

## Regenerative Energiekonzepte zur Versorgung von Containergebäuden für verschiedene Klimazonen

J. Koke<sup>1</sup>, A. Schippmann<sup>1</sup>, X. Zhang<sup>2</sup>, J. Shen<sup>2</sup>, P. Kaufmann<sup>3</sup>, S. Krause<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Osnabrück, Campus Lingen

<sup>2</sup> Höskolan Dalarna, Borlänge, Schweden

<sup>3</sup> Institut für Strukturleichtbau und Energieeffizienz gGmbH, Chemnitz

### Abstract

Leichtbauanwendungen auf Basis des Containerbaus bieten ökologische und ökonomische Potenziale für das Bauwesen und sind daher relevant innerhalb der Energiewende zur Erreichung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes. Daher werden hier verschiedene Anwendungen in unterschiedlichen Klimazonen behandelt.

Dazu werden zunächst die globalen Klimazonen analysiert und containerbasierte Leichtbaulösungen mit ihren Energiebedarfen und Nutzerprofilen vorgestellt. Durch bautechnische Optimierungen wird nahezu ein Passivhausstandard hergestellt. Auf Basis dieser Eingangsdaten werden verschiedene Energiekonzepte diskutiert, bei denen Solar- und Windenergie, aber auch Biomasse als regenerative Energieträger integriert werden. Die Konzepte werden allesamt mit der Software Polysun<sup>®</sup> simuliert und analysiert. Die verschiedenen Ansätze werden insbesondere in Bezug Energieautarkie, aber auch in Bezug auf Umsetzbarkeit verglichen und bewertet. Beispielsweise können mit einem Konzept bestehend aus einer Photovoltaik-Anlage, Wärmepumpe zur Wärme- und Kälteerzeugung sowie integriertem Batteriespeicher, Wärme- und Kältespeicher sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

Schließlich wird noch der Einfluss der verschiedenen Klimazonen auf die erforderliche energietechnische Gebäudeausstattung sowie Potenziale für andere Anwendungskonzepte beschrieben.

### 1. Einleitung

Die Ausgangssituation ist gekennzeichnet durch die globale Forderung nach energieeffizienten Gebäuden zur Erreichung der im Pariser Klimaabkommen festgelegten Punkte. Weltweit entfallen ca. 9% der fossilen CO<sub>2</sub> Emissionen auf den Gebäudesektor [1]. Diese Emissionen lassen sich auf verschiedene Ursachen zurückführen, die regional sehr unterschiedlich sein können. In Deutschland entstehen beispielsweise im Bereich Wohnen 61% der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Raumwärme, 17% durch Elektrogeräte und Beleuchtung und 12% durch Warmwasser [2]. Neben den klassischen Wohngebäuden machen auch Nichtwohngebäude einen Anteil von 37 % des Anteils an Gebäudeenergieverbrauch aus [3]. In manchen Ländern bzw. Klimazonen hingegen spielt die Raumwärme gegenüber der erforderlichen Kühlung keine Rolle.

Eine weitere Herausforderung ist die globale demographische Entwicklung, die zu einem kontinuierlich steigenden Bedarf an preiswertem Wohnraum führt. Vorgefertigte und modulare Gebäude stellen einen zielführenden Beitrag zur Deckung dieser Bedarfe dar, und in den letzten Jahren wurden erhebliche Fortschritte bei der Anwendung vorgefertigter Gebäude und modularer Architektur erzielt [4]. Gegenüber dem konventionellen Massivbau ergeben sich Vorteile wie geringe Baukosten, hoher Vorfertigungsgrad und damit einhergehende kurze Montagezeiten, nachhaltig und ressourcenschonender Einsatz recycelter Materialien, sowie ein geringes Schadenspotenzial. Die Nutzung von ausgedienten Seecontainern, die oft tausendfach zur Verfügung stehen, bietet ein großes ökologisches Potenzial, da der verbaute Stahl nicht erst energieaufwändig eingeschmolzen werden muss [4].

Die aus dem Leichtbauprinzip resultierenden bauphysikalischen Nachteile der geringen Wärmedämmung und Speichervermögen, sowie des geringen Schallschutzes treten bei Containerbauwerken auf und werden teilweise durch erhöhten Materialaufwand verringert. Wesentliche Auswirkungen auf die Umwelt im Gebäude-Lebenszyklus sind allerdings auf die Nutzungs- und Betriebsphase zurückzuführen. Zum Beispiel berichten Ramesh et al. [5], dass die Nutzungsphase in den meisten Gebäuden 80% des Primärenergieverbrauchs im Lebenszyklus ausmacht. Dadurch entsteht Handlungsdruck für energieeffiziente Gebäude unter Einbeziehung energiesparenderer Technologien [6–9].

### 2. Vorgehensweise

Im ersten Schritt werden charakteristische Standorte für die Klimazonen definiert und anhand von Kennwerten miteinander verglichen. Im Schwerpunkt werden für drei Standorte unterschiedliche Nutzungsarten bzw. Anwendungsfälle festgelegt, die die aktuelle politische und demografische Entwicklung berücksichtigen. Für alle Nutzungsarten werden Gebäudekonzepte auf Basis von Containerelementen entwickelt und für die jeweilige Klimazone angepasst. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf einer effizienten Wärmedämmung der Objekte. Die Gebäudemodelle werden anschließend in der Gebäudesimulationssoftware IDA ICE implementiert, sodass die Energiebedarfe für Heizung und Kühlung ermittelt werden können. Außerdem werden die Wärmebedarfe für Trinkwarmwasser sowie die Strombedarfe für elektrische Haushaltsgeräte ermittelt. Auf Basis dieser Energiebedarfe werden für jede Nutzungsart verschiedene Energieversorgungskonzepte entwickelt und in die Software Polysun übertragen. Die Energiekonzepte basieren alle auf einer erneuerbaren Versorgung der Gebäude und sollen dabei einen möglichst hohen Autarkiegrad erreichen. Als Autarkiegrad wird in folgendem das Verhältnis aus der Eigenversorgung und dem gesamten Stromverbrauch verstanden. Dabei ist die Eigenversorgung der Stromverbrauch, der durch eigene Produktion gedeckt wird.

Zur Bewertung der Konzepte werden neben dem Autarkiegrad noch weitere wichtige Kennzahlen für betrachtet. Beispielsweise den für die Wärmeerzeugung nötigen Strombedarf (Pumpen und Wärmepumpe), die erzeugte elektrische Energie oder der in ein Stromnetz eingespeiste und vom Stromnetz bezogene Strom. Abschließend wird mit einem vereinfachten Prinzipmodell der Einfluss der Klimazonen auf die Autarkiegrade bei unterschiedlichem Stromverbrauch, unterschiedlicher Batteriegröße und Wärmedämmung untersucht.

### 3. Klimazonen

Das Klima der Erde lässt sich im Wesentlichen in 6 verschiedene Klimazonen einteilen: polare, subpolare, kaltgemäßigte, kühlgemäßigte, subtropische und tropische Zone (siehe Abbildung 1). Zur Analyse in Bezug auf die Energieversorgung der zu planenden Gebäude wurden zunächst charakteristische Städte für die unterschiedlichen Klimazonen definiert und charakterisiert. Die polare Zone wird hier nicht weiter betrachtet. Für die kühlgemäßigte Zone wurden Berlin und Taschkent ausgewählt, wobei sich das usbekische Taschkent durch ein besonders kontinentales Klima mit jahreszeitlich bedingten großen Temperaturschwankungen und besonders hoher Sonneneinstrahlung auszeichnet. Für die kaltgemäßigte Zone wurden Stockholm und Kiruna ausgewählt, wobei das schwedische Kiruna deutlich nördlicher liegt und daher geringere Temperaturen und Sonneneinstrahlung hat. Für die subpolare Zone wurden Murmansk und Reykjavik betrachtet, die ein vergleichbares Klima haben. Mumbai zeichnet sich durch ein tropisches Klima mit besonders hohen mittleren Temperaturen aus, wohingegen das subtropische Addis Abeba besonders hohe Sonneneinstrahlung erfährt und durch ein sogenanntes Tageszeitenklima geprägt ist, bei dem die mittleren Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht größer sind als die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Monaten.

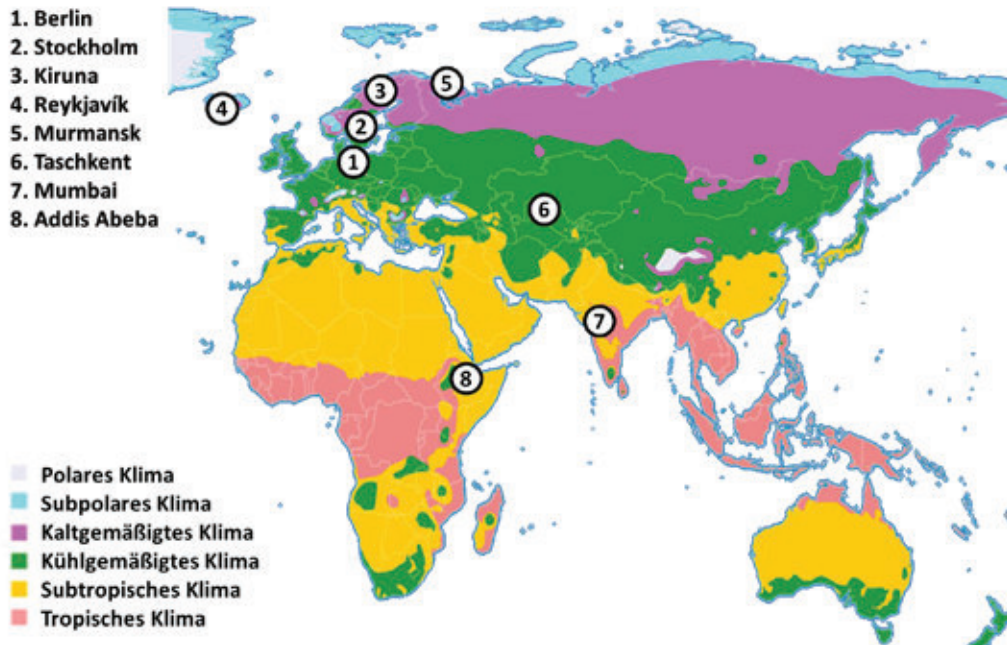


Abb. 1: Klimazonen und betrachtete Standorte

Die mittleren, minimalen und maximalen Temperaturen und deren tägliche Schwankungen werden in Tabelle 1 mit einander verglichen. Zusätzlich wird noch die jährliche Globalstrahlung, die mittlere Windgeschwindigkeit und die Anzahl Sonnstunden dokumentiert. (Die Spitzenwerte sind jeweils rot, die Minimalwerte grün hinterlegt).

Tab. 1: Klimatische Kennwerte für die betrachteten Standorte

	Klimazone	Mittlere Außen-temp. °C	Min. Außen-temp. °C	Max-Außen-temp. °C	Mittlere tägliche Temp.-differenz °C	Strahlung Global kWh/m <sup>2</sup>	mittlere Windgeschwindigkeit m/s	Sonnenstunden im Jahr h
1. Berlin	kühlgemäßigt	9,9	-8,8	33,1	7,0	985,5	4,2	2175,0
2. Stockholm	kaltgemäßigt	6,6	-16,9	27,1	6,7	921,8	3,4	2256,0
3. Kiruna	kaltgemäßigt	-0,87	-29,13	22,64	7,62	747,81	3,78	1239,00
4. Reykjavik	subpolar	4,7	-9,6	18,6	4,7	780,5	6,0	1163,0
5. Murmansk	subpolar	1,8	-34,4	28,7	6,9	816,9	2,9	1708,0
6. Taschkent	kühlgemäßigt	14,7	-10,9	40,5	11,6	1710,3	1,6	2638,0
7. Mumbai	tropisch	27,1	12,5	40,0	7,6	1829,6	2,1	1944,0
8. Addis Abeba	subtropisch	16,2	0,6	28,2	11,4	2033,7	3,9	2421,0

Die charakteristischen Strahlungskollektive lassen sich am besten durch die Häufigkeitsverteilung für die tägliche Strahlungsenergie analysieren (Abbildung 2). Insbesondere Mumbai und Addis Abeba zeichnen sich durch einen besonders großen Anteil an einstrahlungsstarken Tagen aus. Die anderen Standorte haben Ihr Maximum bei niedrigen und das Minimum bei hohen Einstrahlungswerten.

Taschkent hebt sich trotz des kühlgemäßigen Klimas mit überdurchschnittlich vielen strahlungsreichen Tagen ab.

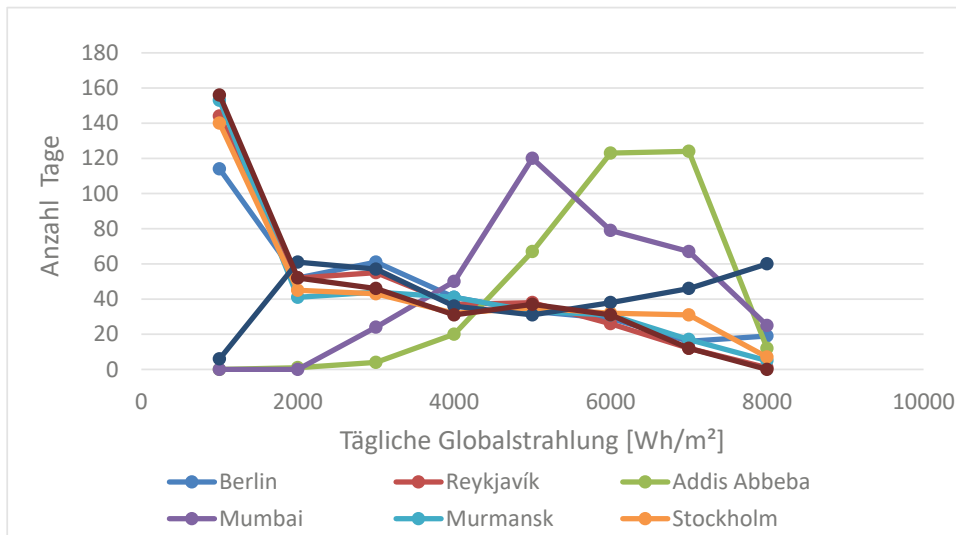


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der täglichen Globalstrahlung für verschiedene Städte

Schließlich wird noch eine Kenngröße entwickelt, mit der der Heiz- und Kühlbedarf für die jeweiligen Orte bewertet werden kann. Dazu werden die Temperatur-Zeitkurven integriert, und zwar einmal als Integral oberhalb der Temperatur 23°C und einmal unterhalb der Temperatur von 20°C (Abbildung 3). Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass bei Außentemperaturen größer 23°C ein theoretischer Kühlbedarf besteht und unterhalb von 20°C ein Heizbedarf. Auch wenn Heiz- und Kühlbedarf in besonderem Maß von den Gebäude- und Nutzungsgegebenheiten abhängen, so lässt sich über dieses Verfahren eine unabhängige Kenngröße zur Charakterisierung des klimatischen Verhältnisse in Bezug auf die Energieversorgung ableiten. Bis auf Mumbai überwiegen in allen Standorten die kalten Temperaturen deutlich, sodass das Heizen von übergeordneter Bedeutung ist. In Addis Abeba besteht das ausgeglichene Verhältnis zwischen warmen und kalten Temperaturen, weshalb Addis Abeba für eine energieautarke Versorgung gute Voraussetzungen bietet. Im folgenden werden die Standorte Berlin, Stockholm und Addis Abeba für konkrete Container-Anwendungen untersucht.

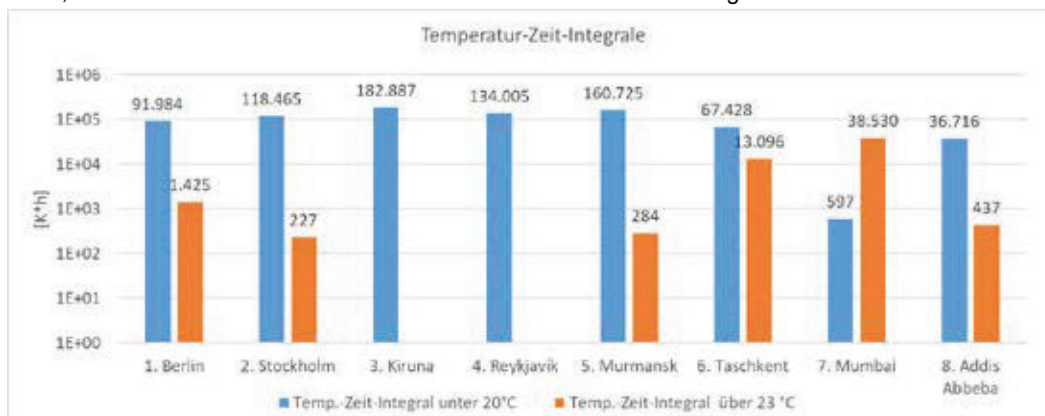


Abb. 3: Temperatur-Zeit Integrale für verschiedene Städte. Temperaturen oberhalb 23°C (Kühlen) und unterhalb 20°C (Heizen)

#### 4. Anwendungsfälle

Es wurden drei Anwendungsfälle zur vertiefenden Analyse betrachtet, für die je eine Nutzungsanwendung einem Standort zugeordnet wird:

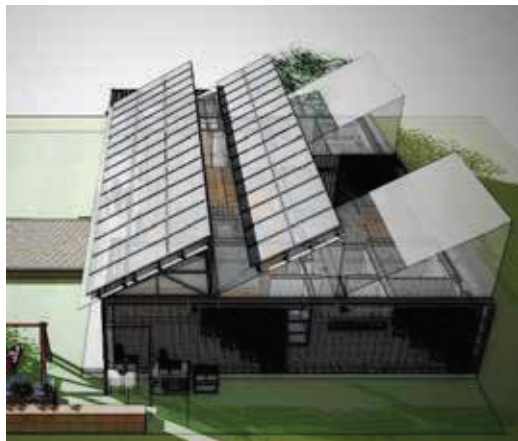
- Einfamilienhaus für den Standort Stockholm
- Mehrfamilienhaus für den Standort Berlin
- Schule für den Standort Addis Abeba

##### Einfamilienhaus, Stockholm, Schweden

Für den Standort Stockholm wird das Einfamilienhaus betrachtet, das aufgrund des verfügbaren Flächenangebots und dem derzeitigen Wunsch der schwedischen Bevölkerung nach nachhaltigem Wohnraum ausgewählt wurde.

Die Abb. 4 zeigt das Einfamilienhaus. Es ist sowohl für eine urbane als auch für eine ländliche Gegend geeignet. Das Gebäude hat eine Nettogrundfläche von 208 m<sup>2</sup> (17,06 m \* 12,18 m) und bietet auf einer Wohnfläche von 188 m<sup>2</sup> Platz für eine Familie mit bis zu 5 Personen. Es werden drei 20' HC und vier 40' HC ISO-Container verbaut. Der Heiz- und Kühlbedarf wird in diesem Fall durch den Passivhausstandard vorgegeben. Damit ergibt sich ein maximaler Heiz- und Kühlbedarf von jeweils 2.820 kWh [10]. Für den Strombedarf der elektrischen Ausstattung des Gebäudes wird ein niedriger (3.000 kWh/a) und ein hoher (6.000 kWh/a) durchschnittlicher Bedarf eines Einfamilienhauses aus Deutschland angesetzt [11]. Der Strombedarf wird auf mehrere Lastprofile, die dem ASHRAE Handbuch [12] entnommen sind, verteilt. Hinzu kommt noch der Strombedarf einer Lüftungsanlage, der mit 1.301 kWh/a angesetzt wird. Diese Werte beinhalten jeweils noch nicht den Strombedarf für die Wärme- und Kälteerzeugung (Wärmepumpe, Heizkreispumpen, etc.).

Einfamilienhaus	
Standort	Stockholm, Schweden
Nutzfläche	208 m <sup>2</sup>
Container	3 * 20' HC 4 * 40' , HC
Wärmebedarf	max. 2.820 kWh/a*
Warmwasserbedarf	4.450 kWh/a
Kühlbedarf	max. 2.820 kWh/a*
Strombedarf	3.000/6.000 kWh/a



**Abb. 4: Daten und grafische Darstellung des Einfamilienhauses**  
(\* gemäß Passivhaus-Standard)

##### Schule, Addis Abeba, Äthiopien

Für den Standort in Addis Abeba wird eine Schule geplant. Die Bevölkerung in Äthiopien hat sich in den letzten 30 Jahren mehr als verdoppelt, und die Wachstumsrate nimmt nicht ab [13]. Der Bedarf nach Bildung ist dementsprechend hoch. Abbildung 5 zeigt das geplante Containergebäude für eine Schule. Diese ist vor allem für ländliche Bereiche gedacht. Die Schule bietet in der gezeigten Variante Platz für 30 Schüler mit Verwaltungsräumen und einer Küche, sowie Cafeteria. Durch den modularen Aufbau der Container kann die Nutzfläche durch Aufstellen weiterer Container erhöht werden. Aufgrund des milden



Klimas in Äthiopien ist für die Schule keine Heizung der Räume vorgesehen. Für den Warmwasserbedarf werden 4.100 kWh/a veranschlagt. Der Kühlbedarf liegt bei 9.600 kWh/a im Jahr. Der Strombedarf für die elektrische Ausstattung und Lüftung des Gebäudes liegt bei 11.085/a kWh. Der Schulbetrieb wird zwischen 8 Uhr und 18 Uhr mit zweistündiger Mittagspause stattfinden. Dabei werden fünf Unterrichtstage pro Wochen und fünf Wochen Ferien berücksichtigt.

Schule	
Standort	Addis Abeba, Äthiopien
Kapazität	30 Schüler
Container	1 * 20' 7 * 40'
Wärmebedarf	0 kWh
Warmwasserbedarf	4.100 kWh/a
Kühlbedarf	9.600 kWh/a
Strombedarf	11.085 kWh/a



Abb. 5: Daten und grafische Darstellung der Schule

#### Mehrfamilienhaus, Berlin, Deutschland

Wegen des geringen Platzangebots innerhalb von deutschen Großstädten und der großen Nachfrage nach bezahlbarem Wohnraum wurde für Berlin ein Mehrfamilienhaus für vier Familien definiert. Abbildung 6 zeigt dieses Gebäude mit insgesamt 440m<sup>2</sup> Nutzfläche. Aufgrund des Klimas in Deutschland ergab die Simulation mit IDA ICE keinen Kühlbedarf. Der Wärmebedarf liegt bei 27.045 kWh/a davon 20.899 kWh/a für Warmwasser. Der Strombedarf für die elektrische Ausstattung beträgt 13.435 kWh/a und für die Lüftung 4.758 kWh/a.

Mehrfamilienhaus	
Standort	Berlin, Deutschland
Nutzfläche	440 m <sup>2</sup>
Container	8 * 20' HC 9 * 40' HC
Wärmebedarf	27.045 kWh
Warmwasserbedarf	20.900 kWh/a
Kühlbedarf	0 kWh/a
Strombedarf	13.435 kWh/a



Abb. 6: Daten und grafische Darstellung des Mehrfamilienhauses

Abbildung 7 zeigt den Wand- und Decken Aufbau für alle drei Gebäude, der als Basis für die Gebäudesimulationen benutzt wird. Dieser wurde nach dem schwedischen Stand der Technik erstellt. Dabei wird die Wandkonstruktion an die bestehende Containerwand angebaut. Für den Boden ist ein Betonfundament und eine 0,18 m dicke Dämmung aus Polystyrol unterhalb des Containerbodens

vorgesehen. Der gewünschte Bodenbelag für die Inneneinrichtung kann direkt auf den vorhandenen Containerboden verlegt werden.

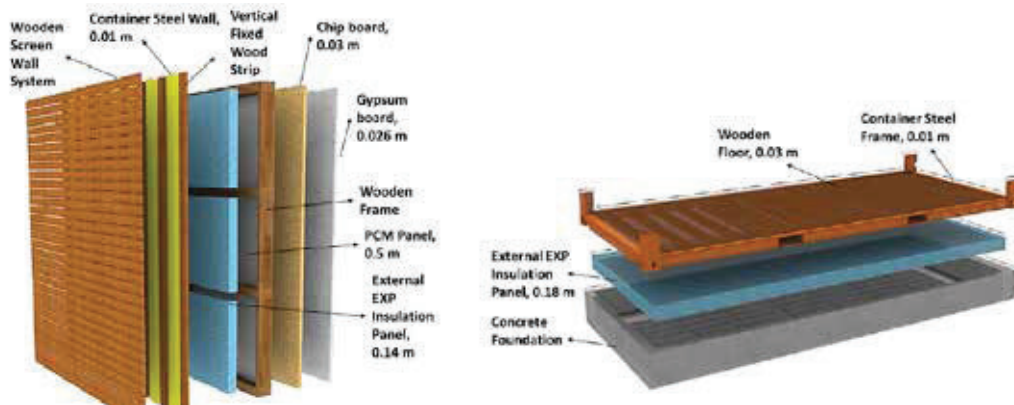


Abb. 7: Wand- und Bodenaufbau für Mehrfamilienhaus und Schule

Beim Einfamilienhaus reicht dieser Wandaufbau aufgrund des ungünstigen Oberflächen-/Volumenverhältnisses jedoch nicht aus, um den Passivhaus-Standard zu erreichen. Durch den Einsatz von Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) kann dieser Standard erreicht werden. Abbildung 8 zeigt den geplanten Wand- und Dachaufbau mit deutlich verbesserten U-Werten. Abbildung 9 zeigt den Bodenaufbau des Containers. Diese Wandaufbauten sind für den Neubau von Containerlösungen geplant, lassen sich aber auch auf bestehende Seecontainer anwenden.

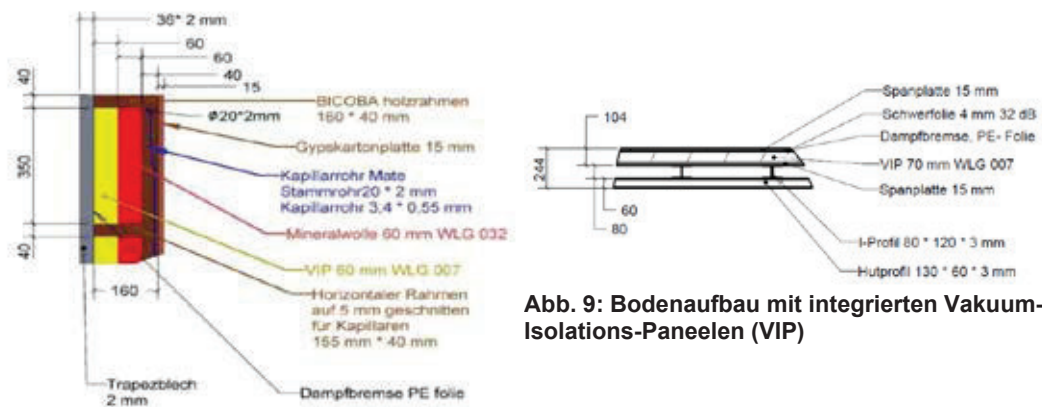


Abb. 8: Wandaufbau mit integrierten Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP)

Abb. 9: Bodenaufbau mit integrierten Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP)

## 5. Energiekonzepte

Auf Basis der ermittelten Energiebedarfe entstehen die folgenden Energieversorgungskonzepte, bei denen die Maximierung des Autarkiegrades im Vordergrund steht. Alle Konzepte werden jeweils für die drei Anwendungsfälle ausgelegt.

- 1) Luftwärmepumpe mit Photovoltaik: Eine Luft-Wärmepumpe zur Bereitstellung von Wärme und Kälte wird mit je einem Wasserspeicher für Wärme und Kälte kombiniert. Die Photovoltaik Anlage nutzt die gesamte zur Verfügung stehende Dachfläche. Als Stromspeicher fungiert eine DC-

Batterie. Um den Autarkiegrad noch weiter zu erhöhen, ist im Speicher ein elektrischer Heizstab integriert, der den Speicher oberhalb der Arbeitstemperatur der Wärmepumpe mit überschüssigem, selbst erzeugtem Solarstrom weiter belädt.

- 2) Erdwärmepumpe mit Photovoltaik: Eine Erdwärmepumpe stellt die Wärme bereit. Als Wärmespeicher wird ein Wasserspeicher eingesetzt. Die Kühlung erfolgt direkt über einen Wärmeübertrager, der mit der Sole aus der Erdsonde durchströmt wird. Photovoltaik, Batterie und Heizstab kommen wie in Konzept 1 zum Einsatz.
- 3) Blockheizkraftwerk mit Photovoltaik: Ein mit Biogas betriebenes Blockheizkraftwerk erzeugt Wärme und Strom. Um die Laufzeiten des BHKWs vor allem im Sommer zu verlängern, wird als Kälteerzeuger eine Absorptionskältemaschine eingesetzt. Es werden je ein Wasserspeicher für Wärme und Kälte eingesetzt. Da das BHKW auf einem höheren Temperaturniveau arbeitet als die Wärmepumpe, kommt kein elektrischer Heizstab zum Einsatz. Photovoltaik und Batteriespeicher sind wie in Konzept 1 integriert.
- 4) Luftwärmepumpe mit Solarthermie und Photovoltaik: Im Gegensatz zu Konzept 1 wird die Fläche der Photovoltaik Anlage verringert, um Platz für eine kleine Solarthermie Anlage zur Verfügung zu stellen (bis zu 8 Kollektoren oder 16 m<sup>2</sup>).
- 5) Luftwärmepumpe mit Hybridkollektoren (PVT) und Photovoltaik: Die Solarthermiekollektoren aus Konzept 4 werden durch Hybridkollektoren ersetzt
- 6) Luftwärmepumpe mit Hybridkollektoren: Die gesamte Dachfläche wird mit Hybridkollektoren belegt. Ansonsten wie Konzept 1. Ausnahmen Mehrfamilienhaus: Nur die Balkonbrüstung wird mit Hybridkollektoren belegt.
- 7) Luftwärmepumpe mit Photovoltaik und Windkraftanlage: Zusätzlich zu allen Komponenten aus Konzept 1 wird eine 3,5 kW Windkraftanlage integriert.

## 6. Ergebnisse

Im Folgenden werden die 7 Konzepte für die 3 Anwendungsfälle simuliert. In allen Fällen wird der Strombedarf für Wärmeerzeugung, Autarkiegrad, Stromerzeugung mittels Photovoltaik, Stromerzeugung und der Netzbezug ausgewertet.

### Einfamilienhaus, Schweden

Es werden zwei Verbraucherszenarien mit unterschiedlichem Strombedarf für elektrische Geräte simuliert: niedriger Strombedarf 3000 kWh; hoher Stromverbrauch 6000 kWh. Folgende Spezifikationen kommen für die Konzepte 1 bis 7 für das Einfamilienhaus zum Einsatz:

- Wärmepumpe: Leistung 8 kW + 2x Wasserspeicher 1000 l
- Photovoltaik: Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 45°, Leistung 22,5 kWp (Konzept 1-3,7) / 19,2 kW (Konzept 4+5), Polykristallin, Nennleistung STC 300 W
- Solarthermie: Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 45°, Bruttogesamtfläche 16 m<sup>2</sup>, Flachkollektoren
- Hybridkollektoren: Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 45°, Bruttogesamtfläche 17 m<sup>2</sup>, Leistung 2,95 kWp (Konzept 5) / 22,1 kWp (Konzept 6)
- Batterie: Kapazität 20 kWh, Li-Ion



**Tab. 2: Ergebnisse der Polysun Simulation für das Einfamilienhaus bei einem Strombedarf der elektrischen Ausstattung von 3000 kWh und 6000 kWh**

<b>Einfamilienhaus</b>		Luft-WP + PV	Erd-WP + PV	BHKW + PV	Luft-WP + Solarthermie + PV	Luft-WP + PVT + PV	Luft WP + PVT	Luft-WP + PV + Wind
<b>Stockholm 3000 kWh</b>								
Strombedarf für Wärmeerzeugung	kWh	6850	4.996	169	5.596	6.815	332	6.561
Autarkiegrad	%	80,2	74,3	84,5	72,8	75,2	72,2	80,3
Erzeugung PV (AC)	kWh	22.439	22.439	22.439	19.163	20.532	12.649	22.439
Eigenversorgung	kWh	8794	6.908	3.776	7288	8.380	3366	8.684
Netzbezug	kWh	2210	2.504	721	2.709	2.777	1313	1.183
<b>6000 kWh</b>								
Strombedarf für Wärmeerzeugung	kWh	6.807	4.915	169	5.463	6.729	332	6.492
Autarkiegrad	%	76,5	64,2	92,3	69,9	71,7	67,5	75,1
Erzeugung PV (AC)	kWh	22.439	22.439	22.439	19.163	20.532	12.649	22.439
Eigenversorgung	kWh	10.827	7.843	6.894	8.951	10.093	5.191	10.372
Netzbezug	kWh	3.325	4.523	635	3.868	3.992	2506	1.875

Tabelle 2 zeigt die Simulationsergebnisse für das Einfamilienhaus bei niedrigem und hohem Strombedarf. Die Photovoltaik Anlage liefert für den Standort in Schweden einen Ertrag von ca. 1000 kWh/kWp, sodass mit Konzept 1 bei niedrigem Strombedarf ein Autarkiegrad von 80 % möglich ist. Auffallend ist, dass der Autarkiegrad nur um wenige Prozentpunkte sinkt, obwohl der Strombedarf sich im zweiten Szenario verdoppelt. Dies ist unter anderem auf die sehr groß dimensionierte Photovoltaikanlage und den Speicher zurückzuführen. Bei dem niedrigen Stromverbrauch werden mehr als 60 % des erzeugten Stroms in das Netz eingespeist. Bei doppelt so hohem Stromverbrauch sind es immer noch knapp 50 %.

Konzept 3 (BHKW + PV) erreicht mit 84,4 % bei dem niedrigen Stromverbrauch einen hohen Autarkiegrad. Der Vorteil des BHKWs, die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme, kann allerdings aufgrund des niedrigen Stromverbrauches kaum genutzt werden. Mehr als die Hälfte der durch das BHKW erzeugten Energie muss ins Stromnetz eingespeist werden. Dies ändert sich bei dem höheren Strombedarf, sodass in diesem Fall ein noch höherer Autarkiegrad von 92,3 % möglich ist. Zu beachten bleibt dabei aber, dass es sich bei der Autarkie nur um eine elektrische Autarkie handelt. Der biogene Brennstoffverbrauch des BHKWs bleibt dabei unberücksichtigt.

In weiten Teilen Schwedens wäre der Betrieb einer Windkraftanlage aufgrund der guten Windverhältnisse denkbar. Konzept 7 (Luft-WP + PV + Windkraftanlage) erreicht mit Hilfe einer 3,5 kW Windkraftanlage einen Autarkiegrad von über 80 %. Allerdings ist dieser nur unwesentlich höher als in Konzept 1. Unter wirtschaftlichen Aspekten wird eine Windkraftanlage in der derzeitigen Situation keine sinnvolle Lösung darstellen.

Das Konzept 6, bei dem das gesamte Dach mit Hybridkollektoren bedeckt ist, erweist sich für den Autarkiegrad als nicht optimal, da die erzeugte Wärme der Kollektoren aufgrund des niedrigen Bedarfs nicht abgeführt werden kann. Die Kollektoren erhitzen sich stark und der Wirkungsgrad der

Stromerzeugung sinkt stark.

### Schule, Äthiopien

Folgende Spezifikationen der Komponenten gelten für die Konzept 1-7 für die Schule:

- Wärmepumpe: Leistung 5 kW + 2x Wasserspeicher 1000 l
- Photovoltaik: Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 20°, Leistung 12,6 kWp (Konzept 1-3,7) / 9,9 kW (Konzept 4+5), Polykristallin, Nennleistung STC 300 W
- Solarthermie: Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 20°, Bruttogesamtfläche 16 m², Flachkollektoren
- Hybridkollektoren: Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 20°, Bruttogesamtfläche 17 m², Leistung 2,95 kWp (Konzept 5) / 12,39 kWp (Konzept 6)

Die Dachfläche des Gebäudes reicht aus, um eine Photovoltaik Anlage mit 12,6 kWp zu installieren. Im Gegensatz zum Einfamilienhaus soll das Warmwasser nur zum Händewaschen genutzt werden, sodass die Warmwassertemperatur an den Zapfstellen auf 40°C reduziert wird.

**Tab. 3: Ergebnisse der Polysun Simulation für die Schule**

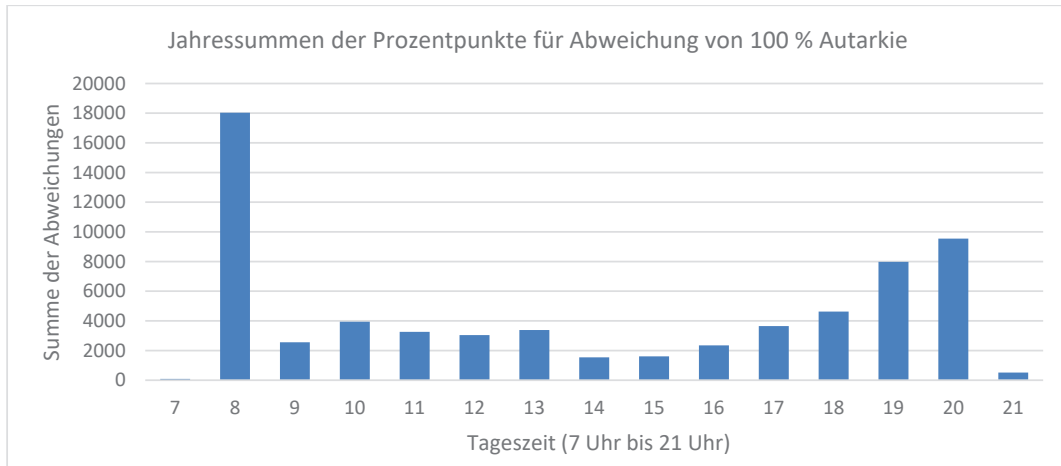
Schule		Luft-WP + PV	Erd-WP + PV	BHKW+ PV	Luft-WP Solar- thermie + PV	Luft- WP PVT + PV	Nur PVT	Luft- WP + PV + Wind
<b>Addis Abeba</b>								
Strombedarf für Wärmeerzeugung	kWh	6.903	4.910	854	4.036	5.244	1.150	6.085
Autarkiegrad	%	84,2	79,4	91,7	75,6	81,7	64,7	85,1
Erzeugung PV (AC)	kWh	18.906	18.906	18.906	14.850	17.112	10.609	18.906
Eigenversorgung	kWh	15.146	12.696	10.948	11.432	13.338	7.912	14.285
Netzbezug	kWh	2.873	3.365	1.010	3.731	3.052	4.359	2.936

Die Photovoltaik kann aufgrund der guten Wetter- und Klimaverhältnisse einen um 50 % besseren Ertrag als in Schweden erzeugen. Der Ertrag liegt bei ca. 1500 kWh/kWp. Da durch den Schulbetrieb der gesamte Bedarf nur Tagesüber anfällt, können 80 % des Photovoltaikstroms direkt genutzt werden. Außerdem begünstigt die Lage am Äquator die Autarkie deutlich. Die Sonneneinstrahlung ist bereits nach wenigen Tagestunden hoch, und dies gilt das ganze Jahr über.

Obwohl die Photovoltaik in Konzept 1 nur knapp 1000 kWh mehr produziert hat als im ganzen Jahr nötig waren, ist ein bemerkenswert guter Autarkiegrad von 84,2 % möglich.

Wie schon bei dem Einfamilienhaus reicht der Wärmebedarf nicht aus, um die Wärme der Hybridkollektoren aus Konzept 6 abzuführen. Das Konzept erreicht den schlechtesten Autarkiegrad.

In Äthiopien haben nur 4,8 % der Menschen auf dem Lande, wo der Großteil der Menschen lebt, Zugang zum öffentlichen Stromnetz [14]. Deswegen soll untersucht werden, zu welchen Tageszeiten mit Einschränkungen in der Energieversorgung zu rechnen ist, falls kein Anschluss an das Stromnetz vorhanden ist. Dazu werden für einen Jahresgang die Autarkiegrade zu jeder Tageszeit betrachtet. Die jeweilige Abweichung zur vollständigen Energieautarkie wird in Prozentpunkten ermittelt und für jede Tageszeit aufsummiert. Abbildung 10 stellt die Jahressumme der Prozentpunkte über der Tageszeit dar. Eine hohe Abweichung bedeutet, dass nicht genug Strom für den regulären Betrieb der Einrichtung zur Verfügung steht. Die größte Abweichung befindet sich in der ersten Stunde des Schulbetriebs. Über den Tag verteilt halten sich die Abweichungen dann im Vergleich dazu sehr gering. Erst abends ist ein weiterer Anstieg zu sehen.



**Abb. 10: Jahressumme der Abweichungen von 100 % Autarkie für die Stunden in denen Schulbetrieb stattfindet (Konzept 1).**

**Mehrfamilienhaus, Deutschland**

Das Mehrfamilienhaus in Deutschland hat aufgrund seiner Bauform im Verhältnis zur Nutzfläche nur eine geringe Dachfläche, sodass auch die Balkonbrüstung als Energieumwandlungsfläche genutzt werden sollen. Je nach Konzept wurden diese mit Photovoltaik-, Solarthermie- oder Hybridkollektoren ausgestattet.

Folgende Spezifikationen kommen für die Konzepte 1 bis 7 für das Mehrfamilienhaus zum Einsatz:

- Wärmepumpe: Leistung 5 kW + 2x Wasserspeicher 1000 l
- Photovoltaik (Dach): Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 30°, Leistung 15 kWp (Konzept 1-4,6+7) /12 (Konzept 5), Polykristallin, Nennleistung STC 300 W
- Photovoltaik (Balkonbrüstung): Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 90°, Leistung 6 kWp (Konzept 1-3,5,7) /12
- Solarthermie: Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 90°, Bruttogesamtfläche 36 m², Flachkollektoren
- Hybridkollektoren (Dach): Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 30°, Bruttogesamtfläche 17 m², Leistung 2,95 kWp
- Hybridkollektoren (Balkonbrüstung): Ausrichtung 0°, Anstellwinkel 90°, Bruttogesamtfläche 34 m², Leistung 5,9 kWp

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse für das Mehrfamilienhaus. Bei Nutzung der gesamten zur Verfügung stehenden Dachfläche und der Balkonbrüstung durch Photovoltaik lassen sich so 19.233 kWh Strom erzeugen, das entspricht 915 kWh/kWp.

Der so erzeugte Strom reicht bei weitem nicht aus, um den gesamten Bedarf zu decken. Lediglich Konzept 3 (BHKW) erreicht bei diesen Randbedingungen einen Autarkiegrad von 84,5 %. Ohne ein BHKW ist derzeit nur ein Autarkiegrad von 45 % möglich. Um diesen noch weiter zu erhöhen ist geplant, noch weitere Fassadenfläche zur energetischen Nutzung mit Photovoltaik auszustatten.

**Tab. 4: Ergebnisse der Polysun Simulation für das Mehrfamilienhaus**

Mehrfamilienhaus Berlin		Luft-WP + PV	Erd-WP + PV	BHKW + PV	Luft-WP Solarthermie + PV	Luft-WP PVT + PV	PVT Balkon	Luft-WP + Wind + PV
Strombedarf für Wärmeerzeugung	kWh	31.425	11.322	51,2	31.390	32.650	70,5	28.222

Autarkiegrad	%	30,8	39,7	84,5	25,2	29,7	45,6	38,3
Erzeugung PV (AC)	kWh	19.233	19.233	19.233	14.878,6	18.848	17.888	19.233
Eigenversorgung	kWh	15.272	11.703	15.416	12.604	15.104	8.331	13.770
Netzbezug	kWh	34.397	17.876	2.908	37.025	35.789	9.995	32.694

### Prinzipmodell Einfamilienhaus in verschiedenen Klimazonen

Abschließend wird der Einfluss aller eingangs betrachteten Standorte auf die Energieautarkie untersucht. Für diese Bewertung wird in Polysun ein vereinfachtes Prinzipmodell verwendet, welches das energetischen Verhalten des oben beschriebenen Einfamilienhauses abbildet. Dieses basiert auf einer dynamischen Berechnung anhand der Wetterdaten und der Gebäudedaten. Da für die drei Anwendungsfälle am festgelegten Standort der Wärmebedarf bereits zur Verfügung stand, basiert die Simulation dieser konkreten Fälle auf der Heizlast, sodass es zu geringen Abweichungen zwischen den Ergebnissen für Prinzip- und Detailmodell kommen kann.

Für die Standorte werden zusätzlich die Parameter Batteriegöße, Stromverbrauch und Wärmedämmung variiert. In Abb. 10 sind Ergebnisse dargestellt für elektrische Stromverbräuche von 3000 kWh/a und 6000 kWh/a sowie für Batteriespeichergößen von 10kWh und 20kWh. Generell sollte der Autarkiegrad mit abnehmender Speichergöße abnehmen. Der Effekt ist bei allen Standorten, bis auf Reykjavik, erkennbar und bei Standorten mit wenig Sonneneinstrahlung weniger ausgeprägt (Kiruna, Murmansk). Dort kann der Batteriespeicher kleiner ausgelegt werden. Sollte der Stromverbrauch besonders hoch sein, sinkt der Autarkiegrad erwartungsgemäß. Die Auswirkung der Speichergöße ist in sonnenreichen Standorten besonders ausgeprägt (Mumbai, Taschkent).

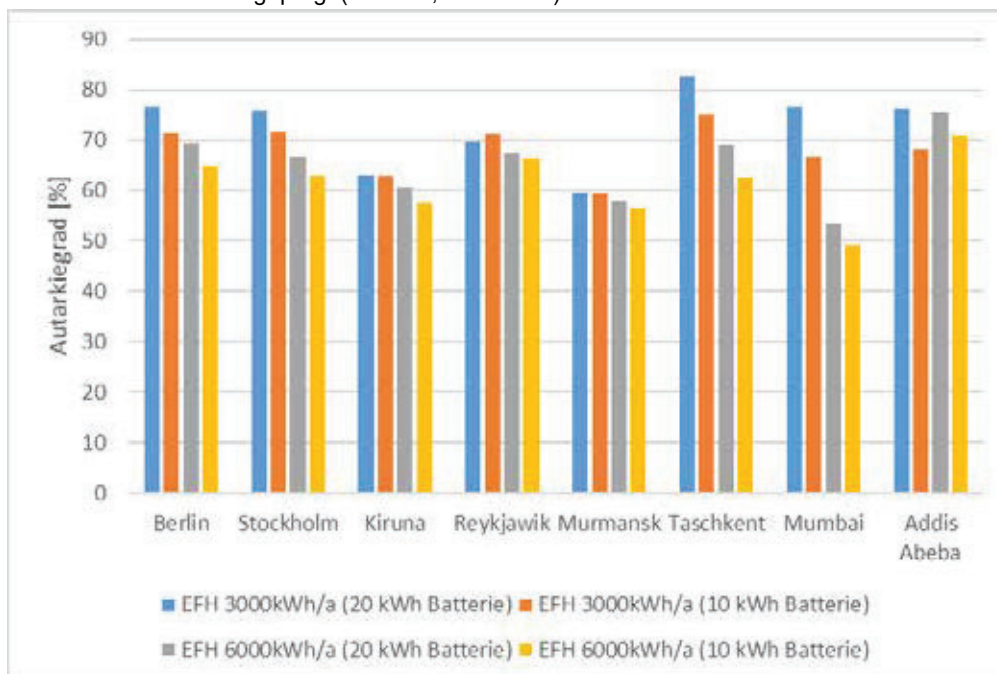


Abb. 11: Vergleich des Autarkiegrades bei unterschiedlichen Stromverbräuchen und Batteriespeichergößen für mehrerer Standorte (Einfamilienhaus)

Der in den vorhergehenden Untersuchungen verwendete Passivhausstandard ist aufgrund der aufwändigen Technik mit Vakuum-Isolations-Paneelen relativ kostenintensiv. Daher soll auch noch der Einfluss solcher Wärmedämmsysteme für unterschiedliche Klimazonen simuliert werden. Dazu wird das Containergebäude im Passivhaus-Standard (hier  $U=0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) mit einem konventionell mit Glaswolle gedämmten Containergebäude ( $U=0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) simuliert. Die Wärmekapazität des konventionell gedämmten Gebäudes sei hier 30% geringer. Man stellt fest, dass eine besondere Hochwärmedämmung in den warmen und sonnenreichen Standorten nicht vorteilhaft ist, sodass die Gebäude hier ökonomisch günstiger ausgeführt werden können. Die Autarkiegrade unterscheiden sich hier kaum (Taschkent, Mumbai, Addis Abeba). In den anderen Fällen reduziert sich der Autarkiegrad um ca. 3-8 Prozentpunkte.

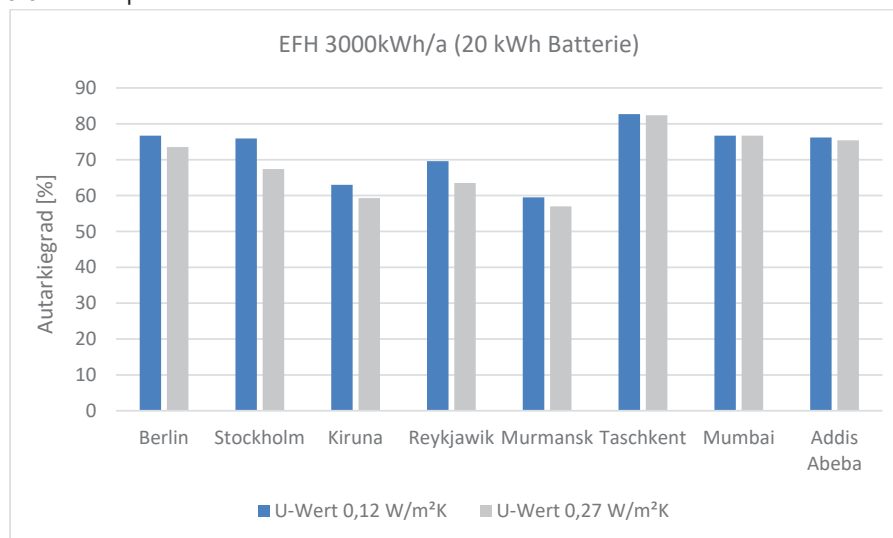


Abb. 12: Autarkiegrad für mehrere Standorte bei verändertem U-Wert des Gebäudes (Einfamilienhaus)

## 7. Fazit und Ausblick

In dieser Studie wurden drei verschiedene Typen von Containergebäuden für unterschiedliche Klimazonen definiert und mittels Simulation bewertet. Containergebäude besitzen aufgrund der Leichtbauweise eine günstige Ökobilanz, was durch einen hohen Recyclinganteil noch günstiger wird. Die ausgewählten Standorte unterscheiden sich teilweise gravierend bezüglich der klimatischen Verhältnisse. Daher wurden systematisch für alle Anwendungsfälle Energieversorgungskonzepte erarbeitet, die einen möglichst hohen Autarkiegrad ermöglichen sollten, wobei ein Autarkiegrad von ca. 80% als realistische Zielgröße betrachtet werden kann. Die höchsten Autarkiegrade für das Einfamilienhaus in Schweden sowie die Schule in Addis Abeba wurden durch ein System mit Luft-Wärmepumpe/Photovoltaik oder aber ein Blockheizkraft/Photovoltaik erreicht, wobei das System Wärmepumpe/Photovoltaik aus ökonomischer Sicht vorteilhaft ist.

Für das Mehrfamilienhaus in Deutschland ist bei den gegebenen Verhältnissen ein hoher Autarkiegrad um die 80% nur mit einem BHKW zu erreichen.

Um den Einfluss der Klimazonen auf das Energiesystem zielgerichtet zu untersuchen, wurde ein Prinzipmodell, das in etwa dem Einfamilienhaus entspricht, erstellt und für alle vorgestellten Standorte simuliert. Aus den Ergebnissen ist ableitbar, dass die Wärmedämmung und Speichergröße individuell an die klimatischen Verhältnisse angepasst werden müssen. Insgesamt ist Addis Abeba aufgrund des ausgeglichen Klimas für eine Energieautarkie besonders günstig.

Mit den Erkenntnissen dieser Studie werden die Containergebäude sowie deren Energiesysteme weiter optimiert, insbesondere auch unter ökonomischen Aspekten.



## 8. Literaturverzeichnis

- [1] IEA - CO2 Emissions From Fuel Combustion 2018, Seite 12 (2018)
- [2] Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen – Teil 2: Energie, Tabelle 3.3.6.5 (2018)
- [3] Deutsche Energie-Agentur GmbH. Dena Gebäudereport 2016: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand (2016)
- [4] Ch. Dara, C. Hachem-Vermettea, G. Assefab G.; Life cycle assessment and life cycle costing of container-based single-family housing in Canada: A case study; Building and Environment 163 (2019)
- [5] T. Ramesh, R. Prakash, K. Shukla; Life cycle energy analysis of buildings: an overview, Energy Build. 42 (2010)
- [6] C. Hachem-Vermette, Multistory building envelope: creative design and enhanced performance, Sol. Energy 159 (2018)
- [7] R. Beckett, C. Hachem, Building envelope energy optimization for multistory buildings, Canada Conf. Build. Sci. Technol. (CCBST 2017), Vancouver, Canada (2017)
- [8] Y. Bichiou, M. Krarti, Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings, Energy Build. 43 (2011)
- [9] S.B. Sadineni, S. Madala, R.F. Boehm, Passive building energy savings: a review of building envelope components, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 3
- [10] Passivhaus Institut. Kriterien für den Passivhaus-, EnerPhit- und PHI Energiesparhaus-Standard, Version 9f (2016)
- [11] co2online gemeinnützige GmbH. Stromspiegel für Deutschland 2019, 1.Auflage (2019)
- [12] American Society of Heating, Refrigerating. (2005, 7 1). 2005 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS. Retrieved 3 13, 2019,
- [13] Laenderdaten.info. Äthiopien, <https://www.laenderdaten.info/Afrika/Aethiopien/bevoelkerungswachstum.php>
- [14] Deutsche Energie-Agentur GmbH. Länderprofil Äthiopien: Informationen zur Nutzung und Förderung erneuerbarer Energien für Unternehmen der deutschen Branche, (2014)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

