

- /2/ BERBER, J.: Wirtschaftlich optimaler Wärmeschutz
Heiz.-Lüft.-Klimatechn.-Haustechn. (HLH) 29 (1978) Nr. 10,
S. 389 - 392

- /3/ BORCHERT, K.L.: Rückgewinnung von Transmissionswärme in
dauerbelüfteten Warmställen.
Landbauforschung Völkenrode 28 (1978) Nr. 2, S. 57 - 62

- /4/ CHRISTIANSON, L.L., HELLICKSON, M.A.: Simulation and Opti-
mization of Energy Requirements for Livestock Housing.
Transactions of the ASAE 20 (1977) Nr. 2, S. 327 - 335

- /5/ DÄUMLER, K.: Die optimale Wärmedämmung als investitions-
rechnerisches Problem.
Heiz.-Lüft.-Klimatechn.-Haustechn. (HLH) 27 (1976) Nr. 6,
S. 203 - 205

- /6/ EGGENBERGER, A.: Wirtschaftlich optimaler Wärmeschutz.
Schweiz.Baubl. 89 (1978) Nr. 28, S. 32, 34 - 36

- /7/ ENGLERT, G.: Beeinflussung des Wärmehaushaltes von Stall-
gebäuden.
Landtechnik 35 (1980) Nr.1, S. 20 - 22

- /8/ ENGLERT, G.: Ein Rechenmodell für die Wärmeenergiebilanz
von Ställen.
Grundl. Landtechnik 30 (1980) Nr. 5, S. 170 - 174

- /9/ ENGLERT, G.: Zur Berechnung minimaler Investitionen für die Wärmedämmung.
Bauphysik 2 (1980) Nr. 6, S. 213 - 217
- /10/ ENGLERT, G.: Wirtschaftlich optimale Wärmedämmung von Biogasanlagen.
Grundl. Landtechnik 31 (1981) Nr. 3, S. 77 - 80
- /11/ ENGLERT, G.: Wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen.
Grundl. Landtechnik 31 (1981) Nr. 4, S. 109 - 116
- /12/ HENNESSY, R.: Optimum wall insulation for cold climates.
Proc. ASCE 103 (1977) Nr. C 03, S. 529 - 535
- /13/ HILLIGER, H.G.: Wie läßt sich die DIN 18910 verbessern ? Überlegungen zu ihrer Überarbeitung.
Landtechnik 36 (1981) Nr. 3, S. 133 - 136
- /14/ JANSSEN, J., SCHOEDDER, F.: Ableitung von Luftzustandsgrößen aus meteorologischen Daten.
Grundl. Landtechnik 30 (1980) Nr. 3, S. 81 - 90
- /15/ ● JÜTTEMANN, H.: Wärmerückgewinnung in raumluftechnischen Anlagen.
Karlsruhe: C.F. Müller 1980
- /16/ KLINKENBERG, D.: Bemessung wirtschaftlicher Dämmschichtdicken.
wksb (1980) Nr. 10, S. 5 - 9
- /17/ ● KÖHNE, M.: Theorie der Investition in der Landwirtschaft.
Hamburg/Berlin: Paul Parey 1966
- /18/ ● KOSIOL, E.: Finanzmathematik.
Wiesbaden: Dr. Th. Gabler 1973

- /19/ ● KÜSGEN, H.: Planungsökonomie. Was kosten Planungsentscheidungen ?
Stuttgart: Karl Krämer 1970
- /20/ LEUSCHNER, P.: Neue Regelsysteme bei der Zwangslüftung.
Referateband des Weißenstephaner Baugesprächs 1982.
Landtechnik Weißenstephan 1982
- /21/ MÜLLER, A.: Der Wärmefall von Rindern.
Zulassungsarbeit, Institut für Landtechnik der TU
München, 1980
- /22/ NILSSON, CHR., SÄLLVIK, KR.: Beräkning av energieförbrukning för uppvärmning och ekonomisk val av värmeisolering in svinstallar.
Lund: Sveriges Landtbruksuniversitet, Specialmeddelande 66
Institutionen för Landbrukets Byggnadsteknik (LBT) 1977
- /23/ PERWANGER, A.: Erfahrungen mit Biogasanlagen.
Bauen für die Landwirtschaft (1982) Nr. 2. S. 22 - 28
- /24/ ● ROUVEL, L.: Raumkonditionierung. Wege zum energetisch optimierten Gebäude.
Berlin: Springer 1978
- /25/ SAILLER, W.: Luft/Luft-Wärmetauscher in Viehställen -
Bisherige Erfahrungen und Entwicklungen.
Landtechnik 36 (1981) Nr. 1, S. 11 - 14
- /26/ ● SCHNEIDER, W.: Wirtschaftlichkeitsrechnung - Theorie der Investition.
Tübingen: J.C.B. Mohr 1968
- /27/ SCHÜLE, W.: Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Wärmedämmung von Wänden im instationären Zustand.
Gesundheits-Ingenieur 78 (1957) Nr. 19/20, S. 3 - 18
- /28/ SENS, K.-D.: Erfahrungen mit Wärmetauschern einer Luft/Luft-Wärmepumpe in einem Schweinestall.
Landtechnik 35 (1980) Nr. 7, S. 327 - 329

- /29/ STEINHAUSER, H., LANGBEHN, C., PETERS, U.: Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre, Band 1: Allgemeiner Teil.
Stuttgart: Eugen Ulmer 1972
- /30/ STRØM, J.S., FEENSTRA, A.: Wärmeabgabe bei Rindern, Schweinen und Geflügel.
KTBL-Arbeitspapier 69, 1980
- /31/ VOGT, S.: persönliche Mitteilung
- /32/ WENNER, H.-L.: Zur Energiesituation der Landwirtschaft - Probleme und Folgerungen.
Bayer.Landw.Jahrbuch 57 (1980) Nr. 2. S. 23 - 46
- /33/ WERNER, H.: Methoden zur wirtschaftlichen Optimierung von Wärmedämm-Maßnahmen.
Bauphysik 2 (1980) Nr. 5, S. 167 - 169
- /34/ WERNER, H., GERTIS, K.: Zur Wahl von Kalkulationsmethoden bei der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen.
Baumasch.u.Bautechn. (BMT) 26 (1979)Nr. 2, S. 65 - 66, 69 - 72
- /35/ ZEISIG, D.: persönliche Mitteilung
- /36/ ZOTTMANN, G.: Fast 60 % Heizöl eingespart.
DLG-Mitteilungen 95 (1980) Nr. 21, S. 1236 - 1237
- /37/ VDI-Arbeitsmappe "Heizung, Lüftung, Klimatechnik".
- /38/ DIN 18910 "Klima in geschlossenen Ställen:
Wasserdampf- und Wärmehaushalt im Winter, Lüftung, Beleuchtung.
Berlin: Beuth-Verlag 1974

EDV-Programme

- /39/ WENDL, G., ENGLERT, G.: WAEDAM (Wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen)
 Programmbibliothek der Landtechnik Weihenstephan 1980
- /40/ ENGLERT, G.: WAEDOP (Wirtschaftliche optimale Wärmedämmung von Ställen)
 Programmbibliothek der Landtechnik Weihenstephan 1981
- /41/ ENGLERT, G.: WABILOP (Wirtschaftliche Optimierung des Wärmebilanzausgleiches bei Ställen)
 Programmbibliothek der Landtechnik Weihenstephan 1982