

## Minimalanforderungen an die Bauhülle – am Beispiel eines Rindviehstalles

Ludo Van Caenegem, Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon.

Überproduktion in den Industriestaaten und Liberalisierung des Welthandels drücken die Marktpreise und gefährden die Existenzsicherheit der kleineren Betriebe. Überlebenschancen bestehen langfristig meistens nur in der Betriebsvergrößerung oder in einer Verlagerung vom Haupt- zum Nebenerwerbsbetrieb. Damit aber Arbeitskapazität für zusätzliche Aktivitäten frei wird, muss in den meisten Betrieben die Produktivität erhöht werden. Dies ist vielfach nur möglich, indem Arbeit durch Kapital (Einrichtungen und Maschinen) ersetzt wird.

Die Wirtschaftlichkeit dieses Vorgehens wird oft vom Paradox geprägt, dass Investitionen getätigt werden, welche sich trotz Subventionen nicht mehr allein aus der Landwirtschaft finanzieren lassen und für dessen Rückzahlung daher ein ausserlandwirtschaftliches Einkommen erzielt werden muss. In diesem Spannungsfeld muss der Bau von landwirtschaftlichen Betriebsgebäuden gesehen werden. Die üblichen Investitionskosten übersteigen für kleinere Betriebe vielfach das wirtschaftlich Tragbare.

Die Baukostensteigerung ist nicht nur den vielen Vorschriften zuzuschreiben, sie ist zum Teil auch auf einen Baustil zurückzuführen, der weit über die minimalen Anforderungen für eine umwelt-, menschen- und tiergerechte Lösung hinausgeht.

Können heutzutage noch Bauten, welche diesen minimalen Anforderungen genügen, im Rahmen des wirtschaftlich Tragbaren erstellt werden? In diesem Bericht wird versucht, durch eine Optimierung von bauphysikalischen, mechanischen und wirtschaftlichen Faktoren Wege aufzuzeigen, welche unter Berücksichtigung berechtigter Ansprüche von Mensch und Tier zu wesentlichen Kosteneinsparungen führen können.

### 1. Bauphysikalische Anforderungen an die Bauhülle

Die Bauhülle hat zum Zweck, einerseits Menschen, Tiere und Materialien gegen ungünstige klimatologische Bedingungen zu schützen und andererseits die Belastungen von Luft und Wasser, welche von der Nutztierhaltung ausgehen, für die Umwelt gering zu halten und das Landschaftsbild möglichst nicht zu stören.

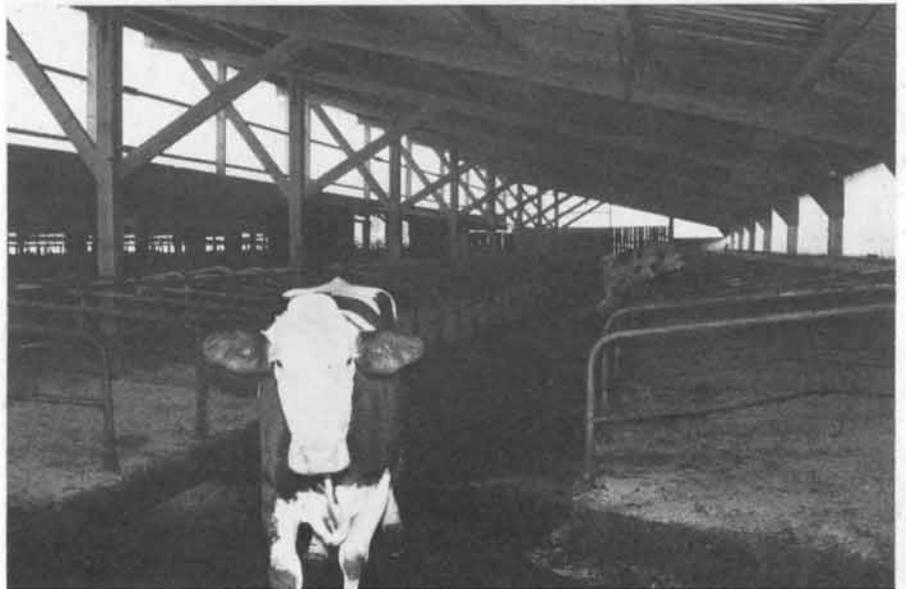


Abb.1: Wesentliche Kosteneinsparungen sind auch möglich, ohne dass auf Wände verzichtet werden muss.

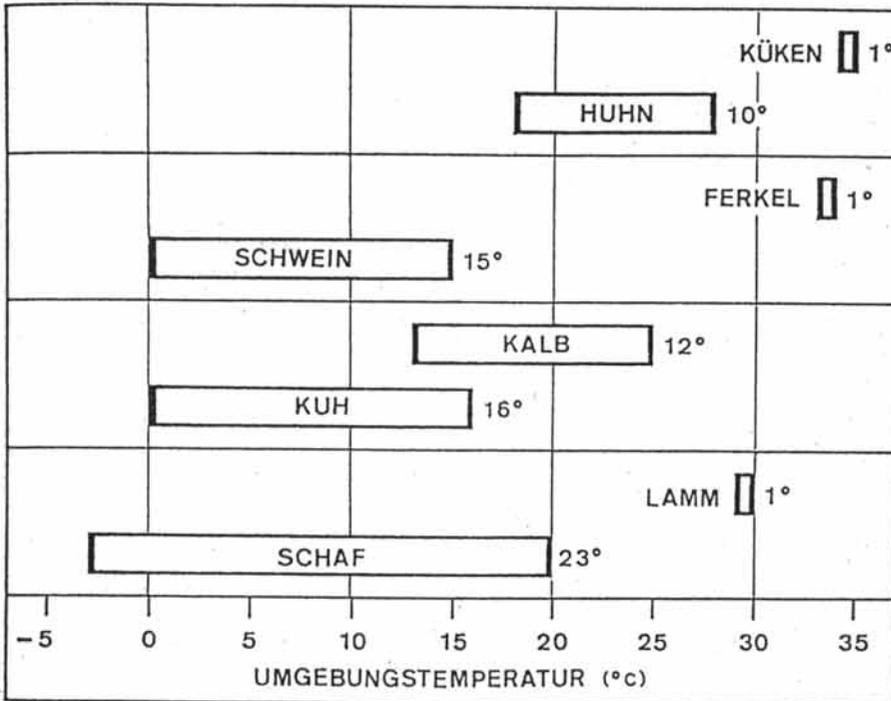


Abb.2: Zonen thermischer Indifferenz. Aus Bianca (1969 b).

## Wärmedämmung

### Kälteschutz

Das Stallgebäude ist Lebensraum für das Tier und Arbeitsplatz für den Menschen. Beide haben unterschiedliche wärmephysiologische Bedürfnisse. Der Mensch kann sich aufgrund seiner Anatomie nur geringfügig der Kälte anpassen. Rinder dagegen haben einen geringen Wärmebedarf. Ihre Zone der thermischen Indifferenz liegt zwischen 0 und 15 °C (Abb. 2). Im diesem Temperaturbereich werden weder Kälte noch Wärme empfunden.

Die Umgebungstemperatur allein sagt aber zu wenig über die Klimabelastung aus. Wichtige Faktoren sind ebenfalls die Strahlung, die Luftgeschwindigkeit, die Feuchtigkeit (Regen, Schnee) und die Beschaffenheit des Lagers. Bei sinkender Temperatur versucht das Tier zuerst durch thermoregulatorische Massnahmen (vor allem geringere periphere Durchblutung) die Wärmeabgabe der Wärmeproduktion anzugleichen. Sind diese Möglichkeiten ausgeschöpft, bleibt nur noch eine Anpassung der Wärmebildung durch eine Erhöhung des Futtermittelsverzehrs.

Die momentane Wärmeproduktion ist keine Konstante und unterliegt je nach Aktivität und Zeitpunkt der Futteraufnahme

breiten Schwankungen. Dies hat zwei wichtige Konsequenzen. Erstens soll bei extrem tiefen Temperaturen das Futter unbeschränkt und den ganzen Tag über zur Verfügung stehen. Zweitens soll in liegender Position die Wärmeabgabe kleiner sein als in stehender, da in ruhender Lage die Wärmebildung am geringsten ist.

Das Lager ist bei Rindern, welche einzeln und in kurzen Perioden abliegen, nicht nur auf seinen vertikalen Wärme-

widerstand, sondern auch auf seine horizontale Leitfähigkeit und auf die spezifische Wärme des Materials zu überprüfen. Lager mit relativ hoher spezifischer Wärme und Leitfähigkeit wie ein Leca-Betonboden mit Gummimatte und ohne Einstreu führen trotz guter vertikaler Wärmedämmung zu starker Wärmeableitung (bis zu 300 W/m<sup>2</sup>) und genügen nicht bei tiefen Temperaturen. Dagegen gelingt es schon mit 2 cm Stroh, welches eine kurze Aufwärmungszeit und eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt, die Wärmeverluste auf 60 W/m<sup>2</sup> zu begrenzen. Als Tragfläche genügt ein normaler Betonboden mit minimaler Stärke.

In stehender Position spielt die Bewegungsfreiheit eine grosse Rolle. Sie erlaubt durch Muskelaktivität eine zusätzliche Wärmeerzeugung. Aus diesem Grund sind in Laufställen tiefere Umgebungstemperaturen als in Anbindeställen tolerierbar.

Die Herabsetzung der minimalen Stalltemperatur ermöglicht eine drastische Reduzierung der Wärmedämmung. Wenn obendrein in der Energiebilanz bei tiefen Stalltemperaturen noch der Wärmerückfluss aus dem Boden mitberücksichtigt wird, dann dürfte aus rein energetischen Überlegungen in Laufställen für Standorte mit einem Kältekennwert über -15°C (mittlere Temperatur während drei aufeinander folgenden Tage) der absolut minimale Wärmewiderstand (d.h. der Übergangswiderstand zwischen Luft und Bauhülle) genügen.

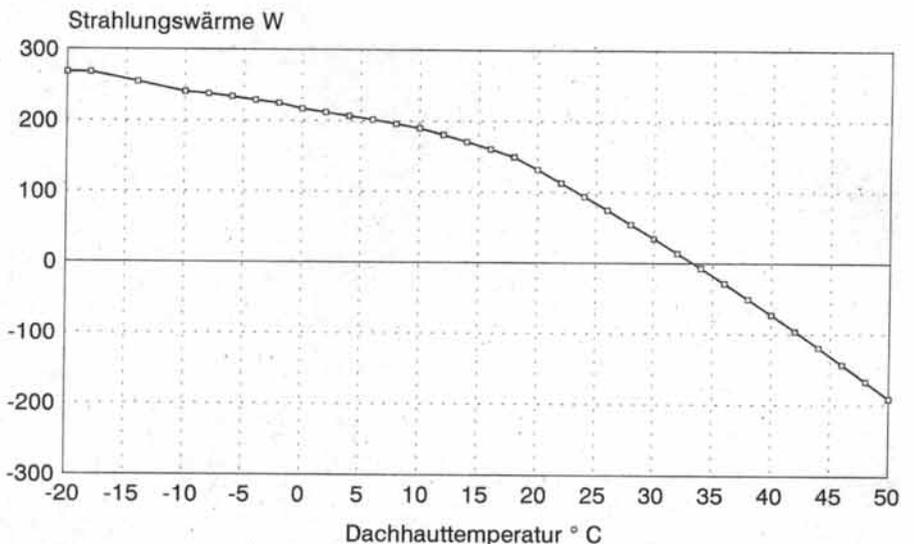


Abb.3: Berechneter Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen einer liegenden Kuh und einer nicht-isolierten Dachfläche.

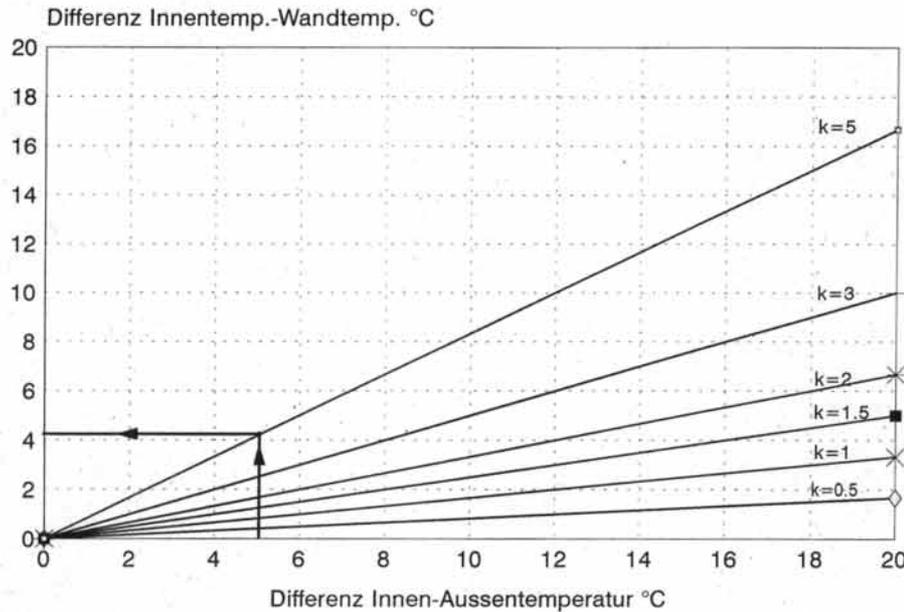


Abb.4: Differenz zwischen der Innen- und der Wandtemperatur als Funktion der Differenz zwischen der Innen- und der Aussentemperatur für unterschiedliche Wärmedämmungen (k-Wert) der Wand.

## Resistenz gegen Feuchtigkeit

Genügt es, dass die Bauhülle die extremen Temperaturen leicht abschwächt, dann werden ihr bezüglich Feuchtigkeit höhere Anforderungen gestellt. Sie soll einerseits Regen und Schnee fernhalten und andererseits erlauben, dass die im Gebäude anfallende Feuchtigkeit ohne Schaden für Tiere und Materialien abgeführt wird.

Bekanntlich bilden die Oberflächenkondensation und die Kondensation im Inneren der Materialien die grösste Gefahr.

Kondensation im Inneren der Materialien kann nur auftreten in mehrschaligen Wänden, wenn durch nicht linearen Temperaturabfall im Wandinnern die Sättigungsdampfspannung erreicht wird. Obwohl diese Dampfdiffusionsraten meistens nur sehr gering sind (übliche Werte: 0.1 bis 1 g/m<sup>2</sup>, h), kann die Ansammlung von Wasser über längere Perioden zu Bauschäden und zu einer erheblichen Herabsetzung des Isolationswertes führen. Mehrschalige Wände für Stallbauten sollen entweder auf der Innenseite mit einer Dampfsperre versehen oder innerhalb belüftet werden. Bei der Planung sollten das Wasserabsorptionsvermögen des Materials und die Möglichkeit zur Austrocknung in der wärmeren Jahreszeit berücksichtigt werden.

## Wärmeschutz

Die Bauhülle muss nicht nur auf ihren Schutz gegen Kälte, sondern auch gegen Wärme untersucht werden. Einerseits ist durch hohe Leistung (Wachstum, Milchproduktion) die Wärmeproduktion der Tiere hoch. Andererseits wird die Wärmeabgabe durch ein ungünstiges Volumen-Flächenverhältnis vom Tier und durch das Haarkleid erschwert. Hieraus folgt, dass vor allem sehr produktive Tiere schon bei relativ niedrigen Temperaturen in Hitzestress kommen. So steigt bei laktierenden Kühen die Atemfrequenz bereits bei einer Umgebungstemperatur von ca. 15°C. Von ca. 25°C an nimmt der Futtermittelverzehr und folglich auch die Leistung ab. Bei hohen Temperaturen kann eine zusätzliche Belastung entstehen, wenn die Temperatur der umgebenden Strahlungsflächen höher als die Haarkleidtemperatur des Tieres ist. Im Gegensatz zu niedrigen Temperaturen ist die thermoregulatorische Anpassungsfähigkeit der Tiere bei hohen Temperaturen viel geringer (die Hauttemperatur kann nicht beliebig erhöht werden), was deutlich aus der steil abfallenden Kurve in Abbildung 3 hervorgeht.

Dies hat als Konsequenz, dass in nicht isolierten Gebäuden, vor allem wenn andere Möglichkeiten zur Reduzierung

der Strahlungswärme wie Beschattung oder Beregnung der Dachfläche nicht möglich sind, die konvektiven Wärmeverluste (Querlüftung im Gebäude) erhöht werden müssen. Dies soll bei der Orientierung des Gebäudes und der Dimensionierung der Zuluftöffnungen mitberücksichtigt werden.

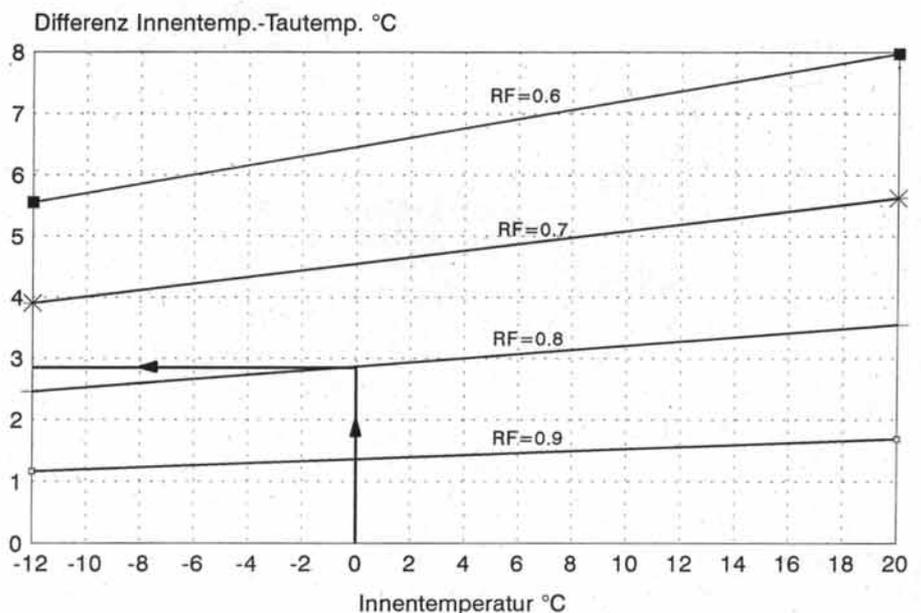


Abb.5: Differenz zwischen der Innen- und der Tautemperatur als Funktion der Innentemperatur und der relativen Feuchtigkeit innen (RF).

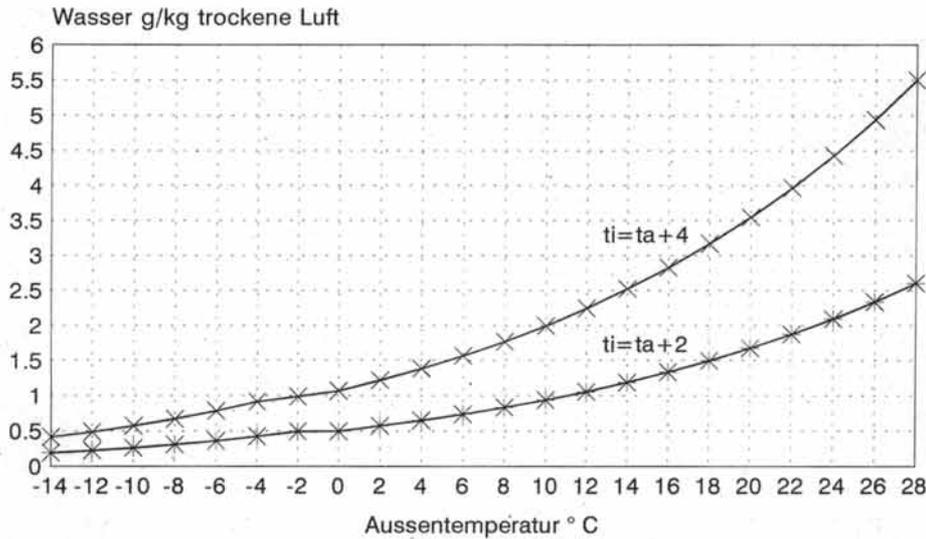


Abb. 6: Wasseraufnahmevermögen der Lüftungsluft bei einer Temperaturdifferenz innen  $t(i)$  – aussen  $t(a)$  von 2°C bzw. 4°C. Relative Feuchtigkeit innen und aussen

Das Problem der inneren Kondensation lässt sich vermeiden, wenn die Wand oder Decke einschalig ausgeführt wird. Hier sind nur die Oberflächenkondensation und die eventuelle Durchfeuchtung durch Regenwasser zu beachten. Es stellt sich die Frage, ob sich Oberflächenkondensation ohne minimale Isolation ( $k = 5 \text{ W/m}^2, \text{K}$ ) vermeiden lässt. Will man die Bildung von Tauwasser verhindern, dann darf die Wandtemperatur nicht unter die Taupunkttemperatur absinken. Letztere hängt

von der Innentemperatur und der relativen Feuchtigkeit im Stall ab. Aus den Abbildungen 4 und 5 lässt sich die Kondensationsgefahr ableiten. Beispiel: Bei einer Temperatur von  $-5^\circ\text{C}$  und einer relativen Feuchtigkeit von 100% draussen beträgt in einem nicht isolierten Stall ( $k\text{-Wert} = 5 \text{ W/m}^2, \text{K}$ ) die Temperatur  $0^\circ\text{C}$  und die relative Feuchtigkeit 80%, die Wandtemperatur (siehe Abb. 4) liegt dann  $4.2^\circ\text{C}$  unter der Innentemperatur, beträgt also  $-4.2^\circ\text{C}$ . Die Taupunkttemperatur dagegen ist  $-2.8^\circ\text{C}$

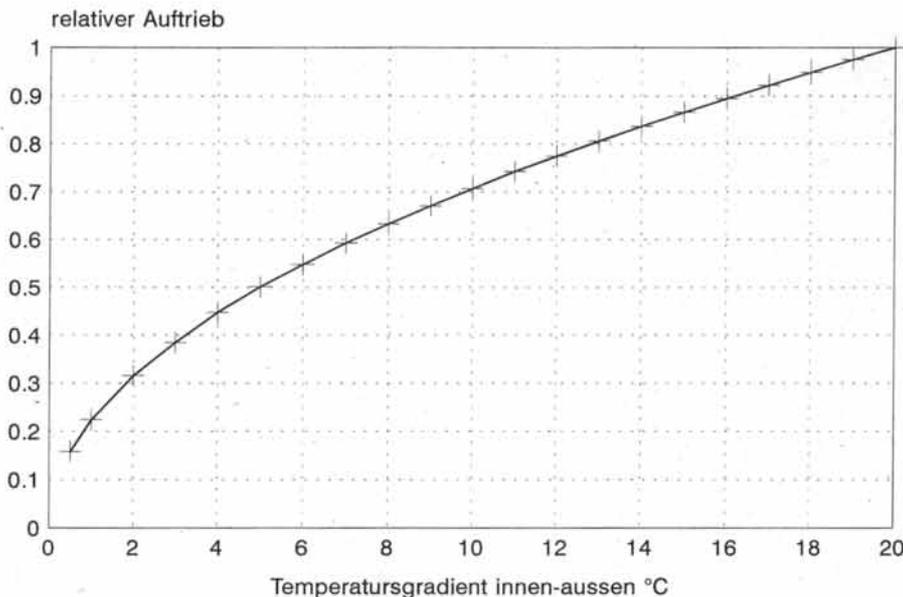


Abb. 7: Relativer thermischer Auftrieb der Stallluft als Funktion der Temperaturdifferenz innen – aussen.

(Abb. 5). Es findet also Kondensation statt. Um Kondensation zu vermeiden, muss man die Taupunkttemperatur unter die Wandtemperatur absinken lassen. Dies könnte man erreichen, indem die Stalllufttemperatur auf  $-2^\circ\text{C}$  herabgesetzt würde. Bei tiefen Temperaturen kann aber eine Reduzierung der Temperaturdifferenz innen – aussen zu einer Destabilisierung der Energiebilanz führen. Die Wasserdampfmenge, welche pro kg Luft fortgebracht wird (siehe Abb. 6), kann stark abnehmen, was zu einer unverhältnismässigen Zunahme der erforderlichen Lüftungsrate führen kann. Im Beispiel müsste der Luftwechsel auf ca. 300% erhöht werden. Wenn aber Zu- und Abluftöffnungen nicht entsprechend vergrössert werden, wird die Lüftungsrate abnehmen, da die thermische Auftriebskraft kleiner wird (siehe Abb. 7). Im Beispiel wäre das um 23%. Diese beiden divergierenden Effekte sorgen dafür, dass für bestimmte Aussenbedingungen die anfallende Feuchtigkeit nicht mehr durch die im Stall selber vorhandene Energie, sondern nur noch durch grossflächige Einwirkung zufälliger Windströmungen fortgebracht werden kann. Dies bedingt grosse Abluft- und Zuluftöffnungen (wenigstens  $0.5 \text{ m}^2/\text{GVE}$ ). Hieraus entsteht ein Stallklima, welches lediglich für Laufställe, in welchen nahezu Aussenklimabedingungen toleriert werden können, geeignet ist.

Können diese Bedingungen nicht erfüllt werden, dann ist zur Vermeidung von Kondensation eine minimale Isolation unumgänglich; die Energiebilanz muss ausgeglichen sein.

Das bedeutet nicht, dass die Bauhülle um ein Mehrfaches teurer werden muss. In den meisten Fällen wird es möglich sein, mit einer kostengünstigen einschaligen Einwandung (Isolierbackstein, Vollholz) die erforderliche Wärmedämmung zu erreichen. Es lässt sich berechnen, dass bei tiefen Aussen Temperaturen das Energieoptimum bei einer Temperaturdifferenz von 10 bis  $15^\circ\text{C}$  liegt und ein  $k\text{-Wert}$  von 1.2 bis  $1.4 \text{ W/m}^2, \text{K}$  ausreicht. Die relative Feuchtigkeit darf hierbei 75% nicht übersteigen.

Es stellt sich die Frage, ob in solchen Ställen auf Doppelverglasung verzichtet werden kann. Paradoxerweise kann Einfachverglasung gegenüber Isolierverglasung energetische Vorteile bieten. Entfeuchtung der Stallluft durch

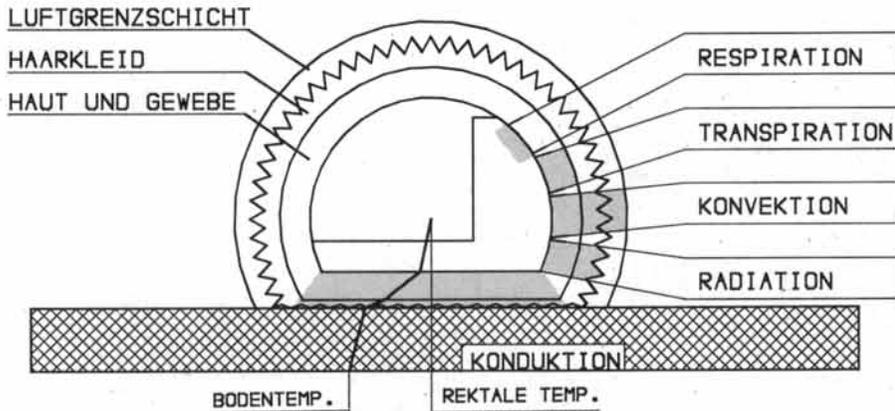


Abb.8: Schematische Darstellung der Wärmeabgabe-Mechanismen eines liegenden Rindes.

Kondensation kann die über die CO<sub>2</sub>-Bilanz hinausgehende Luftrate und die damit verbundenen Wärmeverluste reduzieren. Dabei werden die höheren Transmissionsverluste gegenüber Isolierverglasung durch die Nutzung der latenten Wärme aus dem Wasserdampf weitgehend kompensiert. Ausserdem ist bei Einfachverglasung die Nutzung von Sonnenenergie (deren Wichtigkeit für die Wärmebilanz und die Gesundheit der Tiere nicht immer genügend bewertet wird) um ca. 15% besser.

## Luftdichtigkeit

Luftströmungen können die Isolation des Tieres, welche aus Luftgrenzschicht, Haarkleid, Haut und Gewebe besteht (siehe Abb. 8), stark verringern. Hierdurch steigen die konvektive Wärmeabgabe (Abb. 9) und die untere kritische Temperatur. Neben der Luftgeschwindigkeit bestimmen auch die Temperaturdifferenz zwischen eintretender Luft und Stallluft und die Abgehärtetheit der Tiere, ob eine Luftströmung als Zug empfunden wird. In nicht wärmegeprägten Ställen, in welchen die Innentemperatur weitgehend der Aussentemperatur folgt, ertragen die Tiere augenscheinlich ohne gesundheitliche Schäden auch höhere Luftgeschwindigkeiten. Dies bedeutet allerdings nicht, dass keine minimale Abschirmung von der Aussenwelt nötig ist. Bei tiefen Stalltemperaturen können die konvektiven Wärmeverluste nicht beliebig zunehmen, ohne dass das Anpassungsvermögen der Tiere überschritten wird. Aus diesem Grunde soll

im Winter die Luftgeschwindigkeit in nichtisolierten Ställen auf 1 m/s begrenzt werden. Obwohl bei nichtisolierten Ställen die Innentemperatur weitgehend der Aussentemperatur folgt, sind auch hier durch die thermische Trägheit des Gebäudes grössere Temperaturdifferenzen zwischen Aussenluft und Stallluft möglich, was zu Zugerscheinungen führen kann. Diesen ist durch eine Luftführung (Leitplatten) vorzubeugen.

## Minimale bauphysikalische Anforderungen

Für Rinderställe gelten folgende minimale Anforderungen:

- Extrem tiefe Stalltemperaturen (unter -10°C) sind unter folgenden Bedingungen tolerierbar:
  - Das Liegebett beschränkt die Wärmeverluste auf weniger als 60 W/m<sup>2</sup>. Dies ist am kostengünstigsten mit einer Strohschicht von minimal 2 cm Stärke zu realisieren.
  - Die Tränkeeinrichtungen sind frostsicher.
  - Die Tiere können sich frei bewegen (Laufstall).
  - Futter steht unbeschränkt den ganzen Tag über zur Verfügung.
  - Die Tiere sind vor Wind und Niederschlag geschützt.
- Die Luftgeschwindigkeit ist kleiner als 1 m/s.

Bei hoher Lufttemperatur und Strahlungsbelastung (vor allem vom Dach) muss die konvektive Wärmeabgabe durch eine Querlüftung gefördert werden können. Inwieweit diese Bedingungen auch durch nichtisolierte ein- oder mehrseitig-offene Ställe erfüllt werden können, hängt in erster Linie von der geoklimatologischen Lage des Gebäudes ab. In den meisten Fällen wird es unumgänglich sein, dass bei extremer Witterung ein zusätzlicher Schutz angebracht wird. Feinmaschige Netze sind gegen die Erwartungen nicht so preisgünstig (Materialpreis ca. Fr. 30.-/m<sup>2</sup>) und führen unter Berücksichtigung der Lebensdauer kaum zu Einsparungen. Sie bieten aber den Vorteil, dass Aussenluftströmungen breitflächig in den Stall einwirken können, wodurch im Winter

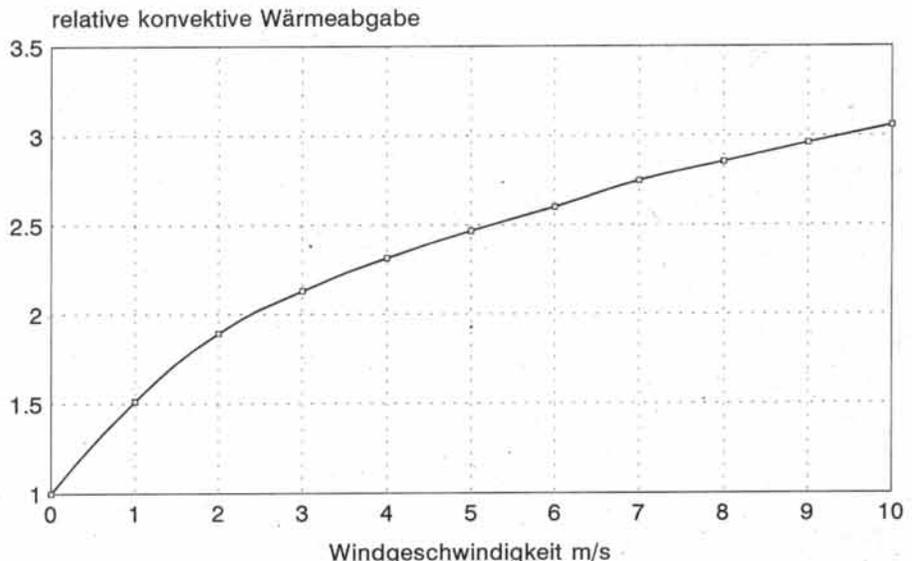


Abb.9: Berechnete relative konvektive Wärmeabgabe eines Rindes als Funktion der Windgeschwindigkeit.

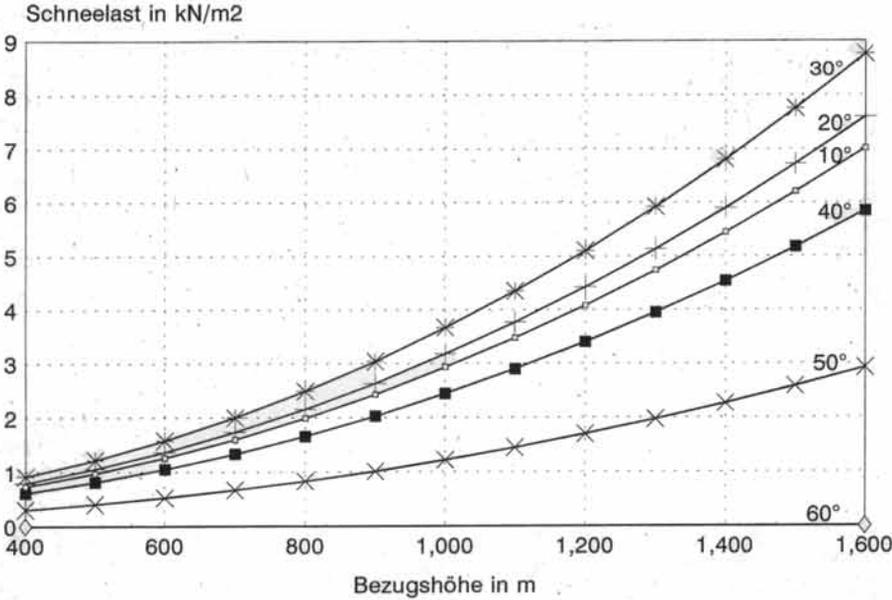


Abb. 10: Schneelast als Funktion der Bezugshöhe (Höhe über Meer mit eventuellem Zuschlag nach Region) und der Dachneigung.

auch bei geringem thermischem Auftrieb ein ausreichender Luftwechsel stattfindet und im Sommer der Hitzestress kleiner wird.

Für Gebäude, in welchen extreme Klimabedingungen nicht tolerierbar sind, soll aus Kostengründen eine minimale Wärmedämmung angestrebt werden. Diese Wärmedämmung muss einerseits Kondensation an nicht feuchtbeständige Materialien verhindern und andererseits zu einer ausgeglichenen Energiebilanz führen.

Ein  $k$ -Wert unter  $1.4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$  verhindert bei einer relativen Feuchtigkeit von 75% Kondensatbildung, sofern die Temperaturdifferenz innen – aussen  $15\text{°C}$  nicht übersteigt. Diese Wärmedämmung lässt sich noch leicht mit einer kostengünstigen einschaligen Wand (z.B. 8 cm Vollholz oder 20 cm Isolierbackstein) und einem üblichen Faserzementplatten-Dach, welches auf der Unterseite von einer Aluminium-Noppenfolie abgeschirmt wird, erreichen. Die Energiebilanz wird durch günstig orientierte grossflächige Glaswände (Einfachverglasung) positiv beeinflusst. Solche Glasflächen verringern durch gezielte Kondensation (Luftentfeuchtung) die über die  $\text{CO}_2$ -Bilanz hinausgehende Lüftungsrate und sorgen für eine bessere passive Sonnenenergienutzung (im Winter). Der Kondensat muss ohne Schaden für Materialien und Tiere abgeführt werden können.

## 2. Mechanische Anforderungen an die Bauhülle

Die Bauhülle ist verschiedenen Kräften ausgesetzt. Einerseits muss sie ihr Eigengewicht tragen können, andererseits muss sie die Nutzlast, welche sich aus Aussenkräften (Wind-, Schnee- und evtl. Erddrucklast) und Belastungen

durch Einrichtungen (z.B. Abtrennungen, Krananlage) zusammensetzen, aufnehmen können. Diese mechanischen Kräfte können durch verschiedene statische Systeme in den Boden abgeleitet werden. Je nach geografischer und betriebstechnischer Situation ist die eine oder andere Bauweise vorzuziehen.

## Die Aussenkräfte

Die Dimensionen der tragenden Strukturen hängen stark von der Spannweite ab. Das Biegemoment ist proportional zum Quadrat der Spannweite. Wo Zwischenstützen nicht erlaubt oder nicht wünschenswert sind, liegt es auf der Hand, die Gebäudebreite zu beschränken. Dies ist aber vielfach wegen der Aufstellungsform nicht möglich oder ist aus anderen Überlegungen, wie z.B. einem günstigen Flächen-Volumen-Verhältnis, nachteilig. Hieraus folgt, dass die Spannweite meistens gross wird und die Tragstruktur je nach Belastungsansätzen beträchtliche Proportionen annehmen kann. Dies verteuert nicht nur die Konstruktion, es macht sie auch für den Selbstbau weniger geeignet.

Eine andere Möglichkeit zur Verringerung des Biegemoments besteht in der Herabsetzung der Dachlast. In den meisten Fällen ist die Schneelast die wichtigste Dachlast. Neben der Bezugshöhe (Höhe über Meer mit even-

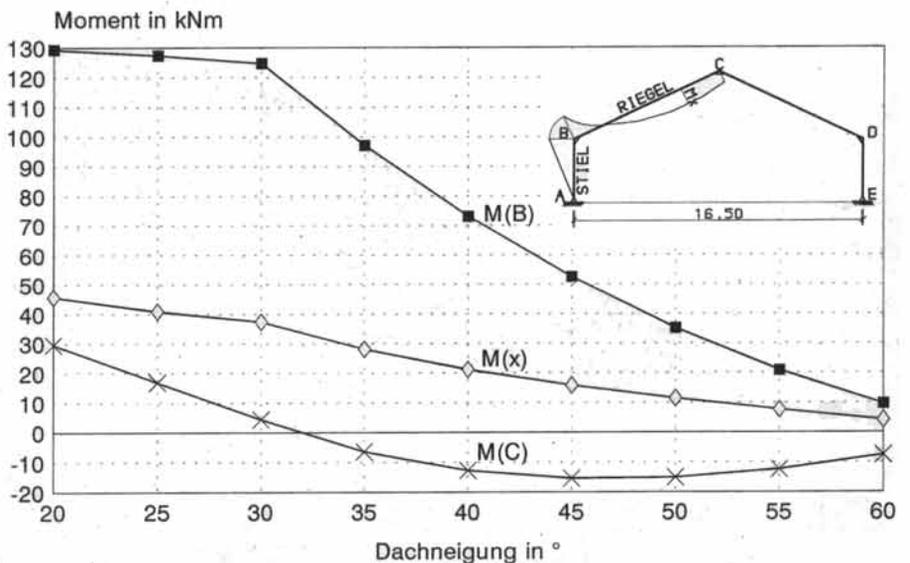


Abb. 11: Eckmoment  $M(B)$ , Firstmoment  $M(C)$  und maximales Riegelmoment  $M(x)$  als Funktion des Eigengewichts und der Schneelast. Bezugshöhe 1000m, Binderfeldabstand 2.5 m.

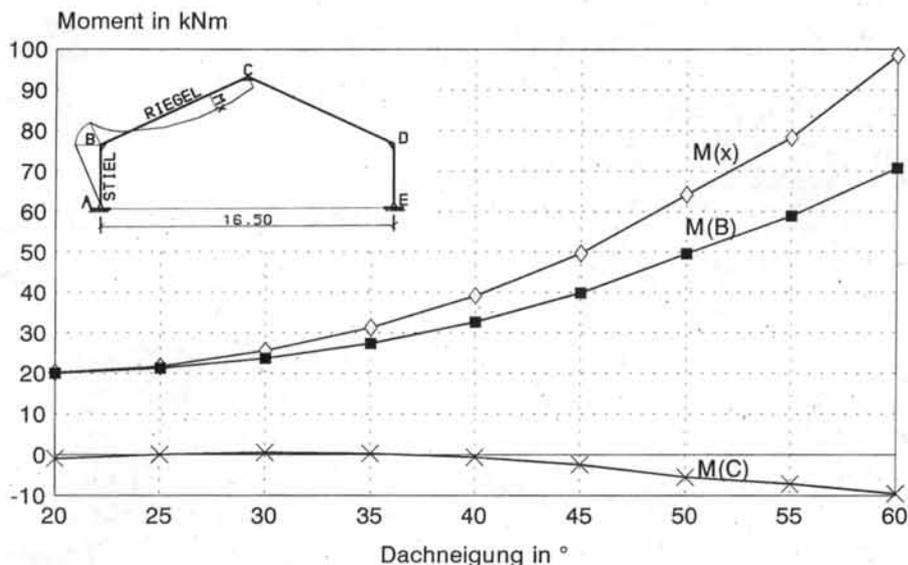


Abb. 12: Eckmoment  $M(B)$ , Firstmoment  $M(C)$  und maximales Rieglmoment  $M(x)$  als Funktion der Windlast. Binderfeldabstand 2.5 m.

tuellem Zuschlag nach Region) hängt sie vor allem von der Dachneigung ab (vgl. Abb. 10). Sie wird auf der vom Wind abgekehrten Seite (Verfrachtung) maximal für eine Dachneigung von  $30^\circ$  und null auf Dächern mit  $60^\circ$  oder mehr Neigung; dies unter der Voraussetzung, dass das Abgleiten des Schnees nicht verhindert wird. Wie sich das auf einen Zweigelenkrahmen (Starrahmen) auswirkt, wird in Abbildung 11 dargestellt.

Neben der Schneelast muss auch die Windlast berücksichtigt werden (Abb. 12). Ein Vergleich beider Lasten zeigt, dass unter den für Abbildung 11 und 12 geltenden Bedingungen die rein statisch vorteilhafteste Dachneigung zwischen  $45^\circ$  und  $50^\circ$  liegt. Schwächere Dachneigungen verursachen höhere Schneelasten, steilere Dächer sind vor allem stärkeren Windkräften ausgesetzt. Oberhalb von  $45^\circ$  wird die Rieggänge schnell grösser und das Rieglmoment  $M_x$  massgebend.

## Das Eigengewicht

Je nach Materialwahl kann das Verhältnis Nutzlast/Eigengewicht stark schwanken. In Tabelle 1 wird eine Decke aus Holz (65-mm-Bretterboden,  $k=1.4 \text{ W/m}^2, K$ ) mit einer üblichen isolierten (60-mm-Dämmplatte in Schalung,  $k=0.5 \text{ W/m}^2, K$ ) Decke aus Stahlbeton verglichen.

Es fällt auf, dass für die gleiche Trag-

fähigkeit das Verhältnis Nutzlast/Eigengewicht für Holz etwa 13mal besser als für Beton ist. Die Stützen- und

Fundament-Belastung ist für eine Holzdecke fast 50% kleiner.

Der Wärmewiderstand der einschaligen Holzdecke ist zwar bedeutend kleiner, genügt aber, um Kondensation zu vermeiden, wenn für ein richtiges Stallklima gesorgt wird.

Abbildung 13 stellt einen Vergleich zwischen einem Zweistützträger aus Holz und einem aus Stahl (IPE-Profil) dar. Es zeigt sich, dass ein Brettschichtverleimter Balken aus Fichte oder Kiefer 10 bis 20% weniger Eigengewicht hat als ein IPE-Stahlträger mit vergleichbarer Durchbiegung. Dagegen lässt sich bei Stahl die Balkenhöhe gegenüber Holz um ca. 40% reduzieren.

Das Verhältnis Nutzlast/Eigengewicht darf also nicht isoliert betrachtet werden. Neben statischen und konstruktiven werden auch noch bestimmte bauphysikalische Eigenschaften des Gebäudes, wie z.B. thermische Trägheit, Schalldämmung und Gasdurchlässigkeit vom Eigengewicht der Bauhülle, mitbestimmt.

Tabelle 1: Vergleich einer Holz- mit einer Betondecke.

	Dicke cm	Eigengewicht $\text{kN/m}^2$	Nutzlast $\text{kN/m}^2$	Stützenlast kN	Nutzlast/Eigengewicht
Holzdecke	6.50	0.50 (50 kg)	6 (600 kg)	59 (5'900 kg)	12
Betondecke	25	6.35 (635 kg)	6 (600 kg)	112 (11'200 kg)	0.95

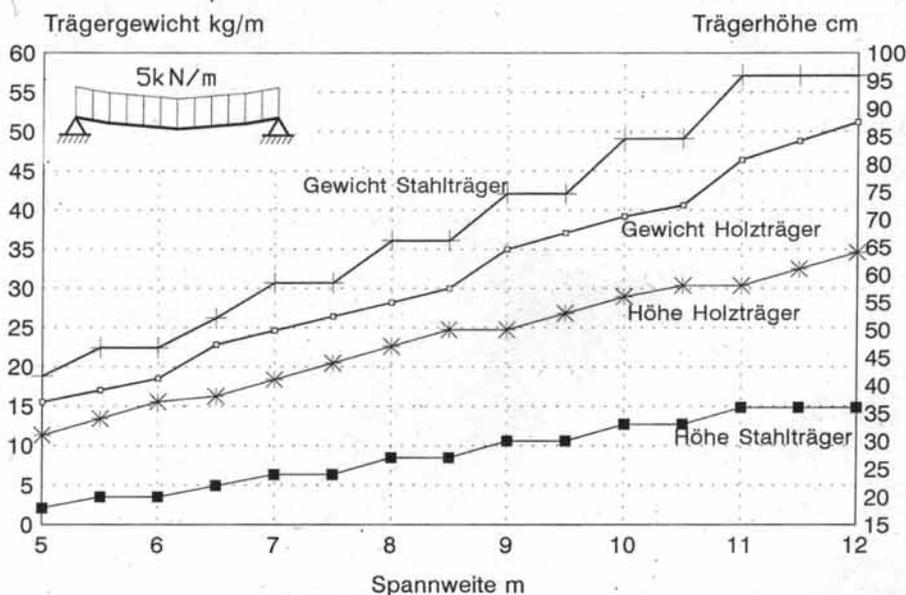


Abb. 13: Gewicht und Höhe eines Zweistützträgers aus Holz und Stahl mit gleichmässig verteilter Vollast von  $5 \text{ kN/m}$  als Funktion der Spannweite. Maximale Durchbiegung = Spannweite/300.

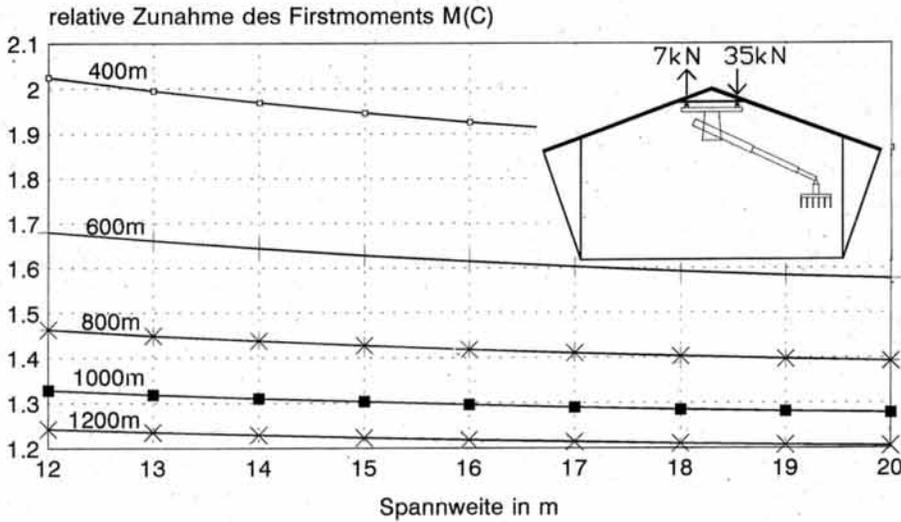


Abb. 14: Relative Zunahme des Firstmomentes eines Zweigelenkrahmens durch einen Drehkran als Funktion der Spannweite und der Bezugshöhe (Höhe über Meer mit eventuellem Zuschlag nach Region). Binderfeldabstand 4 m, Stielhöhe 6 m, Dachneigung 20°.

### Belastungen durch die Einrichtungen (Krananlagen)

Bei den Einrichtungen sind es vor allem die Krananlagen, welche die Dachkonstruktion beanspruchen. Beim Neubau eines Lagerraums für Dürrfutter muss oft zwischen einem Brückenkran und einem Ausleger-Drehkran gewählt werden. Ein Ausleger-Drehkran kann je nach Eigengewicht, Hubkraft und Reichweite die Dachkonstruktion er-

heblich belasten. In Abbildung 14 wird die relative Momentzunahme im First-Knotenpunkt eines Zweigelenkrahmens durch einen handelsüblichen Ausleger-Drehkran, wie er vielfach für die Beförderung von Dürrfutter eingesetzt wird, dargestellt. Es zeigt sich, dass die notwendige Dachverstärkung stark schwankt, je nachdem das Dach schon mehr oder weniger für hohe Schneelasten ausgelegt wurde. Unter der Annahme, dass die Fahrbahnschienen direkt an den Stützen befestigt werden können, beeinflusst

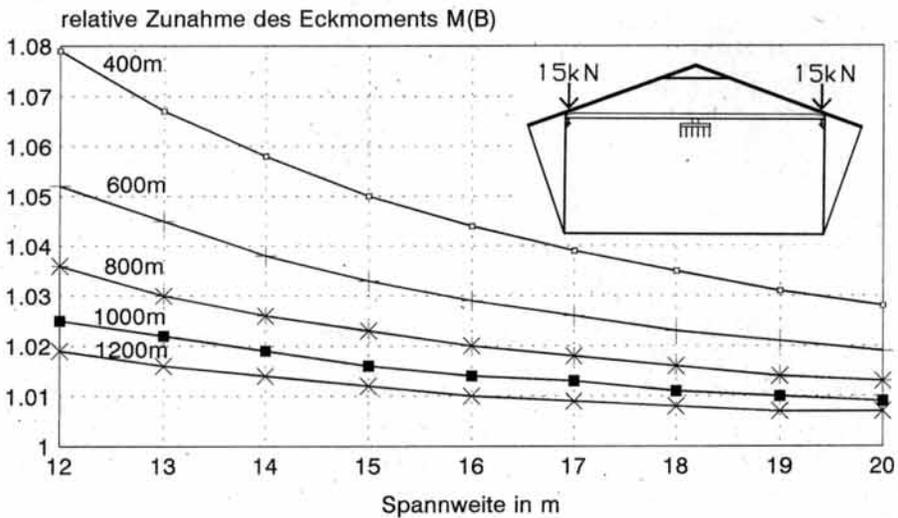


Abb. 15: Relative Zunahme des Eckmomentes eines Zweigelenkrahmens durch einen Brückenkran als Funktion der Spannweite und der Bezugshöhe. Binderfeldabstand 4 m, Stielhöhe 6 m, Dachneigung 20°.

der Brückenkran dagegen nur in sehr geringer Weise die Statik der Dachrahmenkonstruktion (Abb. 15). Er erlaubt ausserdem den Einbau eines Zugbandes in Stielhöhe, was zu einer erheblichen Reduzierung der Knoten- und Rieglmomente und folglich zu einer leichteren Konstruktion führt.

Auf der anderen Seite schliesst ein Ausleger-Drehkran den Einbau von Stützen, welche ebenfalls eine einfachere (aber nicht unbedingt kostengünstigere) und leichtere Dachkonstruktion zur Folge haben können, nicht aus. Dies geht zwar auf Kosten der Wendigkeit und der Flexibilität. Der grösste Vorteil eines Ausleger-Drehkrans besteht in der besseren Dachraumbenutzung, wodurch die Seitenwand- und Giebelwandhöhe reduziert werden kann. Welche Anlage schliesslich am vorteilhaftesten ist, muss unter Mitberücksichtigung von kranpezifischen Eigenschaften (Investitionskosten, Betriebssicherheit, Wartung, Benutzerfreundlichkeit ...) von Fall zu Fall überprüft werden.

### Minimale mechanische Anforderungen

Neben den bauphysikalischen Anforderungen bestimmt die Einwirkung von mechanischen Kräften in hohem Masse, wie massiv eine Bauhülle sein muss. Eine Reduzierung der mechanischen Belastung kann zu wichtigen Kosteneinsparungen führen.

Diese Reduzierung kann durch eine oder mehrere der folgenden Massnahmen erreicht werden:

Reduzierung der Aussenkräfte (Schnee und Wind) durch angepasste Dachneigung, Wahl des am meisten geeigneten statischen Systems, z.B. Zweigelenkrahmen anstelle von Dreigelenkrahmen, Fachwerk anstelle von Starrrahmen, Starrrahmen mit oder ohne Zugband, stützenfrei oder mit Zwischenstützen.

Wahl von Materialien mit günstigem Nutzlast-Eigengewicht-Verhältnis (Holz), geringer Konstruktionshöhe und niedrigen Unterhaltskosten (Schutz gegen Korrosion (Stahl), mikrobiologischen Befall (Holz)). Beschränkung der Kräfte, ausgeübt durch Krananlagen unter Berücksichtigung der möglichen Raumausnutzung.

### 3. Wirtschaftliche Anforderungen an die Bauhülle

Wirtschaftliche Baulösungen bedürfen einer vorausgehenden gründlichen Abwägung von Bauweisen und -materialien.

Einerseits können die verschiedenen Bauelemente wie Fundamente, Boden, Wand, Decke und Dach nicht unabhängig voneinander betrachtet, sondern müssen in ihrer Interrelation auf mögliche Kosteneinsparungen untersucht werden.

Andererseits sind die Notwendigkeit überhaupt und der Ausführungsstandard jedes einzelnen Elementes grundsätzlich in Frage zu stellen.

### Materialwahl

Die meisten Bauelemente lassen sich aus verschiedenen Materialien herstellen. Bei der Materialwahl spielen einerseits das Verhältnis Gesamtkosten/Materialkosten und andererseits die Selbstbaumöglichkeit eine grosse Rolle. In Tabelle 2 werden drei Ausführungsweisen für eine einfache nicht-isolierte Aussenwand verglichen.

Die Material- und Unternehmerpreise sind Richtwerte für 1992. Es zeigt sich, dass bei den heutigen Preisen die Holzwand einerseits die niedrigsten Materialkosten, andererseits die höchsten Akkordarbeitskosten aufweist. Welche Ausführungsweise für jeden Einzelfall die kostengünstigste ist, kann also stark von der Möglichkeit zur Eigenleistung abhängen.

Besonders günstig wird die Holzwand-Variante für den selbstbauenden Landwirt mit entsprechenden Kenntnissen, wenn er eigenes Holz selber verarbeiten kann.

Der Selbstbauanteil hängt nicht nur von der Bereitschaft und den handwerklichen Fähigkeiten des Bauherrn, sondern auch von seiner noch verfügbaren Arbeitskapazität ab. Ohne starke Produktivitätssteigerung dürfte die für Eigenleistung noch verfügbare Zeit in der Zukunft mit zunehmender Betriebsgrösse abnehmen.

Die Holz- und Betondecken laut Tabelle 2 werden in Tabelle 3 kostenmässig miteinander verglichen.

Im Gesamtpreis sind Fundamente und Stützen (Holzstützen für die Holzdecke und Stahlstützen für die Betondecke) inbegriffen. Es zeigt sich, dass die Holzdecke sowohl in Eigenleistung als auch in Akkordarbeit günstiger als die Betondecke ist.

### Lebensdauer und Flexibilität

Neben Zins, Reparaturen und Versicherung beeinflusst die Lebensdauer die Jahreskosten, welche das Gebäude verursacht.

Wie stark eine massive und teure Bauweise sich positiv auf die Lebensdauer auswirkt, ist schwierig zu beurteilen. Mehrkosten können einerseits durch Lebensdauer fördernde Massnahmen wie Überdimensionierung der tragenden Strukturen (Fundamente, Dachstruktur), grosse Sorgfalt bei der Ausführung, Schutz gegen Witterung und biologisch-chemischen Befall entstehen. Sie können andererseits aber auch durch Perfektion, welche nur eine

ästhetische Funktion hat, verursacht werden.

Ob eine Lebensdauer von fünfzig oder mehr Jahren bei der heutigen Entwicklung in der Landwirtschaft noch wünschenswert ist, muss zuallererst aus wirtschaftlichem Gesichtspunkt beurteilt werden. Wenn man als Ausgangspunkt die tragbaren Jahreskosten nimmt, dann können unter Annahme der verschiedenen Ansätze für Zins, Reparatur und Versicherung die maximal zulässigen Gebäudekosten als Funktion der Lebensdauer bestimmt werden.

Nehmen wir zum Beispiel (Abb. 16) an, dass aufgrund der Betriebsergebnisse die jährlichen Kosten für das Gebäude höchstens 30000 Franken betragen dürfen und die Investitionen sich auf 500000 Franken belaufen, dann beträgt die Abschreibungsdauer, und folglich auch die Lebensdauer, 77 Jahre. Eine Kostensenkung um 20% auf 400000 Franken verkürzt die erforderliche Lebensdauer auf 36 Jahre. Das gleiche Gebäude von 400000 Franken würde bei Jahreskosten von

**Tabelle 2: Kostenvergleich von drei Ausführungsweisen für eine nicht-isolierte Aussenwand**

Ausführungsweise	Materialkosten Fr./m <sup>2</sup>	Gesamtkosten in Akkordarbeit Fr./m <sup>2</sup>	Verhältnis Akkordarbeit/ Material
1. Holzwand Riegel Ständerbau 14 cm Verkleidung einseitig stumpf 24 mm mit Deckleisten	46	136	2.95
2. Faserzementwellplatten Riegel Ständerbau 14 cm Faserzementplatten gefärbt	50	99	1.95
3. Mauerwerk (Einsteinmauerwerk) Backstein 15 cm nicht verputzt	50	95	1.95

**Tabelle 3: Kostenvergleich zwischen einer Holzdecke und einer Betondecke, Stützen mit Fundament inbegriffen (siehe auch Tabelle 1).**

Ausführungsweise	Materialkosten Fr./m <sup>2</sup>	Gesamtkosten in Akkordarbeit Fr./m <sup>2</sup>	Verhältnis Akkordarbeit/ Material
Holzdecke (65 mm Bretterboden)	70	125	1.80
Betondecke (Untersicht 60 mm Dämmplatten in Schalung)	130	238	1.85

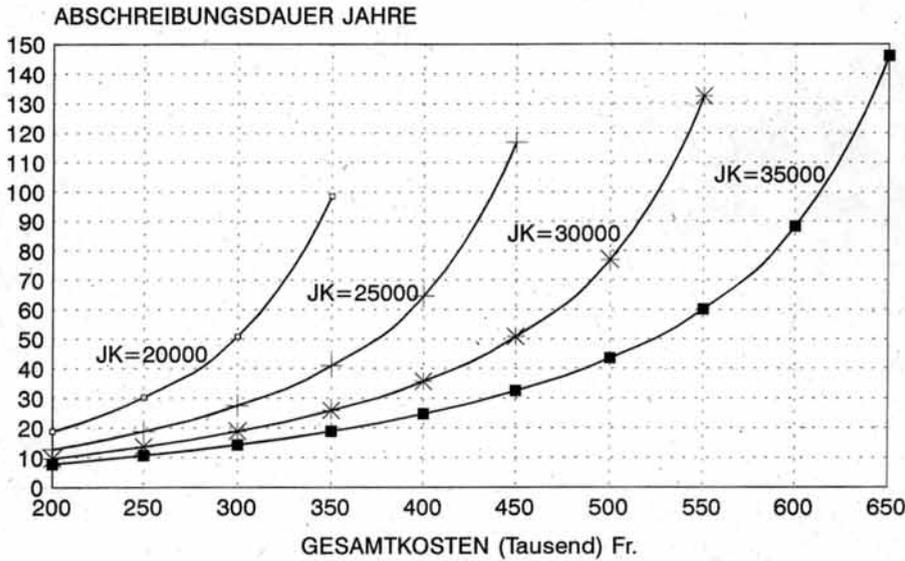


Abb. 16: Abschreibungsdauer als Funktion der Gesamtkosten und der Jahreskosten (JK). Zinssatz 7% von 60% des Anlagewertes, Reparatur 0.4%, Versicherung 0.1%.

25000 Franken eine Abschreibungsdauer von 65 Jahren voraussetzen. Bei relativ hohem Zinssatz scheint kurzfristig eine kostengünstigere Baulösung mit kürzerer Lebensdauer vorteilhaft zu sein. Ob das auch langfristig der Fall ist, hängt von der Baulösung und den zukünftigen Anforderungen an Gebäude ab. Wenn man Gebäude über mehrere Generationen nutzen will, sollten sie auf jeden Fall in bezug auf spätere An- und Umbauten **flexibel** sein. Hier stellt man aber oft einen Widerspruch fest. Langlebige Gebäude werden vielfach massiv ausgeführt (z.B. Betondecke) und erfordern einen grösseren Aufwand beim Umbau als in Einfachbauweise erstellte Gebäude.

### Minimale wirtschaftliche Anforderungen

Die richtige Materialwahl hat einen grossen Einfluss auf die Kosten. Wenn keine Eigenleistungen möglich sind, müssen Materialien und Bauweisen mit niedrigen Verarbeitungskosten gewählt werden. Wenn Selbstbau mög-

lich ist, sind ausserdem die Materialkosten und die geforderten Fertigkeiten zur Verarbeitung zu beachten. Ausgangspunkt zur Bestimmung der zulässigen Investitionen sind die Jahreskosten, welche durch die Investitionen verursacht werden und für den Betrieb tragbar sein sollen. Bei relativ hohem Zinssatz scheint kurzfristig eine kostengünstige Baulösung mit relativ kurzer Lebensdauer vorteilhaft zu sein.

### Schlussfolgerungen

Aus den bauphysikalischen Grundlagen lassen sich zwei sparsame Baukonzepte ableiten. Das erste Konzept sieht eine **Minimallösung** vor. Das Gebäude ist nicht isoliert und auf eine breitflächige Einwirkung des Aussenklimas angewiesen, damit zu jeder Zeit Feuchtigkeit und Schadgase abgeführt werden können. Offene Ställe (ein- oder mehrseitig) bieten gegenüber geschlossenen Gebäuden keine Kostenvorteile, wenn ein Schutz (z.B. feinmaschiges Netz) gegen extreme Witterung notwendig ist. Dieses Konzept eignet sich nur für Laufställe. Es muss mit humanen Ar-

beits- und tiergerechten Lebens- und Produktionsbedingungen vereinbar sein.

Das zweite Konzept sieht ein **minimal isoliertes Gebäude** vor. Eine minimale Temperaturdifferenz innen – aussen sorgt unabhängig vom Aussenklima auch im Winter für eine ausreichende Lüftung. Eine minimale Wärmedämmung verhindert Bauschaden durch Kondensation. Das Prinzip der kostengünstigen einschaligen Bauhülle des ersten Konzepts wird beibehalten. Die Wärmedämmung wird ausschliesslich durch eine Anpassung der Materialstärke erreicht. Dies hat als Vorteil, dass die Verarbeitungskosten, welche in der Regel 50 bis 70% der Gesamtkosten ausmachen, nur geringfügig ansteigen. Für beide Konzepte lassen sich durch Optimierung von Dachneigung und statischem System, in Abhängigkeit von Schneelast und Nutzlast (Krananlagen), und durch die Wahl von Materialien mit einem günstigen Nutzlast-Eigenlast-Verhältnis weitere wesentliche Einsparungen erzielen.

### Literatur

- Bianca W., 1971; Die Anpassung des Haustieres an seine klimatische Umgebung.
- Michels H., 1957; Beschouwingen over thermoregulatie, adaptatie en produktie van het rundvee in de tropen.
- Rist M., Mathys H. 1973; Zur Wärmeableitung von Tierlägerbelägen. Schweizerische landwirtschaftliche Forschung, Band 12, Heft 1, 1973, S.81-102.
- Roulet Cl-A., 1987; Energétique du bâtiment I.
- Sagelsdorff R., Frank T. 1990; Wärmeschutz und Energie im Hochbau. Schweizerische Ziegelindustrie.
- SIA-Norm 160, Ausgabe 1989. Einwirkungen auf Tragwerke.