

ENERGIEKONZEPT FÜR INDUSTRIEHALLEN - TECHNISCH-ÖKONOMISCHE OPTIMIERUNG DER PASSIVEN SOLARENERGIENUTZUNG AUF BASIS EINER GEBÄUDESIMULATION -

Marina Stegelmeier, Martin Kaltschmitt
Technische Universität Hamburg-Harburg, Deutschland
Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft

Kontakt: marina.stegelmeier@tuhh.de, www.tuhh.de/iue

KURZFASSUNG

Diese Arbeit untersucht das Potenzial der haustechnischen Energiekostensenkung bei Industriehallen durch passive Solarenergienutzung. Als Optimierungsparameter werden die Fensteranordnung in einer Industriehalle und die Fensterfläche gewählt. Durch eine Gebäudesimulation in TRNSYS 17 wird der Energiebedarf für eine Referenz-Industriehalle mit verschiedenen Fenstervarianten bestimmt sowie über verschiedene Energiebereitstellungstechnologien verglichen und kostentechnisch bewertet. Als Bereitstellungstechnologien werden Brennwertkessel, eine Kompressionskältemaschine und eine Elektrowärmepumpe mit Erdsonden ausgewählt. Bei dieser Untersuchung können Kosteneinsparpotenziale im einstelligen Prozenbereich ermittelt werden. Dabei dominiert der Wärmebedarf die Kosten, da er um mehr als Faktor 20 größer ist als der Kühlenergiebedarf. Die Energiekosten werden dementsprechend im Wesentlichen durch die Bereitstellungsart bestimmt.

Abstract

This work analyses the possible savings in heating and cooling energy costs for factory buildings through passive solar energy use. As optimizing parameters window positioning and window area are chosen. Through building simulation in TRNSYS 17 the energy demand of a defined factory building in various constallations regarding window position and area is determined. The energy demand furthermore is supplied with different technologies for heat and cold generation and evaluated through the arising energy costs. As generation technologies condensing boilers, a heat pump and a compression cooling unit are chosen. Possible savings in single-digit percent range can be deteminded. The heating demand clearly dominates the costs, since it is more than 20 times higher than the cooling demand. But overall, the costs are deteminded by the energy generation technology.

EINLEITUNG

Etwa 28 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland fallen im Industriesektor an, davon knapp 8 % für die

Breitstellung von Raumwärme (BMW, 2012). Die Bundesregierung forderte im Oktober 2010 einen klimaneutralen Gebäudebestand bis zum Jahr 2050 zur Senkung der Treibhausgasemissionen (BMU, 2010). Dieses Ziel kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden. Hier ist die Steigerung der Energieeffizienz, d.h. die Senkung des Endenergieverbrauchs, aber auch die Bereitstellungsart der benötigten Energie zu nennen.

Industriehallen, ein Teilbereich der Industriegebäude, zeichnen sich durch eine extreme Geometrie, d.h. große Raumhöhen und -flächen aus. Sie werden oft in Stahlskelettbauweise mit relativ dünn gebauten Wänden realisiert, da es sich dabei in der Regel um die günstigste Bauform handelt. Aufgrund dieser Eigenschaften verbrauchen Industriehallen in der Regel viel Energie (etwa 15 % des Wärmemarktes entfallen auf die Beheizung von Industriehallen! (Oschatz, 2011)), was ihren Betrieb entsprechend teuer gestaltet.

Die Optimierung dieses Energieverbrauchs bzw. der während des Betriebs einer Standard-Industriehalle anfallenden Energiekosten, soll in dieser Arbeit mittels einer thermischen Gebäudesimulation in TRNSYS 17 untersucht werden. Dabei wird zum einen der Energiebedarf nach Raumwärme und -kälte einer Optimierung durch Nutzung der passiven Solarenergie unterzogen. Unter dem Begriff „Energiebedarf“ ist in dieser Arbeit die Energie (Wärme und Kälte) zu verstehen, die nach der Nutzung der passiven Solarenergie noch durch die Heizungs- und Kühlungstechnologien bereitgestellt werden muss. Industriehallen werden zwar in der Regel bei den in Deutschland vorliegenden klimatischen Bedingungen nicht gekühlt, da aber die Solarenergienutzung zentrales Element der Optimierung in dieser Arbeit ist, muss einer eventuellen sommerlichen Überhitzung durch die Erfassung des Kühlenergiebedarfs Rechnung getragen werden. Zum anderen wird die Bereitstellung der Energie durch verschiedene Technologien untersucht, sodass schlussendlich die kostengünstigste Kombination aus Gebäudevariante und Anlagentechnik identifiziert werden kann.

Zu diesem Zweck wird zunächst eine Industriehalle nach dem heutigen Baustandard definiert und in TRNSYS 17 abgebildet. Die Optimierung des Ener-

gieverbrauchs wird dabei von zwei Seiten angegangen. Zum einen wird der Energiebedarf nach Raumwärme und -kälte durch gezielte Nutzung der am Standort vorliegenden solaren Einstrahlung mit Hilfe der Gebäudehülle optimiert. Für die bedarfsseitige Optimierung werden verschiedene Gebäudevarianten modelliert und simuliert, dabei werden zwei Parameter der passiven Solarenergienutzung einer Variation unterzogen. Zum einen wird die Fensterposition und -ausrichtung variiert (d.h. die Lage der Fenster zueinander sowie die Ausrichtung der sich dadurch ergebenden Gebäudevarianten bezüglich der Himmelsrichtungen (Drehung um 360° in 45° -Schritten)), und zum anderen die Fensterfläche. Mit der Variation dieser Parameter werden die zu erwartenden saisonalen Schwankungen der Solarenergiegewinne erfasst. Hier stehen winterliche Solargewinne durch große Fenster den Transmissionswärmeverlusten in dieser Jahreszeit gegenüber, so dass ein Optimum über die Anpassung der Fläche und der Ausrichtung hinsichtlich des Wärmebedarfs gefunden werden muss. Für den Sommerfall gilt es den Kühlenergiebedarf zu optimieren, da in dieser Jahreszeit große Fensterflächen zur Überhitzung führen können. Da sich die Idealwerte der oben aufgezählten Parameter hinsichtlich der Optimierung von Wärme- und Kältebedarf in der Regel widersprechen, muss ein Gesamtoptimum gefunden werden.

Um den Unterschieden in der Effizienz von Wärme- und Kältebereitstellung Rechnung zu tragen, wird im zweiten Teil der Optimierung der Energiebedarf jeder Gebäudevariante der Referenzhalle durch unterschiedliche Technologien (Referenzanlagen) bereitgestellt. Für die Wärmeversorgung werden ein Erdgas-Brennwertkessel, ein Heizöl-Brennwertkessel und eine Elektrowärmepumpe mit Erdsonden untersucht. Für die Kältebereitstellung werden eine Kompressionskältemaschine sowie die Möglichkeit einer freien Kühlung durch die Wärmepumpe untersucht. Bei dieser zweiten Untersuchung der Energiebereitstellung kommen unterschiedliche Wirkungsgrade bzw. Kosten zwischen der Wärme- und Kältebereitstellung zum Tragen, so dass u.U. ein optimierter Gesamtenergiebedarf (entsprechend der Summe aus dem Energiebedarf für Heizung und Kühlung) nicht gleichzeitig mit der kostengünstigsten haustechnischen Energieversorgungsvariante einhergehen muss. Die Optimierungsaufgabe wird erst an dieser Stelle gelöst.

SIMULATIONSMODELL: REFERENZHALLE

Als Referenzhalle wird eine Standardhalle nach dem bauphysikalischen Vorbild nach (Schreiber, 2012) definiert. Die Halle hat Abmessungen von 60 m Länge, 40 m Breite und 5,60 m Höhe. Mit einem 1 m hohen Betonsockel, der die komplette Referenzhalle

umgibt, sowie der Wand, der Bodenplatte und dem Dach existieren vier Bauteile, die in die Simulation eingehen. Als Materialien dieser Bauteile werden hauptsächlich Sandwichpaneel und Beton sowie weitere Dämm- und Kunststoffe verwendet. Tabelle 1 zeigt die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der zur Simulation verwendeten Bauteile der Referenzhalle. Es ist zu erkennen, dass die U-Werte der jeweiligen Bauteile niedrig sind und sich z.T. deutlich unterhalb der nach Energieeinsparverordnung vorgeschriebenen maximalen U-Werte befinden. Damit wird in dieser Arbeit erreicht, dass die Solargewinne einen größeren Einfluss auf den Wärme- und Kältebedarf gegenüber der Transmission durch die Bauteile haben.

Tabelle 1 Bauteile und Materialeigenschaften der Referenzhalle

BAUTEIL	U-WERT, W/(m ² ·K)
Betonsockel	0,26
Wand	0,22
Dach	0,22
Boden	0,21

Ein für Industriehallen oft verwendetes Fenstermaterial ist Fiberglas. Dieser Kunststoff zeichnet sich durch hohe Transluzenz und damit verhältnismäßig hohe Energiedurchlassgrade (g-Werte) aus, ohne transparente Eigenschaften zu besitzen. So kann die Blendproblematik, umgangen und gleichzeitig Tageslicht in das Gebäude eingeleitet werden. Daher wird für die Modellierung aller Fenster Fiberglas mit einem g-Wert von 44 % und einem U-Wert von 2,5 W/(m²·K) angesetzt. Es werden ausschließlich Lichtbänder an den Wandbauteilen betrachtet. Jedes Lichtband hat eine Fläche von 100 m², die teilweise bei einer Untersuchung der Flächenvariation bis auf 200 m² erhöht wird. Es werden verschiedene Kombinationen der Lichtbänder am Gebäude zueinander betrachtet. Abbildung 1 und Tabelle 2 zeigen alle untersuchten Hallenvarianten bezüglich der Fensterposition (ohne Flächenvariation).

Als Standort der Referenzhalle wird Stuttgart gewählt, da in dieser Stadt viele Industrieunternehmen ihren Sitz haben und daher eine Analyse für diesen Standort sinnvoll erscheint. Es werden Wetterdaten für Stuttgart im Modell hinterlegt.

Die Wärme- und Kältebedarfsoptimierung erfolgt unter folgenden Annahmen im TRNSYS 17-Modell:

- Es handelt sich um ein rein energetisches Modell, Luftströmungen aufgrund von z.B. Windeinflüssen werden nicht modelliert. Lediglich eine konstante Infiltrationsrate von 0,76 h⁻¹ wird dem Modell übergeben (ermittelt nach DIN 15251, 2007).

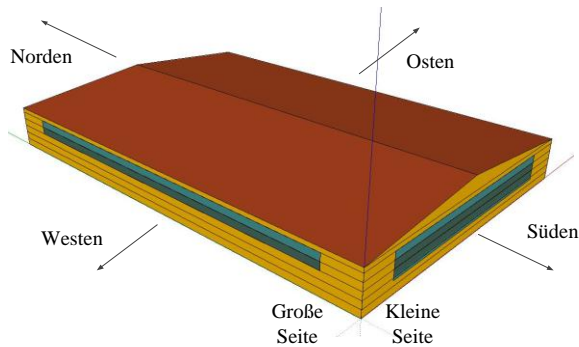


Abbildung 1 Referenzhalle mit Lichtbändern

Tabelle 2 Untersuchte Gebäudevarianten bezüglich der Fensterpositionierung (OF: ohne Fenster; gr.: groß; kl.: klein; S.: Seite; LB: Lichtband)

Nr.	AUSRICHTUNG	GR. SEITE		KL. SEITE	
		O	W	N	S
1	OF				
2	1 LB gr. S.	×			
3	1 LB gr. S. + 1 LB kl. S.		×		×
4	1 LB gr. S. + 1 LB kl. S.		×	×	
5	1 LB gr. S. + 2 LB kl. S.		×	×	×
6	2 LB kl. S.			×	×
7	2 LB gr. S.	×	×		

- Es handelt sich um ein rein energetisches Modell, Luftströmungen aufgrund von z.B. Windeinflüssen werden nicht modelliert. Lediglich eine konstante Infiltrationsrate von $0,76 \text{ h}^{-1}$ wird dem Modell übergeben (ermittelt nach DIN 15251, 2007).
- Die Referenzhalle wird in eine thermische Zone mit sieben Schichten konstanter thermischer Eigenschaften (Luftknoten) unterteilt, so dass eine temperaturbedingt entstehende Schichtung über der Höhe abgebildet werden kann. Abbildung 2 zeigt die Nomenklatur sowie die Geometrie der definierten Luftknoten.
- Die konvektive Wärmeübertragung zwischen den Luftschichten aufgrund der Temperaturunterschiede wird durch Modellierung des theoretisch ausgetauschten Luftmassenstroms über den thermischen Auftrieb abgebildet.
- Die Referenzhalle wird werktags in der Zeit von 8 bis 18 Uhr auf eine Temperatur von 16°C beheizt (DIN 12831, 2003) und am Wochenende sowie nachts auf 10°C . Die Beheizung erfolgt nur für die unteren drei Luftknoten (d.h. bis zu einer Hallenhöhe von

3 m, (siehe Abbildung 2), da davon ausgegangen wird, dass sich die in der Halle befindenden Personen vorwiegend am Boden aufhalten. Daher ist eine Beheizung der kompletten Halle unnötig. Die dadurch entstehenden höheren Verluste von der dritten in die vierte Schicht werden durch den thermischen Auftrieb von Luftknoten 2 in Luftknoten 3 bzw. durch einen entsprechenden konvektiven Wärmestrom berücksichtigt.

- Die Kühlung der Halle wird bei einer Überschreitung der Temperatur von 20°C in einem oder mehr der unteren drei Luftknoten aktiviert. Es werden analog zur Heizung ebenfalls nur die unteren drei Knoten gekühlt.
- Innere Wärmequellen werden nicht betrachtet.
- Jegliche Einflüsse der Luftfeuchtigkeit werden nicht betrachtet.
- Die Referenzhalle besitzt keine Lüftungsanlage und die modellierten Fenster werden als geschlossen betrachtet, so dass für diese Posten keine Lüftungsenergieströme betrachtet werden müssen.
- Türen und Tore werden nicht modelliert, da sie ebenfalls nicht geöffnet werden sollen und in TRNSYS wie Wände modelliert werden. Da die Gebäudehülle in dieser Arbeit nur hinsichtlich der Fenster variiert wird und alle anderen Bauteile unverändert bleiben, wird auf die Darstellung der Türen in diesem Modell verzichtet.

Als Ausgabedaten werden zum einen der sensible Wärmebedarf, der zur Erreichung der Soll-Raumtemperatur in den beheizten Hallenteilen besteht und der Kältebedarf, der zur Absenkung der Raumtemperatur in den gekühlten Zonen notwendig ist, berechnet.

Bei dem hier erstellten Gebäudemodell handelt es sich wie oben erwähnt um ein rein energetisches Modell. Da der Einfluss von Luftströmungen nicht betrachtet wird, ergibt sich ein vergleichsweise niedriger Energiebedarf. Die hier ermittelten Ergebnisse sind also in erster Linie untereinander zu vergleichen und spiegeln nicht den realen Energiebedarf einer Industriehalle wieder.

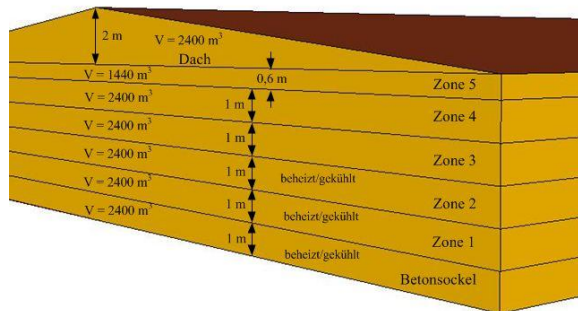


Abbildung 2 Geometrische Lage und Nomenklatur der sieben Luftknoten der Referenzhalle

REFERENZTECHNIKEN ZUR WÄRME- UND KÄLTEBEREITSTELLUNG

Im Folgenden werden die Referenzanlagen zur Wärme- und Kältebereitstellung definiert und hinsichtlich ihrer technischen Auslegungsparameter sowie der Energieträgerpreise beschrieben. Die Systeme werden über die sich ergebenden Vollkosten nach VDI 2067 (VDI, 2010) verglichen. Die Investitionen für die jeweilige Anlagentechnik werden auf Basis einer Preisrecherche der größten Hersteller auf dem deutschen Markt sowie weiterer Quellen abgeschätzt. Es werden ein Zinssatz von 4% sowie Anlagenlebensdauern und Hilfsenergieverbräuche nach (DIN V 4701-10, 2003) unterstellt.

Erdgas-Brennwertkessel (Gas-BW)

Es wird angenommen, dass der Kessel außerhalb der Halle und damit der thermischen Hülle aufgestellt wird. Zur Ermittlung der Verluste bei der Wärmeübergabe (Fußbodenheizung) und der -verteilung werden die Aufwandszahlen nach (DIN V 4701-10, 2003) verwendet. Es wird ein durchschnittlicher Nutzungsgrad der Wärmeerzeugung von 102 % angenommen. Es ergibt sich eine mittlere Aufwandszahl von 1,033. Diese wird zur Ermittlung des jeweiligen Endenergieeinsatzes verwendet. Zur Bestimmung der Brennstoffkosten wird ein Erdgaspreis für industrielle Abnehmer von 2,93 Cent/kWh angenommen (BMW, 2012).

Heizöl-Brennwertkessel (Öl-BW)

Der einzige Unterschied zwischen Erdgas- und Heizöl-Brennwertkessel besteht in der Effizienz der Wärmeerzeugung. Es wird ein durchschnittlicher Erzeugungsnutzungsgrad von 100 % angenommen, daher ergibt sich eine mittlere Gesamtaufwandszahl von 1,012. Zur Bestimmung der Brennstoffkosten wird ein Heizölpreis für industrielle Abnehmer von 52,31 €/hL angenommen (BMW, 2012).

Kompressionskältemaschine (KKM)

Diese Kältemaschine erzeugt kaltes Wasser, das über das Rohrnetz einer Fußbodenheizung verteilt wird. Daher sind die Verluste für Übergabe und Verteilung

dieselben wie bei den Brennwertkesseln und werden nach (DIN V 4701-10, 2003) bestimmt. Bei den Verlusten für die Erzeugung kommt die Leistungszahl der Kältemaschine zum Tragen. Es werden mittlere Jahresarbeitszahlen zwischen 1,8 und 1,9 angenommen, so dass sich eine mittlere Gesamtaufwandszahl der Kältebereitstellung von 1,243 ergibt. Die verbrauchsgebundenen Kosten werden auf Basis eines Strompreises von 9,71 Cent/kWh für industrielle Abnehmer ermittelt (BMW, 2012).

Elektrowärmepumpe mit Erdsonden (WP)

Die strombetriebene Kompressionswärmepumpe mit Erdsonden (Solessystem) nutzt ebenfalls eine Fußbodenheizung zur Wärmeverteilung und Übergabe. Es werden daher dieselben Verluste für diese Posten angesetzt wie bei den vorher genannten Referenzanlagen. Für die Wärmeerzeugung wird eine mittlere Jahresarbeitszahl von 3,3 unterstellt, sodass sich eine mittlere Gesamtaufwandszahl von 0,317 ermitteln lässt. Die Deckung des Kühlenergiebedarfs deckt die Anlage durch freie Kühlung. Dabei wird die Soleflüssigkeit an der Wärmepumpe vorbei (Bypass) durch die Fußbodenheizung gepumpt und führt dort die Kühllast ab. Für die Kühlperiode fallen demnach nur Kosten für Hilfsenergie der Verteilungs- und der Solepumpe an. Da der Kühlenergiebedarf in den hier untersuchten Systemen generell niedrig ist, wird angenommen, dass die Deckung der Kühllast über eine freie Kühlung möglich und ausreichend ist. Es wird für alle hier auftretenden Stromverbraucher ebenfalls ein Strompreis von 9,71 Ct/kWh angesetzt. Auf die Berücksichtigung eines Spezialtarifs für Wärmepumpenstrom wird verzichtet, da die Strompreise für industrielle Abnehmer grundsätzlich sehr niedrig sind. Zusätzlich sind Wärmepumpenheizungen in der Industrie bisher nicht weit verbreitet und daher ist ein derartiger Tarif nicht verfügbar.

ERGEBNISDARSTELLUNG UND DISKUSSION

Als erster Arbeitsschritt wird der Wärme- und Kältebedarf aller untersuchten sieben Gebäudevarianten mit Hilfe des erstellten Gebäudemodells ermittelt. Dabei wird das Gebäude ausgehend von seiner Grundausrichtung in 45°-Schritten einmal um 360° gedreht, um das gesamte Ausrichtungs- und Solarstrahlungsspektrum abzubilden. Eine Ausrichtung von 0° entspricht demnach der Startausrichtung nach Tabelle 2. Im zweiten Arbeitsschritt wird die Bereitstellung des ermittelten Energiebedarfs durch die definierten Referenztechnologien über die sich daraus ergebenden Vollkosten verglichen.

Energiebedarfsoptimierung

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der Energiebedarfsoptimierung. Erkennbar ist, dass der Wärmebedarf

der Referenzhalle immer deutlich größer ist als der Kältebedarf (mehr als Faktor 20 liegt dazwischen). Die Schwankungen im Wärmebedarf bei unterschiedlichen Fensterpositionen und Ausrichtungen sind absolut gesehen zusätzlich deutlich größer als beim Kältebedarf. Verglichen mit einer fensterlosen Halle (Variante OF) weisen zudem alle untersuchten Varianten einen niedrigeren Wärmebedarf und einen höheren Kältebedarf auf. Demnach übersteigen in der Heizperiode bei diesen Fensterflächen (Gesamtflächen zwischen 100 und 300 m²) die nutzbaren Solarenergiegewinne vollständig die erhöhten Transmissionswärmeverluste durch die Fenster. Der Kältebedarf ist gegenüber „OF“ immer erhöht, da Fenster als Solarstrahlungsquelle überhaupt zur Verfügung stehen.

Die symmetrische Gebäudevariante „2 gr. LB O und W“ zeigt nur geringe Schwankungen sowohl im Wärme- als auch im Kältebedarf über der Gebäudeausrichtung und liefert immer den niedrigsten Wärmebedarf mit einem Minimum bei Ausrichtung der Lichtbänder nach Norden und Süden (90° bzw. 270°). Der Kältebedarf liegt zudem im unteren Bereich. Dieses Verhalten wird darauf zurückgeführt, dass die in das Gebäude einfallende Solarstrahlung zu einem sehr großen Anteil absorbiert und zur Heizung genutzt werden kann, da sie entweder auf den Boden auftrifft oder (bei schrägen Einfallswinkeln) auf Wände. Verluste durch wieder austretende Strahlung durch andere Fenster sind bei dieser Gebäudevariante relativ gering verglichen mit Gebäudevarianten, die Fenster über Eck aufweisen. Dies gilt prinzipiell für jeden Einfallswinkel der Sonne. Bei Fenster über Eck geht insbesondere bei schrägen Einfallswinkeln ein Teil der einfallenden Strahlung gleich wieder über die Transmission durch die Nachbarfenster verloren. Die Variante „2 gr. LB O und W“ hat zusätzlich einen vergleichsweise niedrigen Kühlenergiebedarf, da bei Nord-Süd-Ausrichtung der Fenster die Solarstrahlung mit sehr steilem sommerlichen Einfallswinkel in das Gebäude eintritt und daher ein kleinerer Anteil der Bodenfläche beschienen wird und zur Absorption zur Verfügung steht als im

Winter. Diese Gebäudevariante ist demnach hinsichtlich Wärme- und Kältebedarf als besonders positiv einzustufen.

Auffällig ist weiterhin, dass die ebenfalls symmetrische Variante mit zwei kleinen Lichtbändern ein ähnliches Verhalten aber auf deutlich höherem Energiebedarfsniveau (Wärme und Kälte) zeigt. So schneidet diese Variante („2 kl. LB N und S“) hinsichtlich Wärme- und Kältebedarf gegenüber den anderen Gebäudevarianten besonders schlecht ab. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Solarenergiegewinne, im Gegensatz zur Variante „2 gr. LB O und W“ im Sommer und im Winter nahezu komplett genutzt werden können, da das nächste Fenster als Austrittsöffnung für Strahlungsverluste 60 m weit weg ist (40 m bei Variante „2 gr. LB O und W“). Dies ist im Winter positiv zu bewerten. Da aber aufgrund des Strahlungseinfalls parallel zur langen Gebäudeseite nur ein kleinerer Teil der Bodenfläche beschienen wird, ist der Beitrag, den die Solarenergiegewinne zur Heizungsunterstützung leisten können, relativ gering und der Wärmebedarf daher hoch. Im Sommer führen die eintretenden Solarenergiegewinne zu einer Überhitzung, die den Kühlenergiebedarf erhöht. Bei der Variante „2 gr. LB O und W“ können auf der anderen Seite Teile der eintretenden Strahlung durch das andere Fenster wieder austreten, was hier nicht möglich ist.

Alle anderen untersuchten Gebäudevarianten mit gleicher oder größerer Fensterfläche bewegen sich hinsichtlich ihres Energiebedarfs zwischen den beiden eben diskutierten Varianten. Die Schwankungen über der Ausrichtung sind dabei deutlich größer, da Strahlungsverluste (über angrenzende Fenster) erhöht werden und daher die nutzbaren Solarenergiegewinne stärker von der Strahlungsintensität und damit der Ausrichtung abhängen.

Um den Einfluss der Fensterfläche auch unabhängig von der Gebäudeausrichtung und der Fensterposition bewerten zu können, wurden Flächenvariationen ausgewählter Fenster durchgeführt (Variation jeweils in den Schritten +50% und +100%). Es handelt sich

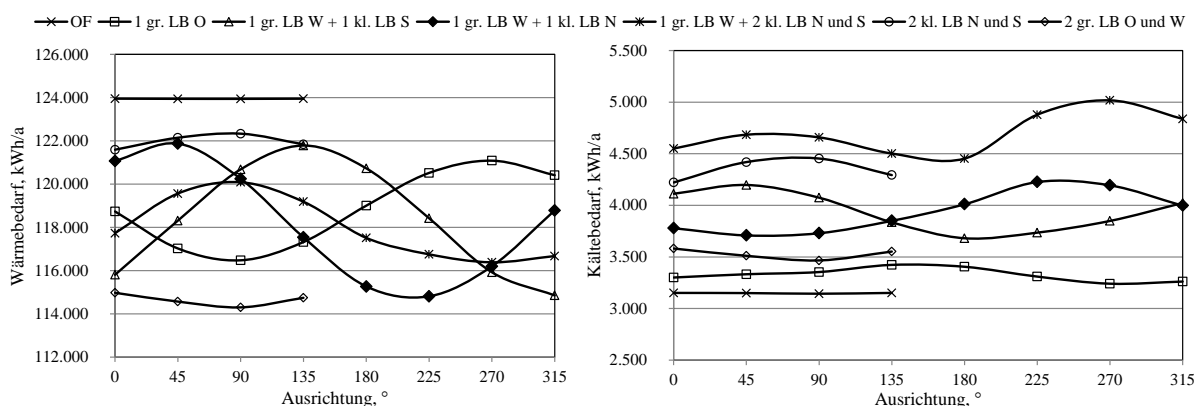


Abbildung 3 Wärme- und Kältebedarf der 7 untersuchten Gebäudevarianten (Tabelle 2) bei verschiedenen Ausrichtungen (OF: ohne Fenster; gr.: groß; kl.: klein; LB: Lichtband, N: Norden, S: Süden, O: Osten, W: Westen)

dabei ausnahmslos um Lichtbänder an den großen Gebäudeseiten. Abbildung 4 zeigt die dazugehörigen Ergebnisse des Wärme- und Kältebedarfs. Es ist zu erkennen, dass für alle untersuchten Gebäudevarianten eine Flächenvergrößerung sich ausnahmslos erhöhend auf Wärme- und Kältebedarf auswirkt. Die erhöhten Solarenergiegewinne können folglich die erhöhten Transmissionswärmeverluste durch den höheren U-Wert des Fensters verglichen mit dem Wandmaterial nicht ausgleichen oder übertreffen. Zusätzlich ist eine starke Abhängigkeit von der Ausrichtung zu erkennen. Bei einigen Varianten wird sogar ein höherer Wärmebedarf als bei der fensterlosen Variante erreicht, dies ist aber nur dann der Fall, wenn Fenster nach Norden ausgerichtet sind.

Zusammenfassend erfolgt die solarenergetische Optimierung des Energiebedarfs folgenden Kriterien: Bei symmetrischer Fensterpositionierung (Varianten „2 gr. LB O und W“, „2 kl. LB N und S“) liegen die Extrema im Kälte- und Wärmebedarf bei derselben Ausrichtung. Dieser Umstand ist grundsätzlich positiv und gerade bei der Positionierung der Lichtbänder an den großen Gebäudeseiten wird unabhängig von der Ausrichtung der niedrigste Wärmebedarf erreicht. Der Kältebedarf dieser Variante ist lediglich der drittniedrigste, was aber angesichts des generell deutlich höheren Wärmebedarfs nicht zwangsweise negativ zu bewerten ist. Sobald die Fenster der Referenzhalle über Eck angeordnet sind, werden die Strahlungsverluste erhöht, was die Abhängigkeit der nutzbaren Solarenergiegewinne von der Strahlungsintensität und damit von der Ausrichtung

erhöht. In diesen Fällen zeigen die Wärme- und Kältebedarfsverläufe die anfangs genannte gegenläufige Tendenz.

Die Varianten mit nur einem und mit drei Fenstern stellen beim Kältebedarf die oberen und unteren Grenzen über alle Varianten dar, da hier ausschließlich die besonders kleine bzw. große Fensterfläche den Ausschlag gibt. Beim Wärmebedarf bewegen sie sich zwischen allen anderen Varianten, da hier die Konkurrenz zwischen Transmissionswärmeverlusten und Solargewinnen besteht und die Ausrichtung der Fenster den Ausschlag gibt.

Eine Flächenvariation hat sich für die hier untersuchten Gebäudevarianten als nicht sinnvoll herausgestellt, da sowohl Wärme- als auch Kältebedarf erhöht werden. Folglich liegt die optimale Fläche für ein großes Lichtband unterhalb von 150 m^2 . Um diesen Wert genauer zu bestimmen, müssen weitere Simulationen durchgeführt werden. Die Varianten der Flächenvariation werden aus eben genannten Gründen nicht bei der Variation der Energiebereitstellung betrachtet.

Energiebereitstellung

Es wurden vier Technologien definiert, die den im ersten Arbeitsschritt ermittelten Energiebedarf für alle Gebäudevarianten bereitstellen sollen. Dabei werden immer Kombinationen eines Wärme- und eines Kälteerzeugers betrachtet, um den gesamten Jahresenergiebedarf decken zu können. Abbildung 5 zeigt die sich ergebenden Vollkosten der sieben

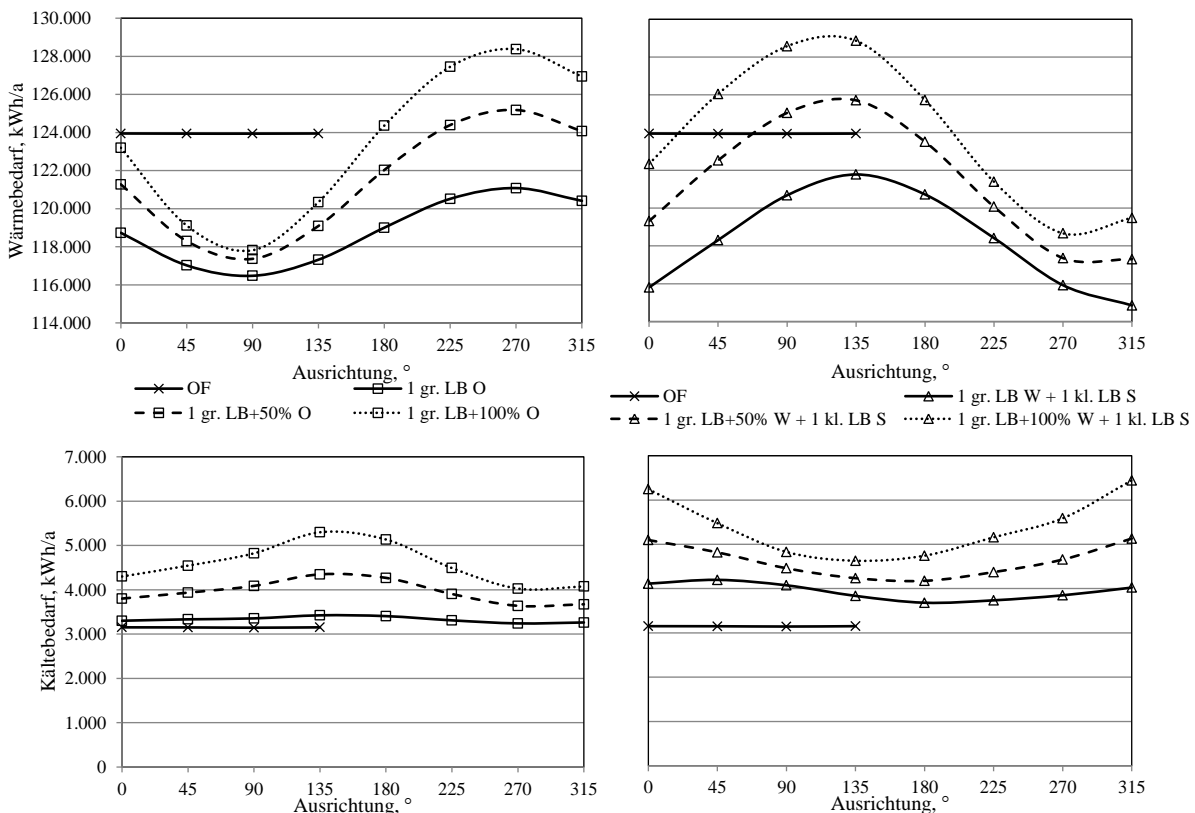


Abbildung 4 Wärme- und Kältebedarf ausgewählter Gebäudevarianten bei Fensterflächenvariation

Gebäudevarianten. Es wird deutlich, dass die Wahl des Heizungssystems einen größeren Einfluss auf die Vollkosten hat als die Gebäudevariante. Die Versorgung über den Gas-Brennwertkessel und die Kompressionskältemaschine (KKM) ist immer am kostengünstigsten gegenüber derselben Variante mit Öl-Brennwertkessel, die mehr als 3.000 €/a Mehraufwendungen mit sich bringt. Die Energiebereitstellung über eine Wärmepumpe und eine freie Kühlung ist für ein Gebäude bei einer bestimmten Ausrichtung aufgrund der hohen Investitionskosten immer höher als beide anderen Systeme. Die Vollkosten beginnen am oberen Rand der Energiebereitstellung aus Öl-Brennwertkessel und Kompressionskältemaschine.

Die Unterschiede in den Vollkosten verschiedener Gebäudevarianten und Ausrichtungen innerhalb einer Bereitstellungsart umfassen meist wenige hundert Euro und sind damit um etwa Faktor 10 geringer als die Unterschiede, die sich durch eine Variation der Bereitstellungstechnologie erreichen lassen. Insgesamt lassen sich geringe Kosteneinsparungen im unteren Prozentbereich (max. 6,5 %) innerhalb einer Bereitstellungstechnologiekombination verglichen mit der fensterlosen Variante „OF“ erreichen.

Es ist allerdings zu erkennen, dass die Integration von Fenstern sich grundsätzlich positiv auf die Kosten auswirkt, denn die Vollkosten des fensterlosen Gebäudes sind nahezu immer maximal. Einzige Ausnahme ist die Gebäudevariante „2 kl. LB N und S“, wenn sie mit Erdgas-Brennwertkessel und KKM versorgt wird. Generell ist der Anteil der Kühlenergiekosten an den Vollkosten bei einer Wärmebereitstellung aus Erdgas höher als bei den anderen Wärmeerzeugern, was auf den verhältnismäßig geringen Gaspreis zurückzuführen ist. Bei dieser Gebäudevariante, deren Wärmebedarf relativ nah an den Wärmebedarf der fensterlosen Variante heranreicht (vgl. Abb. 3), geben dementsprechend die Kühlenergiekosten, die bei Variante „OF“ niedriger sind, den Ausschlag und es werden leicht höhere Kosten erreicht.

Bei den hier gewählten Systemen werden die Vollkosten in der Regel durch den Wärmebedarf

dominiert. Die Variante mit dem niedrigsten Wärmebedarf, hier „2 gr. LB O und W“, weist gleichzeitig auch für jede Anlagentechnik die geringsten Gesamtkosten auf. Da bei dieser Variante gleichzeitig auch der Kältebedarf niedrig ist, entspricht dies den Erwartungen aus der Energiebedarfsoptimierung.

Es treten aber auch einige wenige Fälle auf, bei denen die Kostenverhältnisse zwischen den Gebäuden von der Anlagentechnik abhängen. Z.B. ist die Variante mit drei Fenstern („1 gr. LB W + 2 kl. LB N und S“) bei einer Energiebereitstellung über eine Wärmepumpe ganz leicht günstiger als die Variante „1 gr. LB W + 1 kl. LB N“. Bei einer Wärmebereitstellung über die Brennwertkessel ist dies nicht mehr der Fall. Dies gilt nur für den Fall, dass das große Lichtband der Halle nach Norden ausgerichtet ist (Ausrichtung 90°). In diesem Fall tritt in die Halle mit drei Fenstern ein Großteil des Tages über Solarstrahlung ein, was den Wärmebedarf trotz der großen Fensterfläche leicht unter den Wert der Variante mit zwei Fenstern senkt. Der Kühlenergiebedarf der Variante mit drei Fenstern ist zwar deutlich höher, da aber bei der Bereitstellung über die Wärmepumpe keine Kühlenergiekosten anfallen (freie Kühlung), ist diese Variante günstiger als die Variante mit zwei Fenstern. Bei den anderen Referenzanlagen geben die dann auftretenden Kühlkosten den Ausschlag, so dass die Drei-Fenster-Variante teurer ist als die Zwei-Fenster-Variante.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wird das Einsparungspotenzial in den Energiekosten zur haustechnischen Energieversorgung einer Industriehalle durch passive Maßnahmen an der Gebäudehülle untersucht. Es hat sich herausgestellt, dass das Potenzial sich in der Größenordnung von wenigen Prozenten bis maximal 6,5 % bezogen auf eine fensterlose Halle bewegt. Die Vollkosten für unterschiedliche Bereitstellungsarten können fast um 50 % abweichen, am günstigsten ist dabei immer eine Bereitstellung über Gas-Brennwertkessel und KKM. Diese Unterschiede sind durch Abweichungen in der Effizienz der Energie-

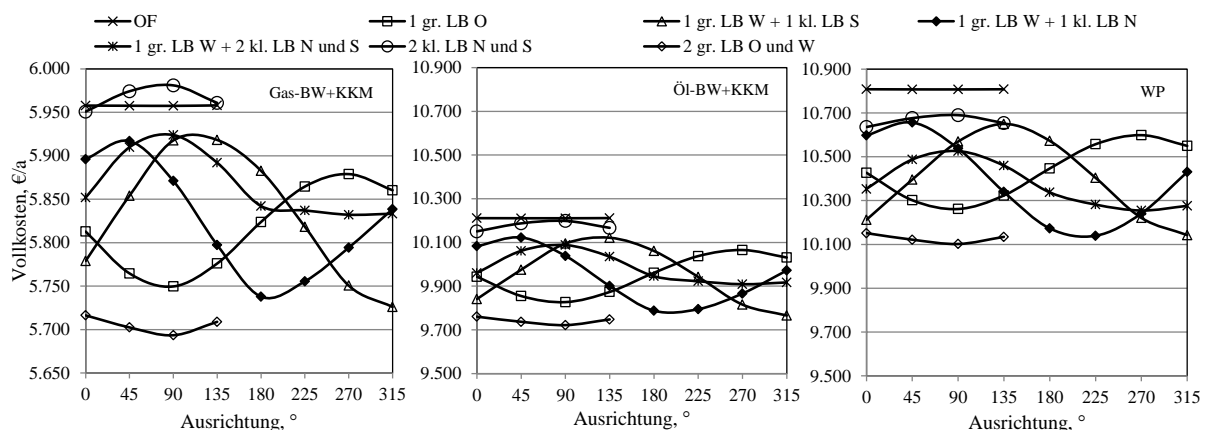


Abbildung 5 Jährliche Vollkosten ausgewählter Gebäudevarianten bei verschiedenen Energiebereitstellungstechnologien

bereitstellung und unterschiedliche Energieträgerpreise begründet. Die Anordnung der Fenster im Gebäude oder die Ausrichtung des Gebäudes hat auf der anderen Seite einen deutlich geringeren Einfluss auf die Vollkosten.

Eine Optimierung des Energiebedarfs einer Industriehalle dieser Gestalt kann in erster Linie über die Minimierung des Wärmebedarfs erfolgen, da dieser einen deutlich größeren Einfluss auf die Energiekosten hat als der Kühlenergiebedarf.

Wenn bei Umsetzung eines Neubauprojektes dieser Größenordnung folglich die Möglichkeit besteht, alle Fenster und die Ausrichtung der Halle frei zu wählen, so ist die symmetrische Gebäudevariante mit zwei großen Lichtbändern nach Norden und Süden aus Sicht der jährlichen Vollkosten zu bevorzugen. Die Einsparung an Kosten ist vorhanden aber relativ gering. Erzeugt werden sollte die Wärme in einem Erdgas-Brennwertkessel und die Kälte in einer Kompressionskältemaschine.

Diese Arbeit beruht auf einigen Annahmen, die mehr oder minder stark das Ergebnis bestimmen. Um die Berechnungen abzusichern und zu verbessern, kann in Zukunft an folgenden Punkten gearbeitet werden:

Das Gebäudemodell bildet als ein rein energetisches Modell eine Luftschichtung über der Hallenhöhe nur über Konvektionsenergieströme ab. Gerade bei höheren Hallen als der hier untersuchten ist dieses Vorgehen u.U. nicht mehr genau genug, sodass zu einem detaillierteren Schichtungsmodell unter Einbezug der Außenluftverhältnisse (Winddruck) übergegangen werden muss. Ab welcher Hallenhöhe dies notwendig ist, gilt es in diesem Fall zu bestimmen.

Als Referenzanlagen wurden hier ausschließlich Technologien verwendet, die einen Großteil der Energie über Strahlung übertragen. Eine Untersuchung weiterer Technologien, die Wärme über Konvektion übertragen, wäre sinnvoll.

Weiterhin haben die Energieträgerpreise, die hier zugrunde gelegt wurden, einen sehr großen Einfluss auf die Ergebnisse des zweiten Teils. Speziell der Ölpreis ist schwer festzusetzen, da er in den letzten Jahren extremen Schwankungen unterliegt. Die hier ermittelten Vollkosten sind daher nur zusammen mit den angesetzten Preisen zu bewerten. Bei einem niedrigeren Ölpreis würde z.B. der Unterschied zwischen dem Gas- und dem Ölkessel (jeweils zusammen mit der KKM) weitaus geringer ausfallen. Bei den Wärmepumpensystemen haben die Investitionen den größten Einfluss auf die sich ergebenden Vollkosten. Da solche Anlagen aber in dieser Größenordnung nicht oft Anwendung finden, besteht auch hier eine gewisse Unsicherheit in der Datengrundlage.

Die hier erstellte Kostenrechnung bezieht die Investitionen für die bautechnische Umsetzung der Hallenvarianten nicht mit ein. Es wird aber davon ausgegangen, dass dieser Ausschluss vertretbar ist, auch deshalb, weil das Vorhandensein von Fenstern zusätzlich Beleuchtungsenergie einspart, die den Investitionen der baulichen Maßnahmen entgegenwirkt. Weitere Vorteile wie die Steigerung der Produktivität aufgrund von besserer Tageslichtverfügbarkeit der Personen, die in solch einer Halle ihre Arbeit verrichten, lassen sich hier nicht beziffern, sind aber der Vollständigkeit halber aufzuführen.

LITERATUR

- BMU. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2010. Energiekonzept 2050 – Meilensteine und Bewertungen (www.bmu.de).
- BMWi. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2012. Energiedaten 2012 (www.bmwi.de).
- DIN. Deutsches Institut für Normung e.V. 2003. DIN V 4701-10. Beuth Verlag, Berlin. August 2003.
- DIN. Deutsches Institut für Normung e.V. 2003. DIN EN 12831. Beuth Verlag. August 2003.
- DIN. Deutsches Institut für Normung e.V. 2007. DIN 15251. Beuth Verlag, Berlin. August 2007.
- KWK-Infozentrum. 2012. Einspeisetarif für BHKW-Strom (<http://kwk-infozentrum.info>).
- Oschatz, B. 2011. Gesamtanalyse Energieeffizienz von Hallengebäuden (Entwurf – Änderungsvorschläge DIN V 18599). Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden. Universität Kassel Fachgebiet Bauphysik.
- Schreiber Innovatives Bauen. 2012. Standardhallen (www.schreiberstahlbau.de).
- VDI. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik 2010. VDI 2067 Blatt 1 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung. September 2010.