

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   | Energiepreisssteigerung, Nutzungsdauer                                                                      | 106 |

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