

LowEx Building Design

für eine
Zero Emission Architecture

Hansjürg Leibundgut



v/dlf

Hansjürg Leibundgut ist seit 2005 Professor für Gebäude-technik am Institut für Technologie in der Architektur der ETH Zürich. Das Institut ist dem Departement Architektur eingegliedert.

1949 in Rüegsau (BE) geboren, studierte er Maschinenbau an der ETH Zürich mit den Vertiefungsrichtungen Reaktor-technik und Fluidodynamik. Innerhalb seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Lebensmittelwissenschaften vertiefte er sich in die Gebiete Solartechnik und Absorptionstechnik. 1980 schloss er seine Ausbildung an der ETH mit einer Dissertation in diesen beiden Spezialgebieten ab.

Nach vier Jahren Industrieerfahrung im F+E-Bereich der Absorptionskältetechnik wechselte er in die Verwaltung des Kantons Zürich und wurde verantwortlich für die Bereiche Energie, Lufthygiene und Technik der rund 1500 Staatsgebäude.

1989 wechselte er zurück in die Privatwirtschaft und wurde Mitinhaber, Chefsingenieur und ab 2002 CEO und Präsident der Amstein+Walthert AG. Er baute innerhalb dieser Firma unter anderem die Fachbereiche HLKS, Facility Management, Dynamische Gebäudesimulation auf und betreute mehr als 200 Projekte verschiedenster Architekten.

In Ermangelung geeigneter Bauelemente entwickelte er zusammen mit Schweizer Industriepartnern diverse neue Produkte für eine dezentrale Gebäudetechnik. Dieses Engagement wurde Schwerpunkt seiner ETH-Forschung.

Low Ex Building Design

für eine
Zero Emission Architecture

Hansjürg Leibundgut

v/dlf

Autor, Herausgeber: Hansjürg Leibundgut
Assistenz: Philipp Bollier, Georg Krüger, Volker Ritter
Lektorat: René Lüchinger

Gestaltung: STVG – Robert Lzicar, Jonas Mahrer, Fabian Aiolfi
Titelfotografie: Christian Grund
Druckerei: Freiburger Graphische Betriebe, Freiburg (D)



vdf Hochschulverlag AG
an der ETH Zürich, VOB D, Voltastrasse 24, CH-8092 Zürich
verlag@vdf.ethz.ch, www.vdf.ethz.ch

© 2011 vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich
Alle Rechte der Texte beim Herausgeber.
Alle Rechte der Abbildungen bei den Urhebern.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes
ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar.
Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen
und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.



ISBN: 978-3-7281-3409-7 Print
978-3-7281-3434-9 EBook
DOI-Nr: 10/3218/3434-9

Printed in Germany

Inhalt

- 5 Einführung
- 9 Physikalische Grundlagen
- 43 NS-E-Diagramm
- 50 Solarhaus
- 52 Solar-Passivhaus
- 56 Plusenergiehaus
- 59 ZeroEmission LowEx
- 66 Fotovoltaik- und PVT-Hybridkollektor
als Erntemaschinen für Strom und Wärme
- 69 Erdspeicher als externer Kondensator
- 73 Wärmepumpe als Transformator
- 76 Fassade/Konstruktion als Widerstand
- 81 Exergieerzeugung
- 85 ZE-LowEx-Kosten
- 87 Darstellung und Parameter: BIM und DPV

- 92 Mehrfamilienhaus B35, Zürich
- 98 Konstruktion
- 116 PVT-Hybridkollektor
- 119 Niederhub-Wärmepumpe
- 121 Erdspeicher
- 125 Digitalstrom
- 128 Exergieerzeugung
- 128 NS-E-Diagramm

- 134 Bürogebäude HPZ, ETH Zürich
- 135 Ausgangslage
- 140 Zieldefinition und Sanierungsmassnahmen

- 161 Wohnüberbauung Seestrasse 270, Zürich

- 169 Wohnhaus Wengistrasse 3, Zumikon

- 178 Abbildungsverzeichnis

Einführung

Am Anfang war das Feuer, und der Mensch ist die einzige Spezies, welche das Feuer beherrscht. Auf dem Feuer basiert die menschliche Zivilisation, es ist Energie- und Wärmespeicher zugleich. Über Jahrtausende hat der Mensch Holz verbrannt und die durch den Verbrennungsprozess freigesetzte Energie genutzt – lange Zeit freilich ohne Kenntnis darüber, dass dieses natürliche Brennmaterial eine Konserve von Sonnenenergie darstellt. Ein Baum wächst nämlich zwischen zwanzig und dreihundert Jahren und bindet in dieser Zeit 0.4% der auf die Blätter einfallenden Solarstrahlung; 99.6% der Sonnenenergie wird sofort wieder in das Weltall abgestrahlt. So gesehen ist Holz keine besonders effiziente Energiequelle.

Die Technisierung der Gesellschaft, insbesondere die Erfindung der Dampfmaschine, erforderte Energieträger, die zwar auf dem gleichen Prinzip beruhen – durch Photosynthese chemisch gebundene Sonnenenergie in Form von Kohlenstoff –, aber wesentlich effizienter sind. Die Konzentration an Kohlenstoff in einem Kohleflöz oder einem Erdölfeld ist um das Millionenfache grösser als deren Konzentration in einem Wald. Kohle und Erdöl wurden deshalb im grossen Stil zur Energiequelle der Industrialisierung.

Vor rund zwanzig Jahren begannen die Menschen zu realisieren, dass dies in der Atmosphäre zu negativen Folgen führt. Bei der Verbrennung von Kohle oder Erdöl wandelt sich das darin gebundene C-Atom in ein gasförmiges CO₂-Molekül. Am Ende des Verbrennungsprozesses, einer komplizierten chemischen Reaktion, steigt die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Das Problem dabei ist, dass die dadurch veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre die Wärmestrahlung der Erdoberfläche in das Weltall behindert und das Gleichgewicht zwischen eingestrahelter Sonnenenergie und in das All abgestrahlter Energie nur bei höherer Bodentemperatur möglich ist. Das Phänomen ist heute als Klimaerwärmung im kollektiven Bewusstsein. Dadurch erhöht sich auch die allgemeine Lufttemperatur und wärmere Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen; es kommt zu mitunter starkem Regenfall. Wenn Wasserdampf kondensiert, können je nach lokalen Gegebenheiten starke Winde, ja Orkane, Fluten oder Überschwemmungen die Folge sein.

Die entscheidende Frage ist: Wie kann der Mensch das Zerstörungspotenzial des durch Verbrennungsprozesse zusätzlich in die Atmosphäre gelangten Wassers entschärfen? Indem er an neuralgischen Stellen Dämme baut oder in gefährdeten Gegenden im grossen Stil Umsiedlungen von Menschen vornimmt und in sicheren Zonen neue Häuser baut? Dies wäre ein fast biblisches Unterfangen und kaum von Erfolg gekrönt. Werden Dämme oder Behausungen aus Beton erstellt, wäre nichts gewonnen – Beton enthält Zement, bei dessen Produktion wie bei Verbrennungsprozessen auch CO₂ freigesetzt wird, was zu einer zusätzlichen Erhöhung des Wassergehalts in der Atmosphäre führt. Mit den oben beschriebenen Folgen.

Man kann es drehen und wenden wie man will: Die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre, insbesondere der übermässige CO₂-Ausstoss, erfordert drastische Gegenmassnahmen auf allen Ebenen von Wirtschaft und Gesellschaft, und die meist nationalen Systeme von Energiegewinnung und -versorgung müssen radikal überdacht werden. Die Freisetzung von CO₂ muss in Zukunft weitgehend vermieden werden. Im Grunde darf keine Kohle, kein Öl, kein Erdgas mehr verbrannt werden, Holz nur noch in dem Umfang, wie es wieder nachwächst, und Zement darf nur noch punktuell und vor allem effizient eingesetzt werden.

Im 21. Jahrhundert steht die Menschheit vor der Herausforderung, den Prozess der Verbrennung grundsätzlich zu ersetzen und auch andere Emissionsquellen neu zu gestalten. Von dieser Problematik besonders tangiert sind die Immobilien. Sie sind für einen guten Teil des Energieverbrauchs wie auch des CO₂-Ausstosses verantwortlich. Errichtung und Betrieb von Gebäuden müssen deshalb auf gänzlich neue Grundlagen gestellt werden. Davon handelt dieses Buch.

Es geht nicht darum, Energie zu sparen. Unser Anspruch zielt höher. Das unbescheidene Ziel muss die Emissionsfreiheit bei den Gebäuden sein und dies bedingt zugleich eine hochwertige Architektur. Dies schliesst sich keineswegs aus. Unser Ziel, das emissionsfreie Gebäude, ist mit dem heute etablierten Stand der Gebäudetechnik umsetzbar und entspricht auch dem ökologischen Postulat der Zeit.

Physikalische Grundlagen

Die sich um ihre Achse drehende Erde befindet sich in einem permanenten Energiestrom mit rund $1'400 \text{ W/m}^2$ Leistung in Form von elektromagnetischer Strahlung in einem Frequenzband von 10 bis ca. $8'000 \text{ nm}$. Die Kugelform der Erde, die zur Umlaufebene schräg stehende Drehachse, die Rotation der Erde um diese Achse und der Umlauf der Erde auf einer elliptischen Bahn um die Sonne bewirken, dass jedem Ort zu jeder Zeit eine individuelle Strahlung auf die Erdoberfläche zugeordnet werden kann. Dies kann man als theoretisches «Grundstrahlungsangebot» bezeichnen.

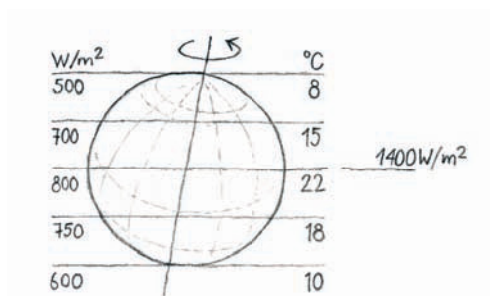


Fig. 1
Globale Einstrahlung

Die Atmosphäre ist ein Gemisch von Gasen, Flüssigkeits- und Feststoffpartikeln. Die aus energetischer Sicht wichtigste Gemischkomponente darin ist das Wasser. Die Solarstrahlung bewirkt dessen Verdunstung, wodurch Energie aufgenommen und in Form von Wasserdampf in der Luft gespeichert wird. Bei diesem physikalischen Prozess beansprucht das Wasser $1'000$ -mal mehr Volumen im dampfförmigen als im flüssigen Zustand. Damit das «System Atmosphäre» bezüglich des Wassergehalts als Ganzes im Gleichgewicht bleiben kann, muss an bestimmten Orten Wasser vom dampfförmigen Zustand in den flüssigen Zustand zurückgeführt werden. Dieser wärmefreisetzende Prozess ist die Kondensation, bei dem sich die kondensierenden H_2O -Moleküle zu Tröpfchen zusammenschließen. Bleiben diese Tröpfchen klein, nennt man sie Aerosole – im Gasgemisch schwebende Flüssigkeitsteilchen. Aerosole verändern die optischen Eigenschaften des Gasgemischs – sie reflektieren die Solarstrahlung stärker. Grosse Aerosolansammlungen (vor allem solche grosser Mengen, sprich Wolken) reflektieren und absorbieren die örtliche Strahlung, was zu einer kleineren Solarstrahlung auf der

Erdoberfläche führt. Die Bewölkung reduziert das Grundstrahlungsangebot auf der Erdoberfläche. Die lokal gemessene Globalstrahlung ist die Überlagerung des Grundstrahlungsangebots durch die Filterwirkung der Bewölkung.



Fig. 2
Bewölkung über der Erdoberfläche

Sobald die Wassertröpfchen zu gross werden, genügen die Auftriebskräfte nicht mehr, die Gravitation nimmt überhand, das Wasser regnet aus. An Orten der Verdunstung herrschen andere Druckverhältnisse als an Orten der Kondensation – die Winde verschieben Luftmassen vom Hochdruck- ins Tiefdruckgebiet.

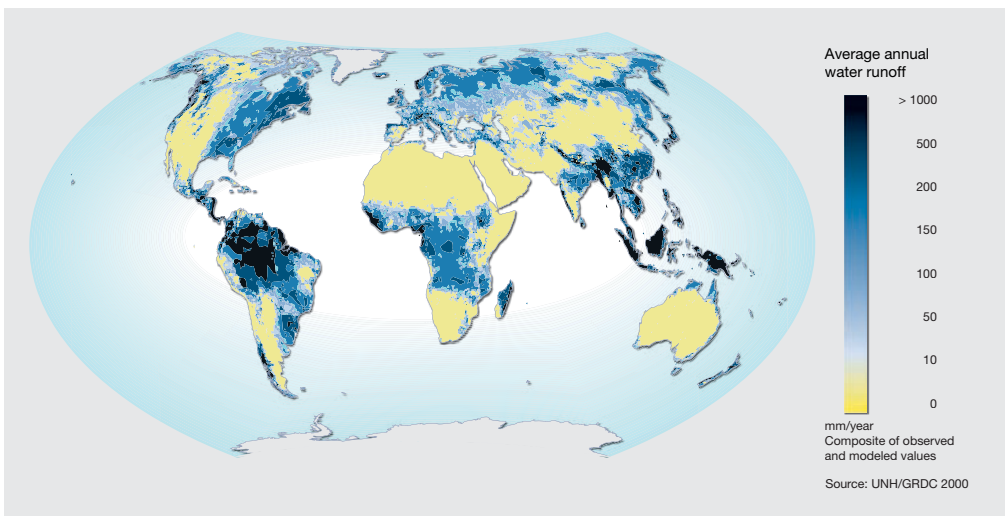
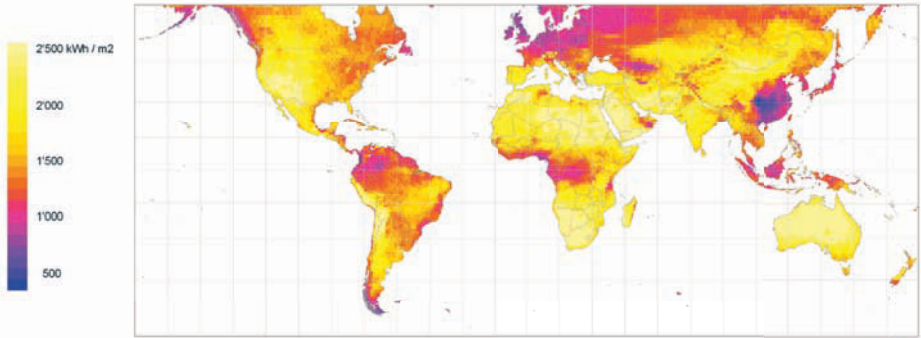


Fig. 3
durchschnittliche jährliche
Niederschlagsmenge

Der jahresbezogene statistische Mittelwert der Globalstrahlung war über Tausende von Jahren das ausschlaggebende Kriterium für die Besiedlungsfähigkeit eines Ortes durch den Menschen. Bis heute ist die horizontale Globalstrahlung (in $\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$) eine entscheidende Grösse für die Auslegung der später detailliert dargestellten Gebäudesysteme.

Yearly sum of direct normal irradiance



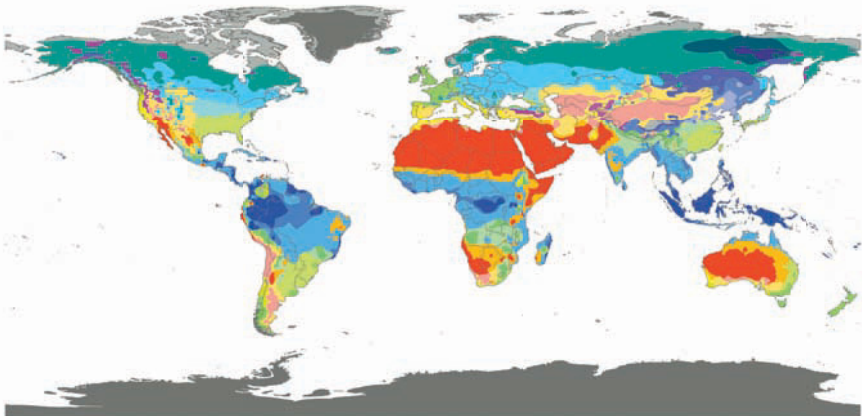
Source: Meteornorm 6.0 (www.meteornorm.com); uncertainty 15%
 Period: 1981 - 2000; grid cell size: 1°

June 2008

Fig. 4
 jährliche Summe globaler
 Strahlungsintensität

Doch da die Globalstrahlung und somit auch die Temperatur, die Feuchte und der Niederschlag oszillieren, ihre Werte also in bestimmten zeitlichen Abständen und in einem bestimmten Spektrum schwanken, sind auch die jeweiligen Maxima der Amplituden von grosser Bedeutung.

World map of Köppen-Geiger climate classification



Af	BWh	Csa	Cwa	Cfa	Dsa	Dwa	Dfa	ET
Am	BWk	Csb	Cwb	Cfb	Dsb	Dwb	Dfb	EF
Aw	BSh	Cwc	Cfc	Dsc	Dwc	Dfc		
	BSk			Dsd	Dwd	Dfd		

DATA SOURCE : GHCN v2.0 station data
 Temperature (N = 4,844) and
 Precipitation (N = 12,396)

PERIOD OF RECORD : All available

MIN LENGTH : ≥30 for each month.

RESOLUTION : 0.1 degree lat/long

Contact : Murray C. Peel (mpeel@unimelb.edu.au) for further information

Fig. 5
 Weltkarte der Klimaklassifikation
 nach Köppen-Geiger

Als Beispiel dienen die Aufzeichnung der Niederschläge und Temperaturen in Zürich im Verlauf eines Jahres.

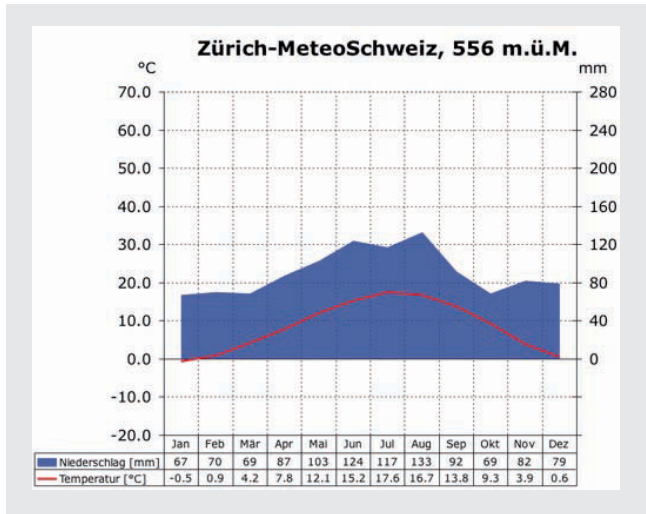


Fig. 6
Klimadiagramm Zürich

Obwohl der Mensch in Regionen lebt, die von oszillierenden Bedingungen geprägt sind, verfügt er über einen Organismus mit praktisch konstanter Kerntemperatur. Physikalisch betrachtet ist der Mensch ein System mit vor allem zwei für das Bauen relevanten Grundbedürfnissen: eine konstante Körperkerntemperatur und eine ausreichende Zufuhr von Sauerstoff, also frischer Luft. Das «System Mensch» führt sich Energie in Form von Nahrung zu (organisches Material), um daraus verschiedene Arten von Leistung (körperliche, kognitive usw.) über eine bestimmte Zeitdauer zu erzeugen.

Der Prozess der Energieumformung ist ein Oxidationsprozess in den Körperzellen, bei dem CO_2 gebildet wird, das durch das Blut zur Lunge transportiert und dort durch Kontraktion des Lungenvolumens aus dem Körper herausgepumpt wird. Die CO_2 -Konzentration im Blut ist für den menschlichen Körper die kritische Grösse: durchschnittlich muss der Mensch nach spätestens 30–60 Sekunden atmen, um die CO_2 -Konzentration in der Lunge auf nicht mehr als 5% Vol. steigen zu lassen. Die andere relevante Grösse ist die Kerntemperatur. Der menschliche Organismus ist nur im Toleranzbereich von 26–42°C überlebensfähig. Der Energieumwandlungsprozess in den Zellen ist exotherm, d.h., er setzt Wärme frei, die dauernd abgeführt werden muss. Andererseits kann die Energieabfuhr schnell zu gross sein, insbesondere bei nasser Haut. Für den haarlosen Menschen ist daher vor allem die Trockenheit der Haut sehr wichtig. Das «Dach über dem Kopf» ist nach der

Nahrung und der Bekleidung das drittichtigste Bedürfnis des Menschen.

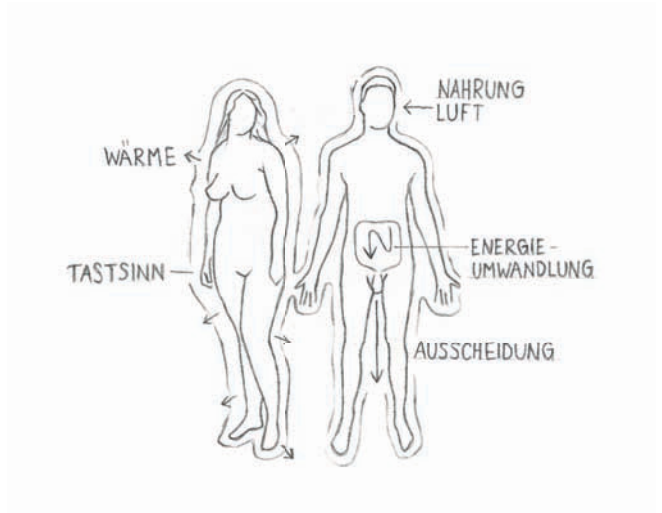


Fig. 7
Mensch als System

Möchte sich der Mensch mit diesen Anforderungen dennoch den zuvor beschriebenen oszillierenden Bedingungen aussetzen, erfordert es eine Art lokaler Konditionierung. Dabei sind die Bauweisen und Bauformen des Menschen sowie eine bestimmte Lebensweise und die eingesetzte (Gebäude-) Technik die wesentlichen drei Möglichkeiten im Umgang mit der direkten Umgebung.

Die ersten Behausungen besaßen einen Innenraum, der so klein war (Iglu, Zelt, Höhle), dass die menschliche Abwärme genügte, um die Innen- gegenüber der Aussentemperatur auf einem deutlich höheren Niveau zu halten. Dem im Innern durch die Bewohner produzierten Wärmestrom Φ_1 , steht der Wärmestrom Φ_2 gegenüber, der infolge der Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen durch die Hülle der Behausung fließt. Die Hüllfläche und der Widerstand gegen den Wärmefluss sind bauliche Parameter.

Gute Beispiele für bauliche Anpassungen stellen jene Bauten dar, die in Gebieten mit grossen Oszillationen zu finden sind, wie z.B. das Iglu (massiv gebaut, Dämmwirkung durch in Schnee eingeschlossene Luft),

Fig. 8
Eskimo-Iglu



die Buschhütte (Verschattung/Ausnutzung der Trägheit des dichten Baumaterials, z.B. Lehm, entspricht Tag-Nacht-Oszillation)

Fig. 9
Ugandische Hütte



oder Pfahlbauten in Asien. Das zum Hüttenbau verwendete Material war bzw. ist Sammelgut aus der unmittelbaren Umgebung, das nur in der Form, nicht aber in der Zusammensetzung verändert wird. Die zum Bau erforderlichen Werkzeuge gelten heute als primitiv.

Fig. 10
Pfahlbau in Thailand



Die Behausungen der Nomadenvölker, die sogenannten Jurten, stellen eine indirekte bauliche Anpassung an die Umweltbedingungen dar, da diese so konzipiert sind, dass sie ohne übermäßigen Aufwand ab- und wieder aufzubauen sind. Dass deren Bewohner umherziehen, ist auch eine Reaktion auf klimatische Bedingungen, aufgrund derer auch Weideflächen sich verschieben, also «wandern».



Fig. 11
Kibitka: Kirgisische Jurte

Nomadentum hat darüber hinaus auch kulturelle, ökonomische oder weltanschauliche Gründe.



Fig. 12
Oglala-Tipi

Dächer dienen in erster Linie dazu, Innenräume trocken zu halten. Sie erfordern komplexe Konstruktionen, damit die

Ableitung von Regenwasser selbst bei starkem Wind gewährleistet bleibt oder ein Dach bei grosser Schneelast nicht einbricht. Die Form von Dächern zeigt an verschiedenen Gegenden der Welt eine erstaunliche Vielfalt. Meist ist sie auch bedingt durch lokal verfügbares Baumaterial.



Fig. 13
Strohdach



Fig. 14
Steindach



Fig. 15
Blechdach

Der Neigungswinkel ist bei Dächern aus Stroh grösser als bei der Verwendung von Stein oder Blech. Auf die Formen von Dächern wird später noch mehrfach zurückzukommen sein.

Eine Temperatur θ_i , wie sie sich unter dem Dach im Innern einer Behausung einstellt, ist Resultat verschiedener Einflussfaktoren. Die Summe der Abwärmeströme aller exothermen Prozesse im Innern

$$\Phi_1 = N_1 \times \Phi_i + N_2 \times \Phi_v + \dots$$

ist gleich dem Wärmestrom Φ_2 durch die Hüllfläche A der Behausung nach aussen. Dieser Wärmestrom Φ_2 durch die Hüllfläche A ist abhängig von der treibenden Temperaturdifferenz $(\theta_i - \theta_a)$ und dem Wärmedurchgangswiderstand R_{tot} der Hülle.

$$\Phi_2 = A \times 1 / R_{\text{tot}} \times (\theta_i - \theta_a)$$

Die Innentemperatur θ_i stellt sich automatisch ein als Zustand, bei dem beide Wärmeströme gleich gross sind. Der für die Innentemperatur entscheidende Widerstand R_{tot} der Hülle gegen den Wärmefluss war in der Vergangenheit über viele Jahrhunderte limitiert. Der Widerstand der Wand dagegen ist beispielsweise gegeben durch $R_{\text{Leitung}} = d / \lambda$. Die Wärmeleitfähigkeit λ konnte durch das Baumaterial – Holz oder Stein – sowie die Wahl von Bearbeitungswerkzeugen verändert werden. Dabei galt: je breiter die Wand, desto grösser der Aufwand, diese zu erstellen. Anders gesagt: eine Wanddicke d bedingte einen Einsatz, der praktisch proportional zum Aufwand war, den man leisten musste, um die Wand zu erstellen.

Dies alles geschah noch ohne Einsatz von ausgeklügelter (Gebäude-)Technik. Vielmehr galt es, Raumtemperaturen mit im heutigen Verständnis eher primitiven Methoden zu gewährleisten. Aus diesem Grund lebten die Menschen in vergangenen Zeiten oft mit Haustieren unter einem Dach, die im selben oder angrenzenden Raum hausten. Deren natürliche Abwärme wirkte sich positiv auf die Raumtemperatur aus.

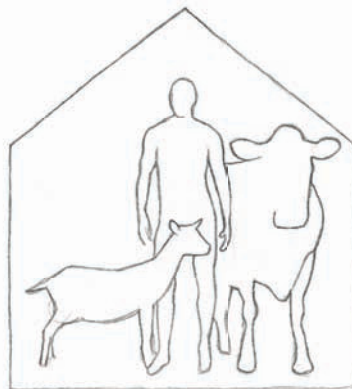


Fig. 16
Tiere im Wohnraum