

Technologien zur solaren Kühlung in Wohngebäuden weltweit und in Gebäuden des sozialen Wohnungsbaus in Mexiko

Einführung, Praxisbeispiele und Anwendungspotenziale für Mexiko

Impressum

Dieses Dokument wurde im Rahmen des Projekts: „NAMA Facility Projekt: Umsetzung der Wohnungsneubau-NAMA in Mexiko/Technische Komponente“ erstellt. Das Projekt wird über die NAMA Facility vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und vom britischen Ministerium für Wirtschaft, Energie und Industriestrategie (*Department for Business, Energy and Industrial Strategy - BEIS*) im Rahmen der finanziert. Es ist ein internes Arbeitspapier und dient in erster Linie dem GIZ-internen Wissensmanagement. Die Ergebnisse, Interpretationen und Schlussfolgerungen der Fallbeispiele in diesem Bericht repräsentieren die Meinung der dort angegebenen Autoren und spiegeln nicht zwangsläufig die Position der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH wider.

Koordination und Kommentierung:

Andreas Gruner, GIZ
Dr. Marian Rzepka, GIZ

Autoren:

Dr. Uli Jakob, SOLEM Consulting
Prof. Dr. Paul Kohlenbach, SOLEM Consulting

Foto Vorderseite:
© SOLEM Consulting

Gestaltung:
GIZ, SOLEM Consulting

Oktober 2017

Disclaimer

SOLEM Consulting weist darauf hin, dass die in dieser Studie enthaltenen Informationen allgemeine Aussagen enthalten können, die auf Erfahrung und Ergebnissen wissenschaftlicher Forschung basieren. Die LeserInnen werden darauf hingewiesen und müssen sich bewusst sein, dass diese Informationen unvollständig sein können und nicht zur Planung oder Auslegung technischer Anlagen verwendet werden können. Soweit gesetzlich zulässig, schliesst SOLEM Consulting (einschließlich seiner MitarbeiterInnen und BeraterInnen) jede Haftung für Konsequenzen an sämtliche Personen aus. Diese Haftung beinhaltet alle Verluste, Schäden, Kosten, Aufwendungen und sonstige Entschädigungen, welche direkt oder indirekt aus der Benutzung dieser Publikation (ganz oder teilweise) und jeglicher darin enthaltener Informationen entstehen.

Sämtliche Preis- und Kostenangaben in dieser Studie sind in EURO (€) angegeben. Verwendete Preis- und Kostenangaben in Quellen dieser Studie wurden zu folgendem Kurs von mexikanischen Pesos in Euro umgerechnet: **1 MXN = 1 Peso = 0,048 €**. Alle angegebenen Kosten sind Netto-Kosten ohne Umsatzsteuer.

KURZZUSAMMENFASSUNG

Anhand der vorliegenden Studie werden die aktuellen und zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten von solarer Kühlung sowohl allgemein weltweit als auch speziell am Beispiel des sozialen Wohnungsbaus in Mexiko untersucht. Die Wirtschaftlichkeit verschiedener Systeme zum solaren Kühlen wird anhand von Beispielanlagen (weltweite Auswahl) diskutiert. Bezogen auf Mexiko werden verschiedene Technologiealternativen solarer Kühlung in verschiedenen Gebäuden an verschiedenen Standorten simuliert und auf ihre Wirtschaftlichkeit hin überprüft. Daraus werden Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Die Technologie „solare Kühlung“ hat sich im Verhältnis zu konventionellen Klimatisierungstechnologien bisher nicht in nennenswerten Stückzahlen am Markt etablieren können. Dies gilt sowohl für solarthermische als auch photovoltaische Kühlungssysteme.

Solarthermische Kühleysteme werden im Wohnungsbau aufgrund der höheren Kosten und Komplexität eher eine untergeordnete Rolle spielen, außer sie können als große Anlagen (> 1 MW_r, Kälteleistung) für Wohnsiedlungen projektiert werden, wo auch gleichzeitig ein Wärmebedarf für Warmwasser bzw. ggf. Heizung besteht. Sollte es politisch verstärkt gewollt sein, dass Kältemaschinen kein Global Warming Potential (GWP) und Ozone Depletion Potential (ODP) haben (siehe EU F-Gas Verordnung Nr. 517/2014 über fluoridierte Treibhausgase) oder erneuerbare Energien zum Einsatz kommen, können AB- oder ADSorptionskältemaschinen mit ihren natürlichen Kältemitteln einen wichtigen Beitrag zum weltweit steigenden Klimatisierungsbedarf leisten.

Photovoltaische Kühleysteme werden zunehmend attraktiver: Mit weiter sinkenden PV-Modulpreisen wird die Kombination aus PV-Anlage und existierenden oder neu installierten Split-Geräten für Wohngebäude mit kleiner und mittlerer Kältebelastung bis 100 kW_r technisch wie wirtschaftlich immer interessanter werden. Unter der Annahme der Autoren, dass 10 % der im Jahr 2016 weltweit installierten PV-Leistung für solarelektrische Kühleysteme verwendet würden, besteht ein globales Anwendungspotential für 12 Millionen photovoltaische Kühleysteme (Split-Gerät mit je 5 kW_r) je Jahr. Dies entspricht ca. 6 Millionen Haushalten, legt man zwei Klimageräte je Haushalt zugrunde.

Für Mexiko lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die Nutzung solarer Kühlung in mexikanischen Sozialwohnungen und –siedlungen (Wohnanlagen) aus den Ergebnissen der Studie ziehen:

Unter den derzeitigen Rahmenbedingungen lohnt sich keine der solaren Optionen für Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhäuser. Für Mehrfamilienhäuser werden in Monterrey und Cancún mit der photovoltaischen Variante zwar Amortisationszeiten von knapp unter 20 Jahren erzielt. Es ist allerdings fragwürdig, ob dies den Einsatz der kostenintensiveren (und somit mit höherem finanziellen Risiko behafteten) solaren Variante für einen Betreiber/Investor rechtfertigt. Bei der Wohnanlage bringt der Einsatz der photovoltaisch betriebenen solaren Kühlung einen deutlichen wirtschaftlichen Vorteil, wobei der Unterschied zwischen einer zentral mit Kaltwasser versorgten Anlage und einer zentral mit Strom versorgten Anlage bzgl. der Amortisationszeiten unerheblich ist.

Unter zukünftigen Rahmenbedingungen (mit höheren Stromtarifen) ist der Einsatz einer photovoltaisch betriebenen Anlage zur solaren Kühlung im Einfamilien- und Reihenhaus nur am Standort Cancún wirtschaftlich. Im Mehrfamilienhaus lohnt sich die photovoltaische Variante an allen Standorten. Bei der Wohnanlage bringt der Einsatz der photovoltaisch betriebenen solaren Kühlung einen überzeugenden wirtschaftlichen Vorteil, wobei der Unterschied zwischen einer zentral mit Kaltwasser versorgten Anlage und einer zentral mit Strom versorgten Anlage bezüglich der Amortisationszeiten auch hier unerheblich ist. Die solarthermisch betriebene solare Kühlung hat im Vergleich mit der photovoltaisch betriebenen Variante in allen Fällen und an allen Standorten eine höhere Amortisationszeit sowie höhere Kältegestehungskosten.

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGEN UND EINHEITEN	13
1 EINLEITUNG, ZIELSETZUNG UND AUFBAU DER STUDIE	15
1.1 Zielsetzung	15
1.2 Aufbau	16
2 GRUNDLAGEN DER SOLAREN KÜHLUNG	17
2.1 Einleitung	17
2.2 Übersicht Technologiesysteme für Wohngebäude weltweit	17
2.3 Erläuterung der untersuchten Gesamtsysteme	19
2.3.1 Solarthermische Systeme mit AB- oder Adsorptionskälteanlage	20
2.3.2 Photovoltaische Systeme mit Kompressionskälteanlage	21
2.4 Hersteller von Gesamtsystemen	22
2.4.1 Solarthermische Systeme mit AB- oder Adsorptionskälteanlage	24
2.4.2 Photovoltaische Systeme mit Kompressionskälteanlage	27
2.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Gesamtsysteme	29
2.5.1 Solarthermische Systeme mit AB- oder Adsorptionskälteanlage	29
2.5.2 Photovoltaische Systeme mit Kompressionskälteanlage	36
3 ANWENDUNGSGEBIETE UND ENTWICKLUNGSTENDENZEN DER SOLAREN KÜHLUNG	39
3.1 Bisherige Entwicklung	39
3.2 Aktueller Stand	39
3.3 Zukunftsprognosen und Ausblick	42
4 SOLARE KÜHLUNG FÜR WOHNGEBÄUDE ALLGEMEIN	46
4.1 Einleitung	46
4.1.1 Wartung	47
4.1.2 Sicherheit	47
4.1.3 Finanzierung	48
4.2 Beispiele aus verschiedenen Ländern	51
4.3 Fazit	58
5 SOLARE KÜHLUNG FÜR SOZIALEN WOHNUNGSBAU IN MEXIKO	60

5.1 Zielstellung	60
5.2 Methodik	60
5.3 Annahmen	62
5.3.1 Gebäude und Klimazonen	62
5.3.2 Technische und wirtschaftliche Annahmen	64
5.4 Berechnung für verschiedene Wohngebäudetypologien	68
5.4.1 Einfamilienhaus	70
5.4.2 Reihenhaushaus	71
5.4.3 Mehrfamilienhaus	72
5.4.4 Wohnanlage	73
5.5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	78
5.5.1 Einfamilienhaus	78
5.5.2 Reihenhaushaus	82
5.5.3 Mehrfamilienhaus	86
5.5.4 Wohnanlage	90
5.5.5 Zusammenfassung	97
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	100
6.1 Wohngebäude weltweit allgemein	100
6.2 Sozialer Wohnungsbau in Mexiko	101
6.3 Handlungsempfehlungen	103
6.3.1 Technische Handlungsempfehlungen	103
6.3.2 Politische Handlungsempfehlungen	106
7 LITERATURVERZEICHNIS	108
8 ANHANG	111
8.1 Anbieterübersicht	111
8.1.1 Anbieter solarthermisch betriebener Gesamtsysteme zum solaren Kühlen	111
8.1.2 Anbieter von AB- und ADSorptionskälteanlagen zum solaren Kühlen	112
8.1.3 Anbieter photovoltaisch betriebener Gesamtsysteme zum solaren Kühlen	113
8.1.4 Anzahl Hersteller photovoltaischer Module nach Ländern	114
8.2 Allgemeine Kostenübersicht	115
8.2.1 Spezifische Kosten für solarthermische Kollektoren in Europa	115

8.2.2	Spezifische Kosten für AD-/Absorptionskältemaschinen	115
8.2.3	Kosten für Rückkühler	116
8.2.4	Spezifische Kosten für Warm- und Kaltwasserspeicher	116
8.2.5	Spezifische Kosten für Kompressionskältemaschinen	117
8.2.6	Spezifische Kosten für Photovoltaikmodule	117
8.3	Investitionskostenübersicht Mexiko	118
8.3.1	Einfamilienhaus - Investitionskosten	118
8.3.2	Reihenhaus - Investitionskosten	124
8.3.3	Mehrfamilienhaus - Investitionskosten	130
8.3.4	Wohnanlage mit Kaltwassernetz – Investitionskosten	136
8.3.5	Wohnanlage ohne Kaltwassernetz – Investitionskosten	144

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Übersicht kommerziell verfügbarer Technologiekombinationen zur solaren Kühlung. [1]	18
Abbildung 2: Übersicht der in dieser Studie untersuchten Technologiealternativen zur solaren Kühlung	19
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines solarthermischen Systems zur solaren Kühlung. [1]....	20
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines photovoltaischen Systems mit Kaltwassersatz. [1].....	21
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines photovoltaischen Systems mit Direktverdampfung. ...	22
Abbildung 6: Systemanbieter von Solar Cooling Kits weltweit (SOLEM Consulting)	23
Abbildung 7: Anzahl von Herstellern von AB- und Adsorptionskälteanlagen in ausgewählten Ländern	24
Abbildung 8: Prozentualer Anteil solarthermischer Kollektorhersteller pro Kontinent	25
Abbildung 9: Hersteller von solarthermischer Kollektoren weltweit (SOLEM Consulting).....	26
Abbildung 10: Hersteller monokristalliner PV-Modulen je Kontinent (Eigene Darstellung, Datenquelle: [38])	27
Abbildung 11: Hersteller von PV-Modulen weltweit (SOLEM Consulting).....	28
Abbildung 12: Hersteller polykristalliner PV-Modulen je Kontinent (Eigene Darstellung, Datenquelle: [38])	29
Abbildung 13: Preisentwicklung von verschiedenen Leistungsklassen von solaren Kühlungssystemen (SOLEM Consulting).....	30
Abbildung 14: Darstellung der Investitions- und spezifischen Kosten der vier Beispielprojekte [1]	30
Abbildung 15: Einfluss der Systemgröße – Kostenverteilung von solarthermischen Kühlsystemen von 8 – 1.035 kW _r , nominaler Kälteleistung [1]	31
Abbildung 16: Kostenverteilung inkl. Installation 2010 – 233 kW _r , solare Kühlung im Charlestown Square Shopping Centre – Newcastle, Australien [1]	32
Abbildung 17: Preisverlauf kristalliner Photovoltaikmodule ausgewählter Länder und Regionen (eigene Darstellung, Datenquelle: [42])	37
Abbildung 18: Marktentwicklung von solarthermischer Kühlung (SOLEM Consulting/TECSOL)	40
Abbildung 19: Dichte von Projekten mit solarthermischer Kühlung weltweit (SOLEM Consulting).....	41
Abbildung 20: Entwicklung der Anzahl der Installationen von Klimageräten weltweit (Eigene Darstellung, Datenquellen: [24, 25])	42
Abbildung 21: Entwicklung der Installationen von Klimageräten in Mexiko (Eigene Darstellung, Datenquellen: [24, 25])	43

Abbildung 22: Weltweiter Anteil von solarthermischer Kühlung bis 2050 (eigene Darstellung, Datenquelle: [29])	44
Abbildung 23: Marktpotential von solarthermischer Heizung und Kühlung bis 2050 (eigene Darstellung, Datenquelle: [29])	44
Abbildung 24: Installierte PV-Leistung 2015 nach Ländern (eigene Darstellung, Datenquelle: [8])	45
Abbildung 25: Durchschnittliche Wohnfläche aller Wohnungen im Bestand und Neubau in verschiedenen Ländern der Welt (eigene Darstellung, Datenquelle: [9])	46
Abbildung 26: Wichtigste ESCo-Systemkomponenten mit theoretischem Prozessablauf [18]	49
Abbildung 27: Einstöckiges Wohngebäude in Wiesloch (SOLEM Consulting)	51
Abbildung 28: Zweistöckiges Wohngebäude in Thening (SOLEM Consulting)	52
Abbildung 29: Zweistöckiges Wohngebäude in Mailand (SOLEM Consulting)	53
Abbildung 30: Wohngebäude in Spanien (SOLEM Consulting)	54
Abbildung 31: Dreistöckiges Einfamilienhaus in Aqaba (SOLEM Consulting)	54
Abbildung 32: Villa in Peking (SOLEM Consulting)	55
Abbildung 33: Zweifamilienhaus in Alzenau (SOLEM Consulting)	56
Abbildung 34: Zweistöckiges Wohngebäude in Nordrhein Westphalen (SOLEM Consulting)	57
Abbildung 35: Seniorenresidenz in Maclas (SOLEM Consulting)	58
Abbildung 36: Übersicht der in dieser Studie untersuchten Standorte und Klimazonen [2, p.47, modifiziert]	63
Abbildung 37: Übersicht des Anlagenaufbaus für photovoltaische (links) und solarthermische Kühlung (rechts) für die Gebäudetypologien Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhaus	68
Abbildung 38: Auszug aus Quartiersplanung San Marcos, Beispiel Siedlungsebene [3].	73
Abbildung 39: Schema einer zentralen Versorgung der Wohnanlage mit Kaltwassernetz	74
Abbildung 40: Schema einer zentralen Versorgung der Wohnanlage mit Photovoltaik-Anlage und Eigenverbrauch für Klimatisierung	76
Abbildung 41: Kältegestehungskosten (LCCE) für Einfamilienhaus	78
Abbildung 42: Primärenergie-Einsparpotential gegenüber Referenz-Szenario für Einfamilienhaus	79
Abbildung 43: Kältegestehungskosten (LCCE) für Reihenhaus	82
Abbildung 44: Primärenergie-Einsparpotential gegenüber Referenz-Szenario für Reihenhaus	83
Abbildung 45: Kältegestehungskosten (LCCE) für Mehrfamilienhaus	86
Abbildung 46: Primärenergie-Einsparpotential gegenüber Referenz-Szenario für Mehrfamilienhaus	87
Abbildung 47: Kältegestehungskosten (LCCE) für Wohnanlage mit Kaltwassernetz	90
Abbildung 48: Kältegestehungskosten (LCCE) für Wohnanlage ohne Kaltwassernetz	91
Abbildung 49: Primärenergie-Einsparpotential gegenüber Referenz-Szenario für Wohnanlage mit und ohne Kaltwassernetz	92

Abbildung 50: Amortisationszeit photovoltaischer Kühlung – Tarif „Base“	98
Abbildung 51: Amortisationszeit photovoltaischer Kühlung – Tarif „Excedente“	98
Abbildung 52: Amortisationszeit solarthermischer Kühlung – Tarif „Excedente“	99
Abbildung 53: Anzahl Hersteller monokristalliner PV-Modulen (eigene Darstellung, Datenquelle: [38])	114
Abbildung 54: Anzahl Hersteller polykristalliner PV-Modulen (eigene Darstellung, Datenquelle: [38])	114
Abbildung 55: Spezifische Kosten für Flach- und Vakuumröhrenkollektoren in Europa [20]	115
Abbildung 56: Spezifische Kosten für AD-/ ABSorptionskältemaschinen [20]	115
Abbildung 57: Kosten für verschiedene Arten von Rückkühlern [20]	116
Abbildung 58: Spezifische Kosten für Warm- und Kaltwasserspeicher [20]	116
Abbildung 59: Spezifische Kosten für Kompressionskältemaschinen [20].....	117

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Parameterübersicht der untersuchten Technologien zum solaren Kühlen	20
Tabelle 2: Komponenten und Investitionskosten [20]	32
Tabelle 3: Rechnerische Nutzungsdauer sowie Aufwand für Inspektion, Wartung und Instandsetzung und Bedienen von Komponenten für solarthermische Kühlsysteme (VDI 2067 Blatt1, Anhang A).....	35
Tabelle 4: Durchschnittliche Wartungskosten für KKM in unterschiedlichen Wartungsintervallen [37].....	37
Tabelle 5: Rechnerische Nutzungsdauer sowie Aufwand für Inspektion, Wartung und Instandsetzung und Bedienen von Komponenten für photovoltaische Kühlsysteme (VDI 2067 Blatt1, Anhang A).....	38
Tabelle 6: Vorgehensweise bei der Untersuchung der Wohngebäude in Mexiko (je Gebäudetyp/Wohnanlage):.....	61
Tabelle 7: Übersicht der untersuchten Gebäudetypologien.....	62
Tabelle 8: Annahmen für installierte Kälteleistung und Kühlbedarf je Jahr. [2, p.183 ff.].....	64
Tabelle 9: Technische Lebensdauer der Anlagenkomponenten	67
Tabelle 10: Finanzmathematische Randbedingungen für Wirtschaftlichkeitsrechnungen [2].....	67
Tabelle 11: Energie- und Wasserkosten für Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	67
Tabelle 12: Übersicht der verwendeten Klimaanlage, Speichertechnologien, Backup-Systeme und Dachflächen	69
Tabelle 13. Technische Auslegung für: Wohnanlage mit Kaltwassernetz.....	75
Tabelle 14: Technische Auslegung für: Wohnanlage ohne Kaltwassernetz – nur Photovoltaik-Option	77
Tabelle 15: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Einfamilienhaus – Tarif „Base“	80
Tabelle 16: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Einfamilienhaus – Tarif „Excedente“ ..	81
Tabelle 17. Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Reihenhaus – Tarif „Base“	84
Tabelle 18: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Reihenhaus – Tarif „Excedente“	85
Tabelle 19: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Mehrfamilienhaus – Tarif „Base“	88
Tabelle 20: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Mehrfamilienhaus – Tarif „Excedente“	89
Tabelle 21: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Wohnanlage, zentral, mit Kaltwassernetz – Tarif „Base“	93
Tabelle 22: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Wohnanlage, zentral, mit Kaltwassernetz – Tarif „Excedente“	94

Tabelle 23: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Wohnanlage, zentral, ohne Kaltwassernetz – Tarif „Base“	95
Tabelle 24: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Wohnanlage, zentral, ohne Kaltwassernetz – Tarif „Excedente“	96
Tabelle 25: Übersicht der Kältegestehungskosten: Alle Gebäudetypologien und Standorte. (B: Tarif „Base“, E: Tarif „Excedente“)	97
Tabelle 26: Handlungsempfehlungen für alle Standorte, Tarife und Gebäudetypologien	102
Tabelle 27: Anbieter von solarthermisch betriebenen Gesamtsystemen (keine Garantie für Vollständigkeit)	111
Tabelle 28: Hersteller von Ab- und Adsorptionskältemaschinen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)	112
Tabelle 29: Anbieter von photovoltaisch betriebenen Gesamtsystemen (keine Garantie für Vollständigkeit)	113
Tabelle 30: PV-Modul Preise im April 2017 – durchschnittliche Angebotspreise für verzollte Ware auf dem europäischen Markt	117
Tabelle 31: Wirkungsgrade PV-Module (Monokristallin, Polykristallin, Dünnschicht und CIGS) im Vergleich	118

ABKÜRZUNGEN UND EINHEITEN

Symbole

GW	Gigawatt
kW	Kilowatt
W	Watt
kWh	Kilowattstunde
V	Volt
Hz	Hertz
°	Grad
°C	Grad Celsius
K	Kelvin
kg	Kilogramm
l	Liter
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
a	Jahr
h	Stunde
s	Sekunde

Indices

ch	chemisch
el	elektrisch
r	kälte
th	thermisch
p	peak

Abkürzungen

ABKM	Absorptionskältemaschine
AC	Wechselstrom
ADKM	Adsorptionskältemaschine
AHK	Außenhandelskammer
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Blockheizkraftwerk
BoP	Balance of Plant
COP	Coefficient of Performance
CO ₂	Kohlendioxid
CPC	Compound Parabolic Concentrator
DC	Gleichstrom
DEC	Desiccant Evaporative Cooling
DN	Nominal Diameter
EFH	Einfamilienhaus
ESCo	Energy Service Company
ESD	Energy Service Directive
EPC	Energy Performance Contracting
FK	Flachkollektor
GWP	Global Warming Potential
HiEff	Anlage mit effizienten Parabolrinnenkollektoren
IEA	International Energy Agency
IHK	Industrie- und Handelskammer
I ₀	Gesamte Investitionssumme Hauptkomponenten
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KKM	Kompressionskältemaschine
KW	Kaltwasser
LoEff	Anlage mit Standard-Vakuurröhrenkollektoren
LCCE	Levelized Cost of Cooling Energy (Kältegestehungskosten)
MFH	Mehrfamilienhaus
NA	Nicht anwendbar
ODP	Ozone Depletion Potential
PTC	Parabolic Trough Collector (Parabolrinnenkollektor)
PV	Photovoltaik

SHC	Solar Heating and Cooling
STAC	Solarthermisch angetriebene Kälteanlage
PVAC	Solarelektrisch angetriebene Kälteanlage
REF	Rein elektrisch angetriebene Kälteanlage
RH	Reihenhaus
ROI	Return on Investment
STAC	Solarthermisch angetriebene Kälteanlage
TPF	Third Party Financing
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VRF	Variable refrigerant flow
VRK	Vakuumröhrenkollektor
WA	Wohnanlage
WE	Wohneinheit

1 Einleitung, Zielsetzung und Aufbau der Studie

1.1 Einleitung

Der weltweite Energieverbrauch für Kühlung und Klimatisierung steigt rasant. Insbesondere der Absatz von elektrisch angetriebenen Splitgeräten (Kompressions-Kältemaschinen, sog. Split Units) mit einer Kühlung im Leistungsbereich bis 5 kW_r ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Die Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRAIA) hat für 2016 weltweit einen Absatz von 114 Millionen Einheiten für Neuinstallationen sowie Austausch von Altgeräten geschätzt [35]. Weltweit sind nach einer Studie der green-cooling-initiative im Jahr 2016 rund 833 Millionen Einheiten in Gebäuden im Einsatz, bis 2050 sollen es 3,71 Milliarden Einheiten sein [25]. Konventionelle Split-Geräte haben einen hohen Energieverbrauch und verwenden nicht-umweltfreundliche Kältemittel (F-Gase). Die Kältemittel, die derzeit in Splitgeräten verwendet werden, haben zwar kein Ozonabbaupotenzial (ODP) mehr, aber sie haben ein Global Warming Potential (GWP) durch Kältemittelleckagen in der Größenordnung von 5-15 % der Füllmenge pro Jahr.

Im Gegensatz dazu verwenden solar angetriebene AB- oder Adsorptionskältemaschinen als Kältemittel Wasser bzw. Ammoniak mit keiner Umweltbelastung bzgl. ODP und GWP und haben nur sehr geringen Strombedarf. Der elektrische Coefficient of Performance (COP) aktueller Sorptions-Kältemaschinen ist größer 10, d.h. für 1 kWh_r Kälte werden nur 0,1 kWh_{el} Strom benötigt, bei Kompressionskälte liegt der Strombedarf im Mittel bei 0,33 bis 0,5 kWh_{el}. Die Betriebskosten von Sorptions-Kältemaschinen sind somit hinsichtlich Stromkosten geringer und sie haben je nach Energiemix für die Stromproduktion im betrachteten Land deutlich weniger äquivalente CO₂-Emissionen als Kompressions-Kältemaschinen. Gleiches gilt für solar-elektrisch angetriebene Klimaanlage.

Solare Kühlung ist für Länder interessant, in denen die folgenden klimatischen und wirtschaftlichen Bedingungen vorliegen [1]:

- Solare Globalstrahlung auf die Horizontale > 1.600 kWh/(m²*a)
- niedriger jährlicher Bewölkungsgrad < 50 %
- hoher jährlicher Wärme- und Kältebedarf im betrachteten Gebäude
- hohe Strom- und Gaspreise am Standort
- Gleichzeitigkeit von solarer Einstrahlung und Gebäudelast (Wärme und Kälte)

Damit lässt sich aus einer globalen Analyse eine Reihenfolge der Länder ermitteln, in denen solare Kühlung unter Berücksichtigung der obigen Kriterien besonders geeignet scheint [1]. In dieser Reihenfolge liegt Chile auf Platz 1, gefolgt von Brasilien, Australien und Japan. Mexiko folgt auf Platz 5, zeigt also deutliches Potential für solare Kühlung.

Ein Vorteil der solaren Kühlung liegt in der Deckungsgleichheit von solarem Einstrahlungsangebot und dem Kühlbedarf im Gebäude. Dies ist insbesondere in Mexiko der Fall.

1.2 Zielsetzung

Mexiko wird voraussichtlich bis zum Jahr 2050 eine Bevölkerung von schätzungsweise 150 Millionen Menschen haben (Stand 2016 ca. 123 Millionen.). Derzeit werden aufgrund des Bevölkerungswachstums und gleichzeitiger zunehmender Urbanisierung ca. eine halbe Million neue

Sozialwohnungen pro Jahr in städtischem oder stadtnahem Umfeld gebaut. Der Energieverbrauch dieser neugebauten Wohnungen soll im Rahmen einer nachhaltigen Stadtentwicklung im Vergleich zum bestehenden Gebäudestandard reduziert werden, um die Klimaschutzziele Mexikos auch im Wohnungssektor erreichen zu können.

In der vorliegenden Studie werden die Anwendungsmöglichkeiten von solarer Kühlung sowohl allgemein weltweit als auch speziell am Beispiel des sozialen Wohnungsbaus in Mexiko untersucht.

In der vorliegenden Studie werden nun verschiedene aktuelle und zukünftige Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Wirtschaftlichkeit verschiedener Systeme zum solaren Kühlen wird anhand von Beispielanlagen (weltweite Auswahl) diskutiert. Bezogen auf Mexiko werden verschiedene Technologiealternativen solarer Kühlung in verschiedenen Gebäuden an verschiedenen Standorten simuliert und auf ihre Wirtschaftlichkeit hin überprüft. Daraus werden Handlungsempfehlungen für die GIZ und ihre Arbeit abgeleitet.

Das Ziel der Studie besteht in der Darlegung der aktuellen Anwendung und zukünftigen Anwendungspotenziale sowie der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Technologien zur solaren Kühlung in Wohngebäuden weltweit im Allgemeinen und in Gebäuden des sozialen Wohnungsbaus in Mexiko im Konkreten anhand von Fallstudien.

1.3 Aufbau

Der Aufbau der Studie ist wie folgt:

Kapitel 1 erläutert Zielsetzung und Aufbau der Studie.

Kapitel 2 erläutert die Grundlagen der solaren Kühlung. Es wird ein Überblick über die kommerziell verfügbaren Technologien gegeben und die einzelnen Komponenten der verwendeten Systeme werden beschrieben. Es wird dabei unterschieden zwischen solarthermisch und photovoltaisch betriebenen Systemen zur solaren Kühlung. Des Weiteren werden Hersteller von Systemen zum solaren Kühlen aufgelistet, gestaffelt nach Gesamtsystemen (sogenannte „kits“) und Einzelkomponenten. Weiterhin werden Zahlen zur Wirtschaftlichkeit der untersuchten Systeme genannt.

Kapitel 3 zeigt die bisherige Entwicklung von solarer Kühlung auf sowie den aktuellen Stand und Zukunftsprognosen.

In Kapitel 4 wird die Nutzung von solarer Kühlung für Wohngebäude im Allgemeinen beschrieben. Es werden Beispiele aus verschiedenen Ländern detailliert hinsichtlich Kosten, Betreibermodelle und Wirtschaftlichkeit aufgezeigt.

Kapitel 5 untersucht die Anwendung von solarer Kühlung in Mexiko. Hier werden die Berechnungen für verschiedene Gebäudetypologien und die Ergebnisse mit Schlussfolgerungen angegeben.

Kapitel 6 fasst die Schlussfolgerungen zu solarer Kühlung im Allgemeinen sowie bezogen auf Mexiko zusammen und gibt auch Handlungsempfehlungen an.

Kapitel 7 beinhaltet das Literaturverzeichnis.

Kapitel 8 beinhaltet als Anhang alle zusätzlichen Informationen, Annahmen und Berechnungsgrundlagen.

2 Grundlagen der solaren Kühlung

2.1 Einleitung

Solare Kühlung ist keine neue Technologie. Sie wurde im Jahr 1878 das erste Mal bei der Weltausstellung in Paris der Öffentlichkeit präsentiert [31]. Die Technologie selbst erlebt seit circa zwei Dekaden eine Renaissance, verbunden mit Entwicklungsfortschritten der Technologie selbst (bessere Wirkungsgrade von Sorptions-Kältemaschinen sowie den Systemen, kleinere Kältemaschinen, Systemregelung, etc.), der weltweiten Abkehr von der Nutzung fossiler Energieträger, dem Klimawandel und Energieerzeugung aus regenerativen Energien. Die globale Steigerung von Energiekosten, insbesondere für elektrische Energie, fördert die Verbreitung von solarer Kühlung zusätzlich. Das Zentrum der Entwicklungen und die größten Anwendungsgebiete sind derzeit in Europa, die Autoren haben jedoch auch Nord- und Südamerika, Teile von Asien und Afrika sowie Australien als signifikante potenzielle Märkte identifiziert [1]. Solare Kühlung ist eine vielversprechende Alternative zur konventionellen Kompressionskälte, vor allem in Gegenden, in denen Strom aus konventionellen Energieträgern zu hohen Kosten generiert wird. Spitzenstrombedarf für Kühlung/Klimatisierung während der Sommermonate kann dazu führen, dass Stromnetze mit maximaler Kapazität arbeiten oder schlimmstenfalls versagen. Die Anwendung von solarer Kühlung kann somit hohe elektrische Lasten zu Spitzenzeiten aus dem Netz nehmen und die Reduktion von Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor unterstützen.

In der Theorie sind die Gestaltungsmöglichkeiten für ein solarbetriebenes Kühlsystem vielfältig. Sowohl Strom als auch Wärme können genutzt werden, um ein System zur solaren Kühlung zu betreiben. Im ersten Fall wird die Sonnenenergie mit Hilfe von Photovoltaik-Zellen in Strom umgewandelt. Diese Elektrizität kann Kompressions- oder thermoelektrische Kühlprozesse antreiben. Letztere werden in dieser Studie nicht weiter beschrieben, da ihre kommerzielle Anwendung auf wenige Kleinstanwendungen beschränkt ist (z.B. solarbetriebene Kühlboxen). Im zweiten Fall wird die Sonnenenergie zu Wärme umgewandelt. Dies kann mit einer Vielzahl von solarthermischen Kollektoren geschehen. Die Wärme kann dann unterschiedliche thermische Kühlprozesse antreiben. Abbildung 1 zeigt die kommerziell verfügbaren Kombinationen von Solarenergiequellen und Kälteprozessen inklusive Anwendungen.

In der Praxis ist die Anwendung von stationären Anlagen zum solaren Kühlen nicht beschränkt. Die folgenden Anwendungen sind typische Beispiele für den Einsatz solarer Kühlsysteme:

- Kühlen/Tiefkühlen von Lagerräumen: min. -30 °C
- Bereitstellung einer Wasser/Glykol-Lösung: min. -30 °C
- Bereitstellung von Kaltwasser: min. +5 °C
- Konditionieren von Luft (Entfeuchten und Kühlen): min. +16 °C

2.2 Übersicht Technologiesysteme für Wohngebäude weltweit

Die in Abbildung 1 dargestellten Technologiekombinationen können in wasserbasierte (geschlossene) und luftbasierte (offene) Systeme eingeteilt werden. Luftbasierte Systeme stellen kühle bzw. klimatisierte (konditionierte) Luft zur Verfügung, wasserbasierte Systeme stellen kaltes Wasser bzw. andere gekühlte Flüssigkeiten zur Verfügung. Bei der photovoltaischen Option hängt die Einteilung von der Art der Netzeinspeisung ab. Systeme mit Einspeisevergütung speisen die gesamte photovoltaisch erzeugte elektrische Energie ins Stromnetz ein und beziehen gleichzeitig Strom aus dem Netz zum Betrieb der Kühlanlage. Systeme mit Eigenverbrauch versorgen zunächst die

Kühlanlage mit photovoltaisch erzeugter elektrischer Energie und speisen nur noch einen evtl. Überschuss ins Stromnetz ein.

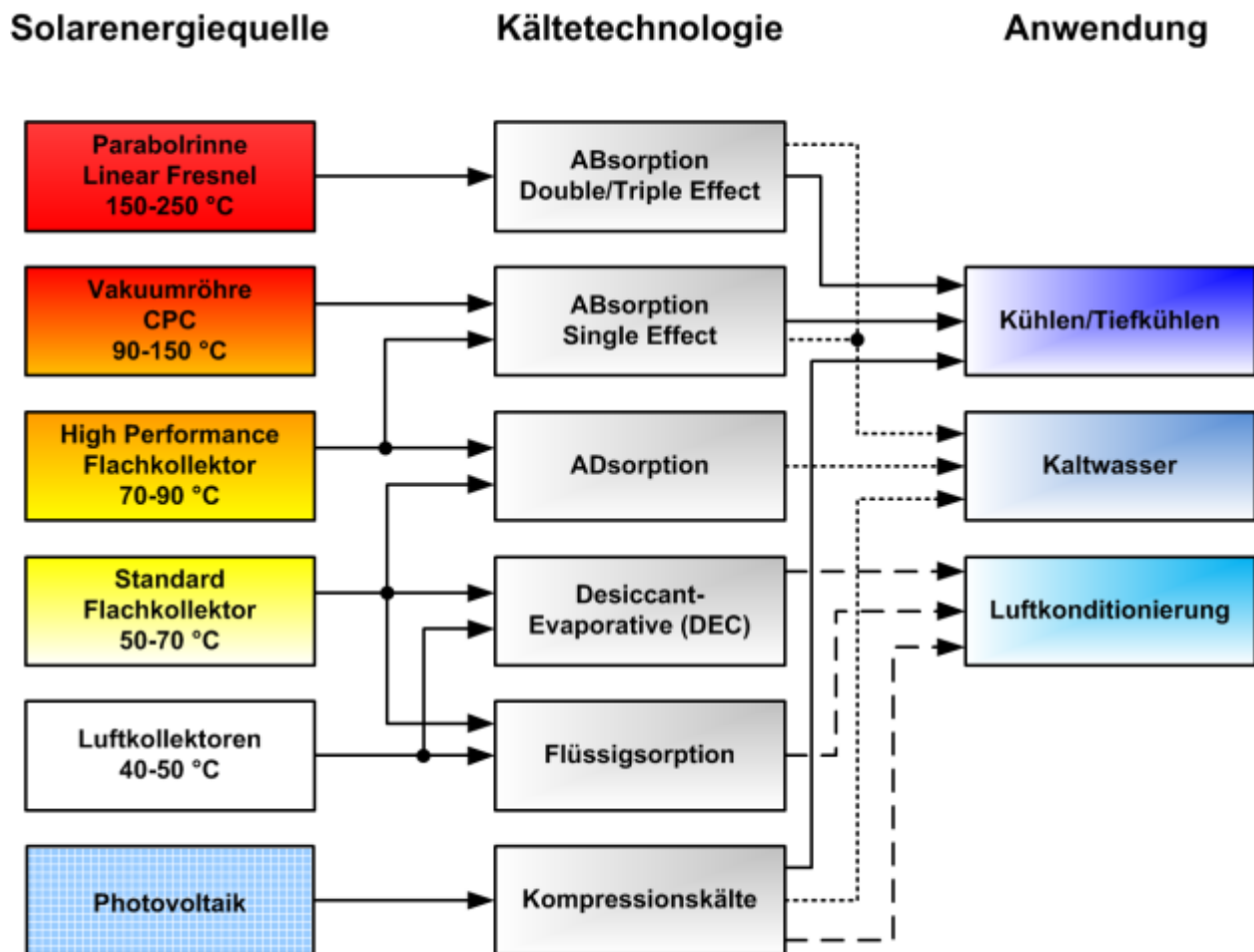


Abbildung 1: Übersicht kommerziell verfügbarer Technologiekombinationen zur solaren Kühlung. [1]

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie werden global fünf kommerziell verfügbare Technologiekombinationen zum Solaren Kühlen eingesetzt. Diese sind:

- Solarthermischer Betrieb von AB- und ADsorptionssystemen
- Solarthermischer Betrieb von Flüssigsorptionssystemen
- Solarthermischer Betrieb von Desiccant-Evaporative-Cooling (DEC) Systemen
- Photovoltaischer Betrieb von Kompressionskälteanlagen mit Einspeisevergütung
- Photovoltaischer Betrieb von Kompressionskälteanlagen mit Eigenverbrauch

In dieser Studie werden nur die Optionen A und E weiterführend untersucht. Der Einsatz von DEC- und Flüssigsorptionssystemen (Optionen B und C) ist auf wenige Anlagen weltweit beschränkt. Diese Anlagen sind zwar marktverfügbar, haben aber aufgrund hoher Kosten und Komplexität keine kommerzielle Bedeutung. Der Einsatz von solarem Kühlen mit Einspeisevergütung (Option D) ist ebenfalls eine Ausnahme. Einspeisevergütungen sind zwar in einigen Ländern vorhanden, die Mehrzahl der Länder unterstützt jedoch den Eigenverbrauch von erzeugtem PV-Strom (sogenanntes Net-Metering). Damit reduziert sich die in dieser Studie untersuchte Technologieauswahl auf die in Abbildung 2 dargestellten Optionen.

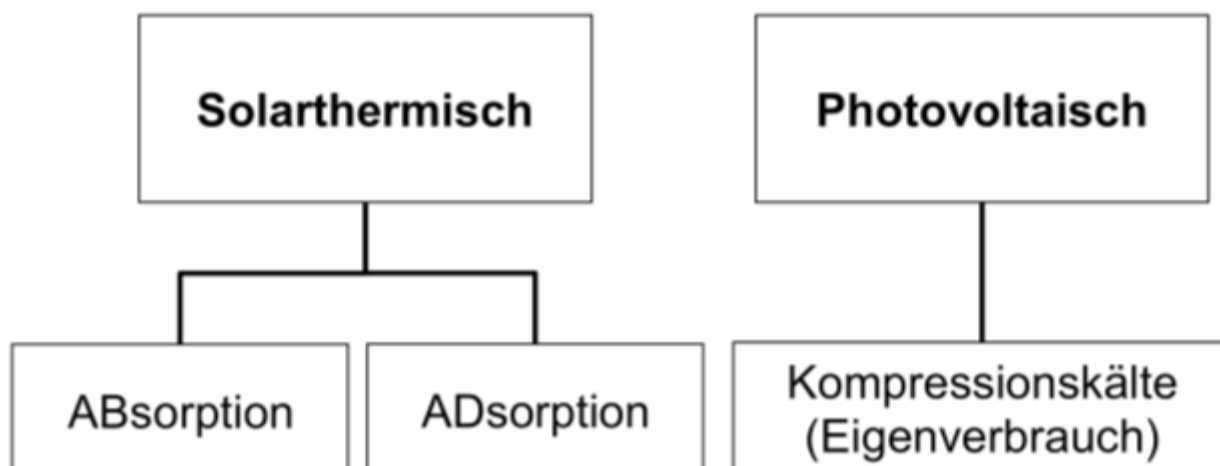


Abbildung 2: Übersicht der in dieser Studie untersuchten Technologiealternativen zur solaren Kühlung

Eine weitere Verwendung von solarthermischen Kühlsystemen ist auch die Bereitstellung von Wärme, z.B. für Warmwasser- oder Raumheizungsbereitstellung. Wird die Wärme der solarthermischen Kollektoren auch für diesen Zweck genutzt, kann sich die jährliche Systemeffizienz und schlussendlich die Wirtschaftlichkeit eines solarthermischen Kühlsystems deutlich verbessern.

2.3 Erläuterung der untersuchten Gesamtsysteme

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, einem Gebäude mittels eines flüssigen Mediums Wärme zu entziehen. Zum einen kann als Medium kaltes Wasser verwendet werden, welches die Luft im Gebäude über Wärmetauscher (sog. Luftkühler, engl. fan coils) abkühlt. Zum anderen kann ein Kältemittel verwendet werden, welches die Luft im Gebäude durch Verdampfung abkühlt, die sog. Direktverdampfung. Die Direktverdampfung benötigt Kältemittel, welche bei Temperaturen unterhalb der gewünschten Raumtemperatur, jedoch bei einem Druck über dem atmosphärischen Druck verdampfen. *Tabelle 1* zeigt eine Parameterübersicht der untersuchten Technologien zum solaren Kühlen inklusive der jeweils eingesetzten Kältemedien.

Solarenergiequelle	Solarthermische Kollektoren			Photovoltaikmodule	
Technologie	ABsorption			ADsorption	Kaldampfprozeß
	Single-effect ¹	Double-effect	Single-effect		
Kältemittel	Wasser	Wasser	Ammoniak	Wasser	Kältemittel nach F-Gas-Verordnung (R...)
Sorptionsmittel	Lithiumbromid	Lithiumbromid	Wasser	Silikagel	-
Kühlmedium	Wasser	Wasser	Wasser + Glykol	Wasser	je nach Anwendung

¹ Unter Single-effect-Anlagen versteht man Anlagen mit zwei Druckniveaus im Kältekreislauf, unter Double-effect-Anlagen solche mit drei Druckniveaus. (Anm. MR: Ist in Tabelle auch so geschrieben)

Temperatur Kühlmedium [°C]	6 – 20	6 – 20	-30 – +20	6 – 20	-30 – +20
Antriebsmedium/-temperatur [°C]	Heisswasser 60 – 100	Heisswasser/Öl 130 – 160	Heisswasser 75 – 150	Heisswasser 55 – 100	Strom
Verfügbare Kühlleistung (pro Anlage, in [kW,])	3 – 20.500	170 – 23.300	12 – 1.000	3 – 490	1 – 20.000

Tabelle 1: Parameterübersicht der untersuchten Technologien zum solaren Kühlen

2.3.1 Solarthermische Systeme mit AB- oder ADSorptionskälteanlage

Das Kältemedium in einem geschlossenen System mit AB- oder ADSorptionskälteanlage ist entweder Wasser (für Klimatisierungs- und Kühlanwendungen oberhalb Null Grad Celsius) oder Ammoniak (für Tiefkühlung unterhalb Null Grad Celsius). Im Falle der Verwendung von Wasser ist die Direktverdampfung im Gebäude ausgeschlossen, da dafür ein starker Unterdruck (Vakuum) benötigt würde. Dies ist konstruktiv nur sehr aufwendig und kostspielig umzusetzen. Daher werden hier sog. Kaltwassersätze eingesetzt, welche Kaltwasser zur Gebäudekühlung bereitstellen und mit Wärme aus der Solarenergiequelle angetrieben werden. Im Vergleich zu konventionelle Kompressionskälteanlagen verbrauchen diese signifikant weniger elektrische Energie. Der Kaltwassersatz liefert kaltes Wasser (oder ein Gemisch aus Wasser und Glykol) bei einer Temperatur zwischen 6 und 20°C. Kaltwassersätze können sowohl für zentrale Klimaanlage als auch für Kühlsysteme mit dezentraler Luftaufbereitung wie Gebläsekonvektoren und gekühlten Decken eingesetzt werden. Die beiden Haupttechnologien, die in solarbetriebenen geschlossenen Systemen eingesetzt werden, sind AB- und ADSorptionskälteanlagen. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau eines solarthermischen Systems mit AB- oder ADSorptionskälteanlage.

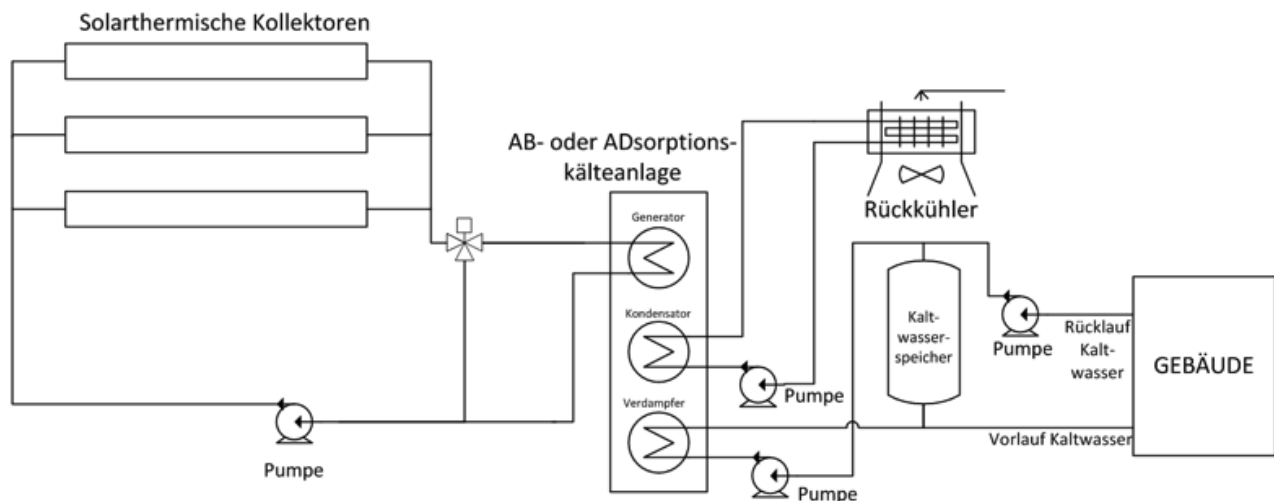


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines solarthermischen Systems zur solaren Kühlung. [1]

Die Wärme aus den solarthermischen Kollektoren wird mittels einer Pumpe in die Absorptionskälteanlage gebracht. Das Funktionsprinzip einer ABSorptionskälteanlage basiert auf unterschiedlichen Siedetemperaturen des Kältemediums bei verschiedenen Drücken. Ein flüssiges Sorptionsmedium transportiert das Kältemedium durch die Anlage. Im Verdampfer der Anlage bewirkt die externe Wärmezufuhr (also die dem Gebäude entzogene Wärme), dass das Kältemedium verdampft. Der Kältemitteldampf wird durch das Sorptionsmedium im Absorber absorbiert und

verdünnt es. Auf ein höheres Druckniveau gepumpt, verdampft der externe Wärmeeintrag (also die Wärmeenergie der Sonne) das Kältemedium im Generator wieder, während das konzentrierte Sorptionsmedium flüssig bleibt. Das Sorptionsmedium fließt dann zurück zum Absorber, während der Kältemitteldampf im Kondensator kondensiert, eine Expansionsvorrichtung zur Druckreduktion passiert und wieder im Verdampfer ankommt, womit der Zyklus wieder von vorn beginnt. Die dabei in Absorber und Kondensator anfallende Abwärme wird meist über einen Rückkühler an die Umgebung abgegeben. Der in Abbildung 3 abgebildete Kaltwasserspeicher ist optional, verlängert aber die Betriebszeit des Systems bei Nacht oder während Wolkenphasen.

2.3.2 Photovoltaische Systeme mit Kompressionskälteanlage

Im Gegensatz zu AB- und ADSorptionskälteanlagen kommen beim Einsatz von Kompressionskälteanlagen beide Optionen für die Kühlung eines Gebäudes in Frage: Wasser und Direktverdampfung eines R-Kältemittels. Im Falle der Verwendung von Kaltwasser im Gebäude werden ebenfalls Kaltwassersätze eingesetzt, allerdings nun solche mit rein elektrischem Antrieb. Wärme wird hier nicht zusätzlich benötigt. Bei der Direktverdampfung wird flüssiges Kältemittel in das Gebäude gepumpt und Kältemitteldampf aus dem Gebäude abgesaugt. Diese Technik wird in Kleinanlagen für z.B. einen Raum oder ein kleines Gebäude mit genau einer Verdampfereinheit umgesetzt. Man spricht in diesem Fall von sog. Split- oder Minisplit-Einheiten. Für größere Gebäude werden mehrere einzelne Verdampfereinheiten eingesetzt. Diese Anlagen werden als VRF-Anlagen (engl. variable refrigerant flow) bezeichnet. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen beide Optionen, Kaltwassersatz und Direktverdampfung in VRF-Anlage im Schema. Elektrische Energie aus den PV-Modulen wird zum Antrieb des Kaltwassersatzes bzw. der VRF-Anlage verwendet. Erzeugen die PV-Module mehr Energie als momentan zum Betrieb des Kaltwassersatzes bzw. der VRF-Anlage benötigt, so wird der Überschuss ins Stromnetz eingespeist. Umgekehrt wird Strom aus dem Netz bezogen, wenn die PV-Anlage zu wenig Energie zur Kälteerzeugung bereitstellt. Die dem Gebäude entzogene Wärme wird meist über einen Rückkühler an die Umgebung abgegeben.

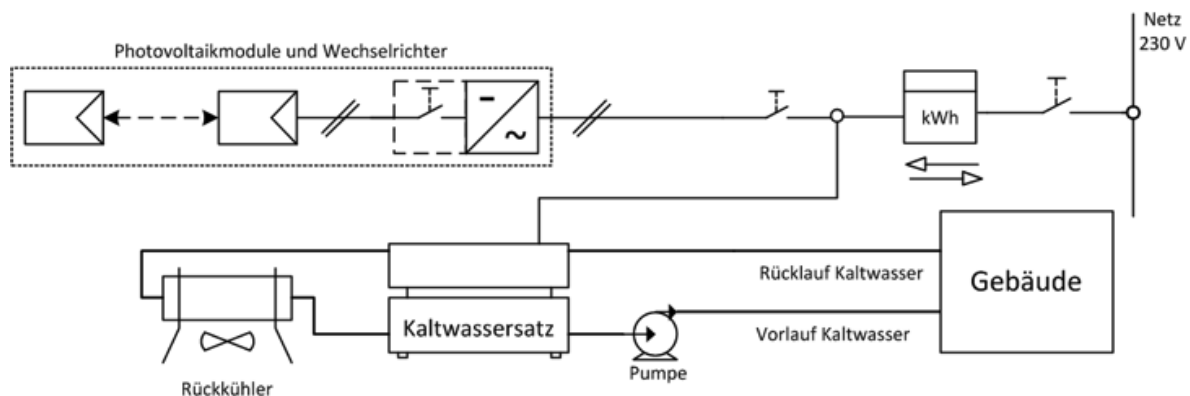


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines photovoltaischen Systems mit Kaltwassersatz. [1]

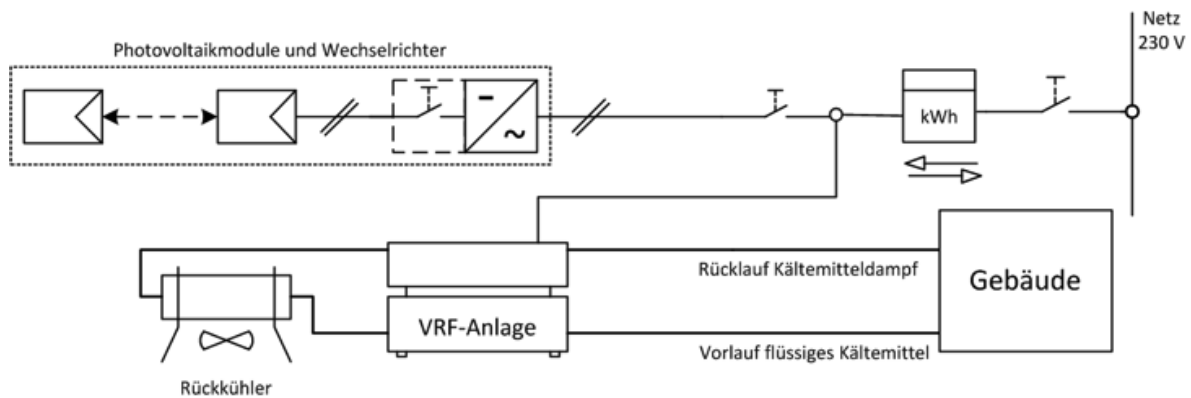


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines photovoltaischen Systems mit Direktverdampfung.

2.4 Hersteller von Gesamtsystemen

Ein solares Kühlungssystem setzt sich, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, aus diversen Komponenten zusammen. Dieses Kapitel zeigt die weltweite Verfügbarkeit und die Systemanbieter von solarer Kühlung und deren Systemkomponenten auf. Abbildung 6 zeigt die Länder, in denen sich Systemanbieter von Gesamtsystemen (sogenannte Cooling Kits) befinden. Zu erkennen ist eine hohe Dichte von Systemanbietern im europäischen und asiatischen Raum (grau schraffierte Länder). Führende Nationen sind Deutschland, China und Japan. Auf dem amerikanischen Kontinent sind lediglich die USA in diesem Marktsektor als Hersteller vertreten.



Abbildung 6: Systemanbieter von Solar Cooling Kits weltweit (SOLEM Consulting)

2.4.1 Solarthermische Systeme mit AB- oder Adsorptionskälteanlage

Eine detaillierte Übersicht über aktuell am Markt verfügbare Gesamtsysteme (Cooling Kits) von solarthermischen Systeme sind im Anhang 8.1.1 in Tabelle 27 zu finden. Darin werden die Systemanbieter/Hersteller nach Land, Produktname, nominaler Kälteleistung der Systeme, Technologie und verwendetes Sorbent unterteilt. Die letzte Spalte enthält Informationen über geeignete Anwendungsgebiete der jeweiligen Produkte in Bezug auf die in dieser Studie betrachteten Gebäudetypologien. Neben den standardisierten Cooling Kits werden solarthermische Kühlsysteme oftmals individuell zusammengestellt. Die nötigen Komponenten müssen separat geordert und vor Ort zusammengebaut werden. In diesem Abschnitt wird daher auch auf die Verfügbarkeit von Herstellern von thermisch betriebenen Kältemaschinen eingegangen. Abbildung 7 zeigt eine Auswahl an Herstellern von AB- und Adsorptionkälteanlagen weltweit. Gemeinsam mit Österreich ist Deutschland in Europa einer der größten Hersteller von AB- und Adsorptionskältemaschinen. Im asiatischen Raum sind es China und Japan, die darin führend sind. Nur zwei Firmen sind auf dem amerikanischen Kontinent in den USA als Hersteller von thermisch betriebenen Kältemaschinen tätig. Tabelle 28 im Anhang 8.1.2 gibt einen Überblick über die Hersteller von AB- und Adsorptionskältemaschinen und enthält zusätzlich Preisangaben für die Kältemaschinen. Des Weiteren sind Angaben zum Hersteller, Land, nominale Kälteleistung der Kältemaschinen, Technologie und verwendetes Sorbent sowie die geeigneten Anwendungsgebiete in Bezug auf die in dieser Studie betrachteten Gebäudetypologien aufgelistet.

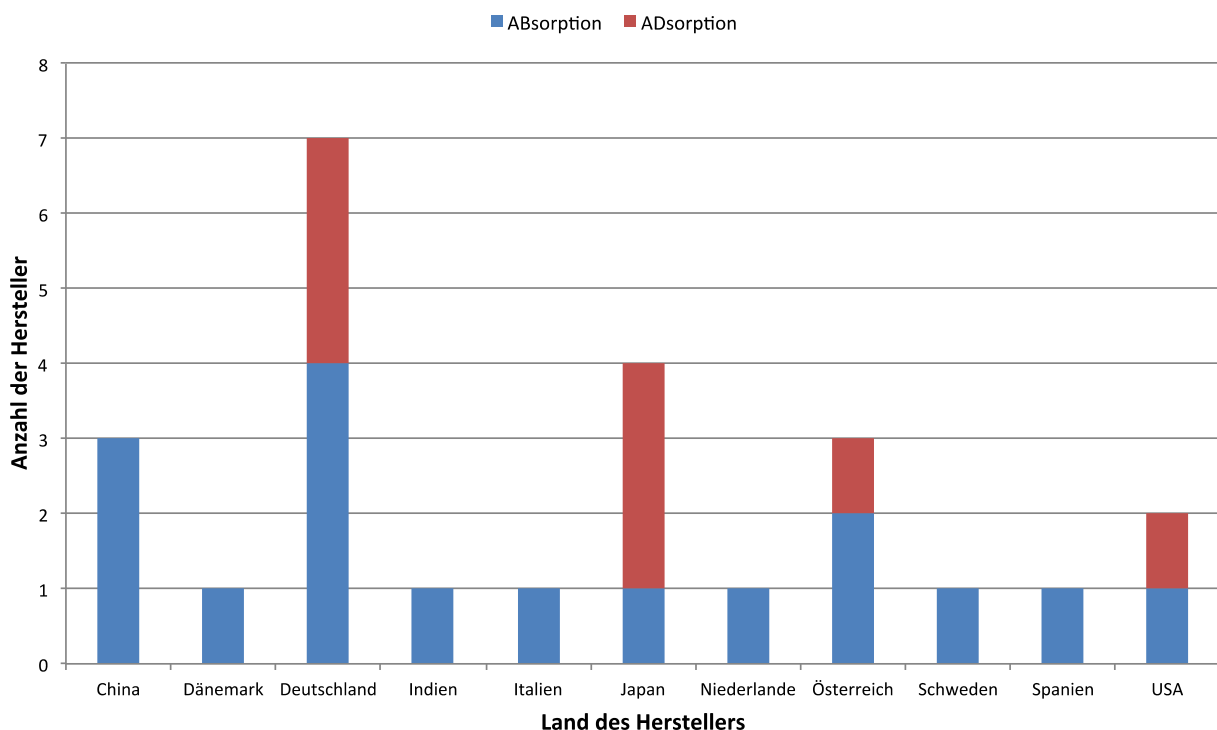


Abbildung 7: Anzahl von Herstellern von AB- und Adsorptionskälteanlagen in ausgewählten Ländern

Als weitere Hauptkomponente der solarthermischen Kühlsysteme ist die Herstellung und Anwendung von solarthermischen Kollektoren in den letzten Jahren zu einer Standardtechnologie gereift. Es gibt viele Hersteller am Markt, die auf allen Kontinenten der Welt vertreten sind. Abbildung 8 gibt einen Überblick über die prozentuale Verteilung der Hersteller von solarthermischen Kollektoren pro Kontinent. Die Hauptumsatzmärkte sind demnach in Europa, Asien und Amerika. Die Vielfalt an solarthermischen Kollektoren ermöglicht es, unterschiedliche Temperaturniveaus mit dieser Technologie zu erzeugen (zwischen 40-250 °C). Die häufigste Verwendung finden dabei Flach- und Vakuumröhrenkollektoren, da deren erzielten Temperaturen bis 70-90 °C für die Erwärmung von Brauchwasser ausreichend sind. Der Wirkungsgrad dieser Kollektoren variiert dabei je nach Technologie bzw. technischer Ausführung (low vs. high-tech Version) und damit die erforderliche Kollektorfläche. Sind Temperaturniveaus größer 100-120 °C notwendig, dann kann auf konzentrierende Kollektoren (Fresnel- oder Parabolrinnen-Kollektoren) zurückgegriffen werden. Auf allen Kontinenten gibt es Hersteller der verschiedenen Kollektorarten (siehe Abbildung 9).

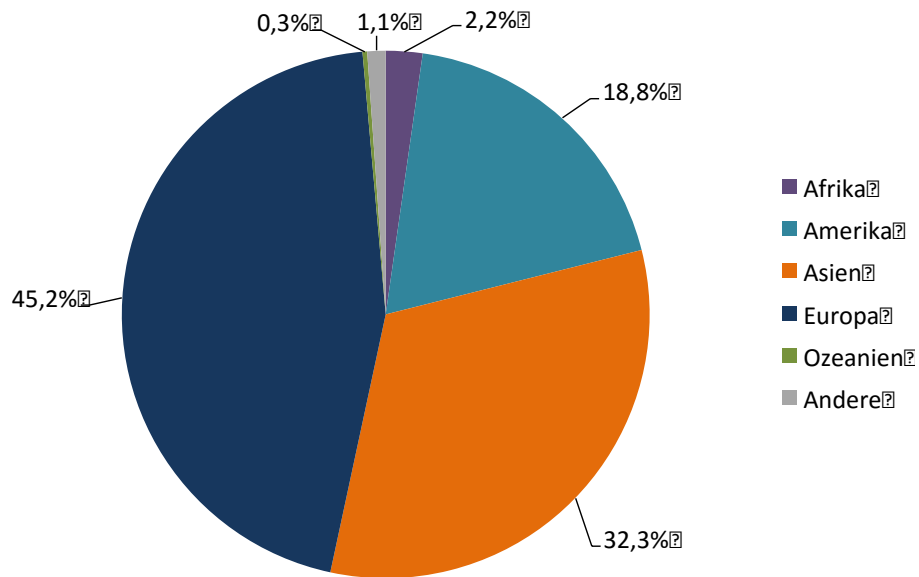


Abbildung 8: Prozentualer Anteil solarthermischer Kollektorhersteller pro Kontinent

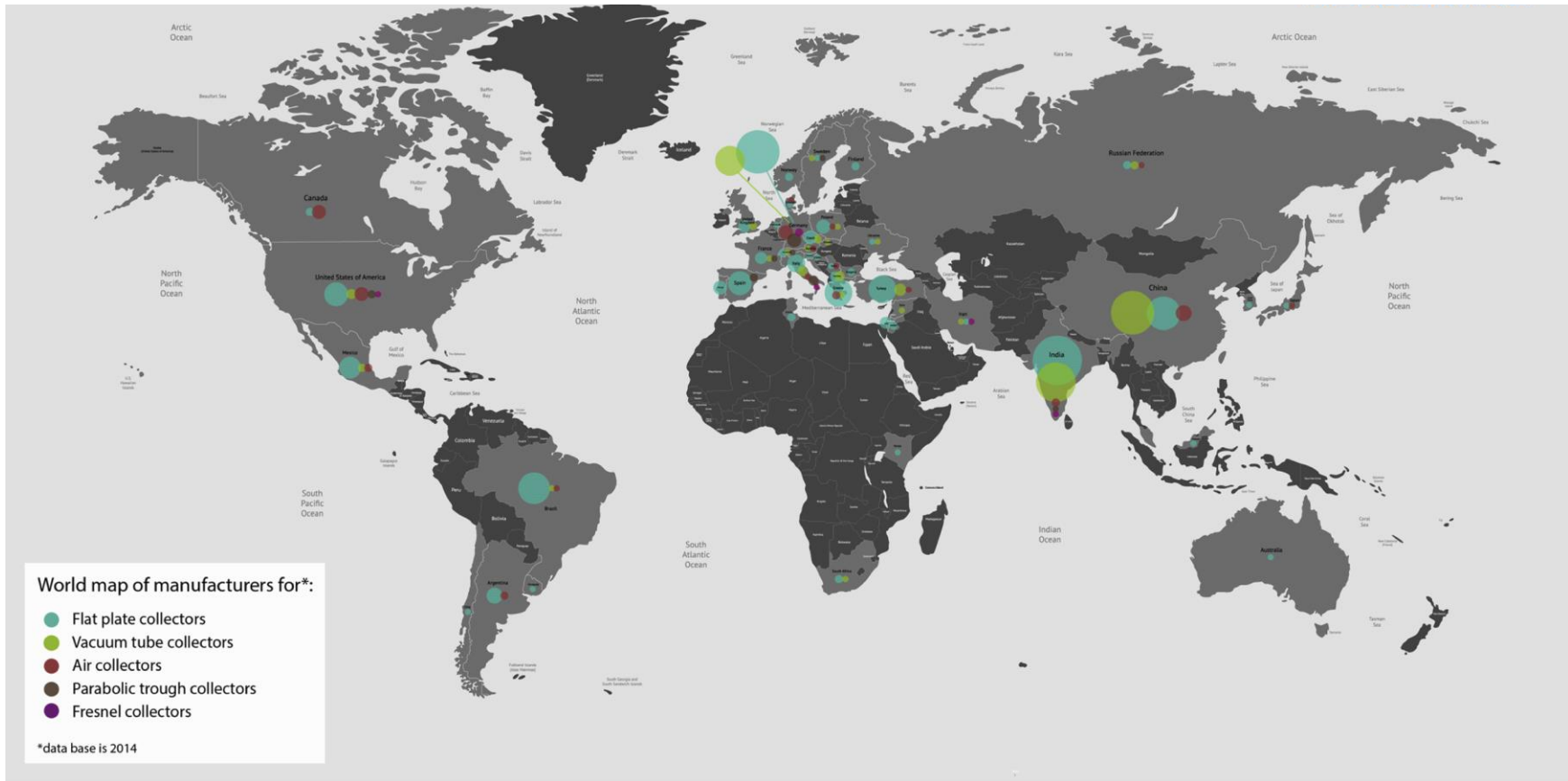


Abbildung 9: Hersteller von solarthermischer Kollektoren weltweit (SOLEM Consulting)

2.4.2 Photovoltaische Systeme mit Kompressionskälteanlage

Die Anzahl der Anbieter von photovoltaischen Kühlsystemen ist derzeit noch viel kleiner als von solarthermischen Kühlsystemen. Eine Übersicht der Anbieter von Gesamtsystemen (PV Cooling Kits) ist im Anhang 8.1.3 in Tabelle 29 zu finden. Darin werden die Systemanbieter/Hersteller nach Land, Produktstatus (R&D oder kommerziell), nominale Kälteleistung der Systeme, Back-up und geeignete Anwendungsgebiete in Bezug auf die in dieser Studie betrachteten Gebäudetypologien unterteilt.

Die Kompressionskältemaschinen für die photovoltaische Kühlsysteme werden hauptsächlich in Asien von Firmen wie Daikin, GREE, LG, Mitsubishi, Panasonic und Samsung hergestellt und sind ein Massenwareprodukt.

Gleiches gilt auch für die Herstellung von PV-Modulen, welche auch Massenware sind. Weltweit gibt es insgesamt ca. 2.500 Hersteller von PV-Modulen [38], die auf allen Kontinenten der Welt vertreten sind (Abbildung 11). Bei den Standard-PV-Modulen wird zwischen mono- und polykristallinen Modulen unterschieden. Der Anteil der Hersteller beträgt ca. 1.200 (monokristallin) zu 1.300 Herstellern (polykristallin). Bei beiden Modularten befinden sich ca. 70% der Hersteller in Asien. Generell nimmt China den größten Anteil an Herstellern mit 43 % bzw. 46 % ein (siehe Anhang 8.1.4), gefolgt von Indien (12 % bzw 15 %) und Deutschland (jeweils 6 %) (vgl. Abbildung 10 und Abbildung 12). Die Verkaufszahlen von PV-Modulen haben im Jahr 2016 einen neuen Rekord erreicht. Laut Experten der Marktforschungsgruppe IHS sind die Verkaufszahlen um 10 % im Vergleich zum Vorjahr gewachsen. Die Preise für PV-Module fallen weiter [17], da es ein Überangebot gibt sowie Preisdumping aus dem chinesischen Raum passiert.

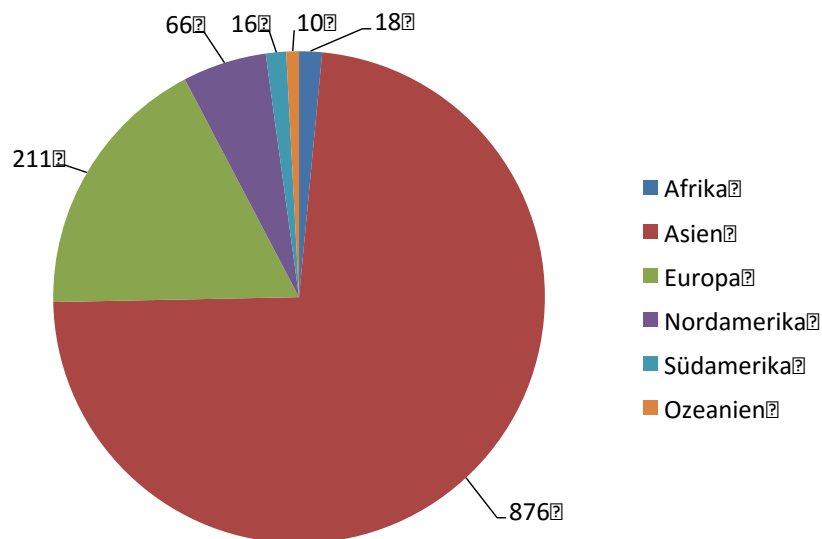


Abbildung 10: Hersteller monokristalliner PV-Modulen je Kontinent (Eigene Darstellung, Datenquelle: [38])

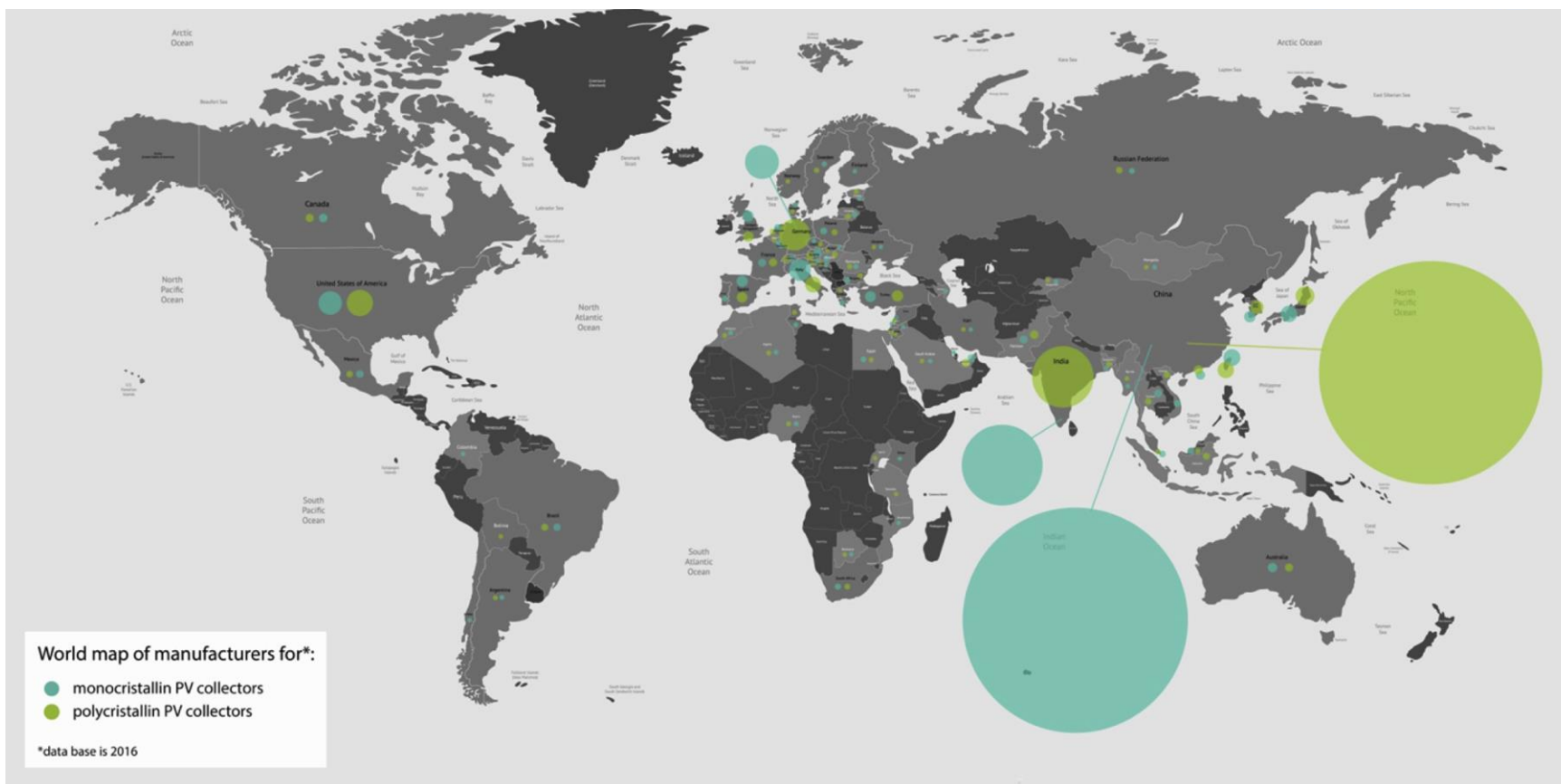


Abbildung 11: Hersteller von PV-Modulen weltweit (SOLEM Consulting)

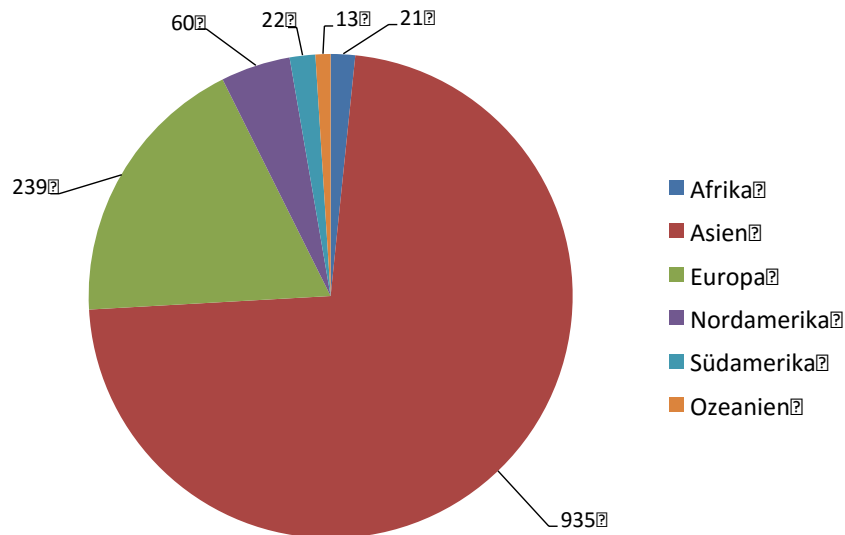


Abbildung 12: Hersteller polykristalliner PV-Modulen je Kontinent (Eigene Darstellung, Datenquelle: [38])

2.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Gesamtsysteme

Solarthermische Kühlsysteme werden bisher weitgehend individuell aus Einzelkomponenten zusammengesetzt. Nur wenige Hersteller bieten Komplettsysteme („Solar Cooling Kits“), bei denen die Komponenten auf die Systemgröße abgestimmt sind an. Jedoch sind die Anforderungen der Anwendungsfelder oft sehr unterschiedlich, was es wiederum erschwert, ein System einfach exakt adaptieren zu können. Die Investitionskosten für eine solarthermischen Kühlsysteme können daher je nach Anwendungsfall und Standort sehr stark variieren. Der jeweilige Projektstandort ist entscheidend für die Transportkosten, da zum einen die Transportwege und zum anderen die länderspezifischen Importzölle unterschiedlich ausfallen.

2.5.1 Solarthermische Systeme mit AB- oder ADSorptionskälteanlage

Investitionskosten Systeme

Die Investitionskosten für solarthermische Kühlsysteme lagen 2012 je nach Leistungsklasse zwischen 2.000 und 4.500 €/kW_r (Abbildung 13). Bei installierten Anlagen lagen die Preise für Systeme bis 35 kW_r Kälteleistung im Jahr 2007 bei ca. 6.000 €/kW_r. Im Jahr 2013 sind diese Kosten auf 4.500 €/kW_r gesunken. Betrachtet man die Kostenentwicklung von solarthermischen Kühlungssystemen, so hat sich eine Reduzierung der Investitionskosten von 50 % im Zeitraum von 2007 bis 2012 ergeben (seither nur geringe Veränderungen, da solarthermische Kühlsysteme noch ein Nischenprodukt sind). In Abbildung 13 ist die Kostenentwicklung für die Leistungsklassen klein (bis 10 kW_r), mittel (10 bis 50 kW_r) und groß (über 50 kW_r) dargestellt. Diese Kostenentwicklung hängt mit größer produzierten Stückzahlen von solarthermisch betriebenen Kältemaschinen zusammen. Die Preise für weitere Komponenten eines solarthermischen Kühlsystems sind zudem in den letzten Jahren auch weiter gesunken.

Kostenverlauf Solarthermischer Kühlung

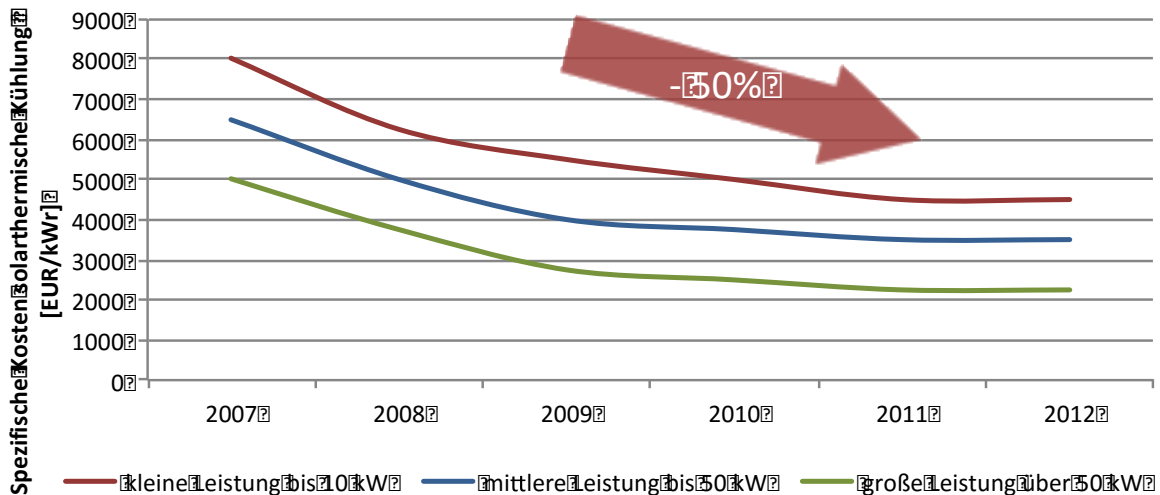


Abbildung 13: Preisentwicklung von verschiedenen Leistungsklassen von solaren Kühlungssystemen (SOLEM Consulting)

Anhand von vier Beispielprojekten ist in Abbildung 14 die Beziehung zwischen Investitionskosten und den spezifischen Kosten dargestellt. Mit der Vergrößerung der Anlage sinken gleichzeitig die spezifischen Kosten (€/kW_r). Zum Verständnis sind die folgenden die Eckdaten für die vier Beispielprojekte (BP) aufgelistet:

- BP1: 8 kW_r (Einfamilienhaus) 7,5 kW_r ADSorptionskältemaschine
- BP2: 35 kW_r (Kleines Bürogebäude) 35 kW_r ABSorptionskältemaschine
- BP3: 105 kW_r (Großes Bürogebäude) 105 kW_r ABSorptionskältemaschine
- BP4: 1.035 kW_r (Industrielle Prozeßkühlung) 3x 353 kW_r ADSorptionskältemaschine

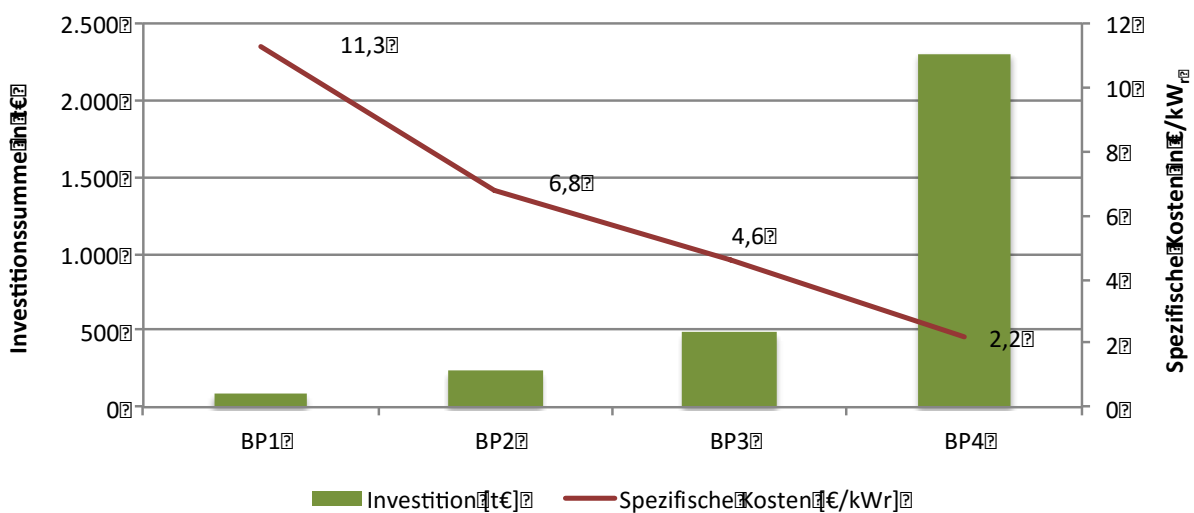


Abbildung 14: Darstellung der Investitions- und spezifischen Kosten der vier Beispielprojekte [1]

Abbildung 15 stellt den Einfluss der Systemgröße auf die Gesamtkosten dar. Die vier unterschiedlichen Systemgrößen (8 – 1.035 kW_r, nominaler Kälteleistung) zeigen, dass im Allgemeinen das Kollektorfeld den größten Anteil der Investitionskosten ausmacht. Allerdings wird ebenso ersichtlich, dass die Systemgröße die Verteilung der Kosten sehr stark beeinflusst.

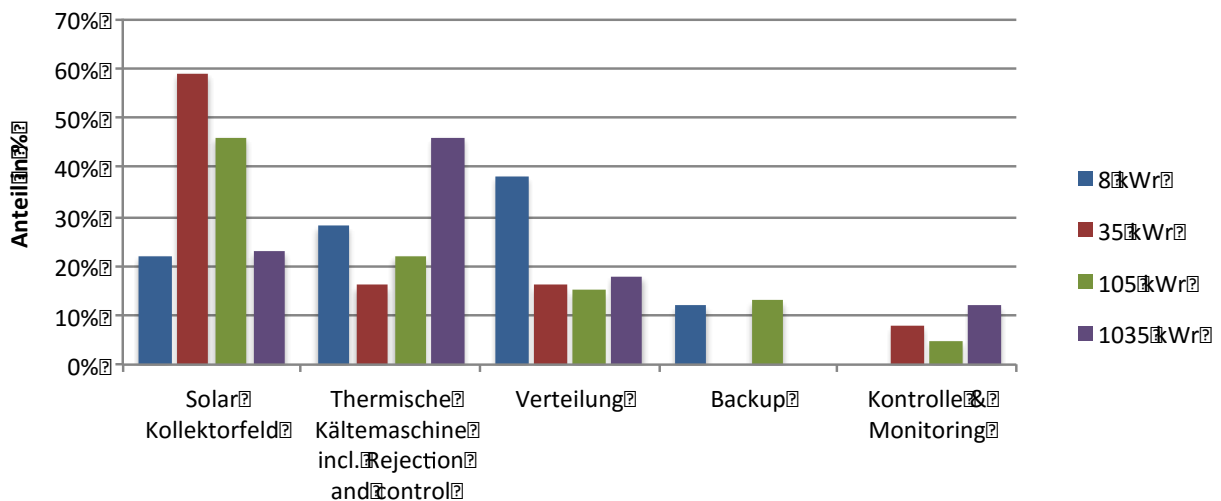


Abbildung 15: Einfluss der Systemgröße – Kostenverteilung von solarthermischen Kühlsystemen von 8 – 1.035 kW_r, nominaler Kälteleistung [1]

Die Kosten für die Regelung des 8 kW_r Projektes sind in Abbildung 15 nicht separat aufgeführt, da diese ein Teil des gesamten Cooling Kits darstellen. Die zwei Projekte (35 kW_r und 1.035 kW_r) weisen keine Kosten für eine zusätzliche Backup-Wärmequelle aus. Das 35 kW_r System beinhaltet schlicht kein Backup-System; das 1.035 kW_r System besitzt dafür eine zusätzliche Wärmeversorgung aus Prozessabwärme.

Abbildung 16 zeigt weiterhin beispielhaft die Verteilung der Kosten für ein im Jahr 2010 installiertes solarthermisches Kühlsystem in Newcastle, Australien (auf dem Dach einer Shopping Mall) mit einer nominalen Kälteleistung von 233 kW_r. Die Gesamtkosten inkl. Installation beliefen sich hierbei auf rund 730.000 € [1].

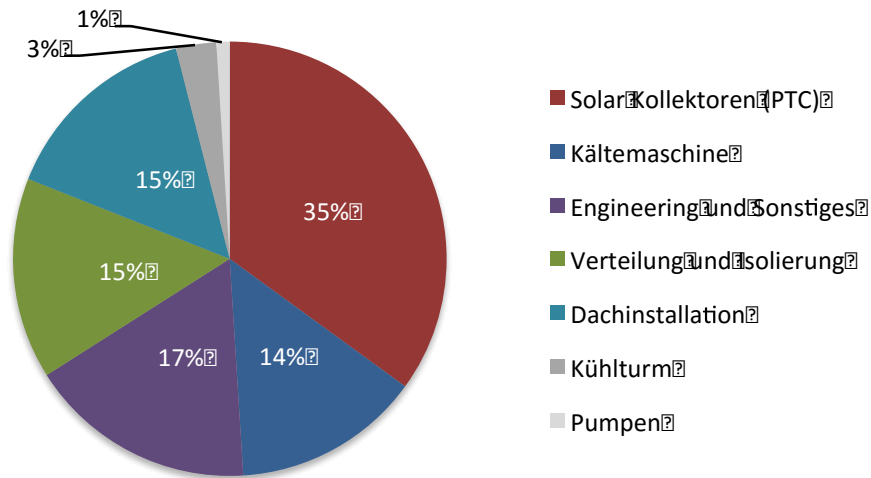


Abbildung 16: Kostenverteilung inkl. Installation 2010 – 233 kW_r, solare Kühlung im Charlestown Square Shopping Centre – Newcastle, Australien [1]

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der spezifischen Investitionskosten von Komponenten für solarthermische Kühlsysteme (vgl. zur Komponentenübersicht auch Kap. 3, Abbildung 3). Um einen Überblick der einzelnen Komponentenkosten zu bekommen, werden diese in den folgenden Unterkapiteln detailliert dargestellt.

Tabelle 2: Komponenten und Investitionskosten [20]

Komponenten	Technologie	Durchschnittliche spezifische Investitionskosten
Solarthermische Kollektoren	- Flachkollektoren - Vakuumröhrenkollektoren	380 €/m ² 760 €/m ²
Sorptionskältemaschinen	- AbKM (1st) - AbKM (2st) - AdKM	3.700 €/kW _r 4.300 €/kW _r 1.680 €/kW _r
Rückkühler	- Nasskühlturm - Kühlturm - hybrid - Kühlturm - trocken	21,2 €/kW _{th} 105,4 €/ kW _{th} 46,8 €/ kW _{th}
Speicher	- Wärmespeicher - Kältespeicher	2.500 €/m ³ 2.135 €/m ³
Back-up Kälteerzeugung	- Wassergeführte KKM - Luftgeführte KKM	2.934 / 6.787 €/kW _r 1.219 / 1.302 €/kW _r

Investitionskosten Solarthermische Kollektoren

Anhand von Erfahrungswerten wurden die spezifischen Kosten für Vakuumröhren- sowie Flachkollektoren ermittelt. In Anhang 8.2.1, Abbildung 55 ist der Einfluss der Systemgröße auf die Kosten für thermische Kollektoren dargestellt. Generell sind die Preise für Vakuumröhrenkollektoren (je Quadratmeter gesehen) höher, jedoch ändern sich diese deutlich stärker bei größeren Abnahmemengen über 100 m². Die gestrichelten Linien geben die Installationskosten des Kollektorsystems inklusive Balance of Plant Cost (Kleinteile- und Installationskosten) pro Quadratmeter an.

Übersicht Investitionskosten für solarthermische Kollektoren:

- Vakuumröhrenkollektoren: 300 – 400 €/m²
- Flachkollektoren: 200 – 300 €/m²

Investitionskosten Sorptionskältemaschinen

Die anteiligen Kosten der thermischen Kältemaschine hängen, wie in Abbildung 15 zu erkennen ist, sehr stark von der jeweiligen Systemgröße ab. In den aufgeführten Beispielprojekten haben diese einen Anteil von 15 – 45 % und sind demnach nicht zu vernachlässigen, weshalb die spezifischen Kosten für Sorptionskältemaschinen in Anhang 8.2.2, Abbildung 56 aufgeführt sind. Der Vergleich zwischen AD- und ABSorptionskältemaschine zeigt, dass generell die ABSorption ein breiteres Anwendungsgebiet umfasst und die ADSorptionskältemaschine bei sehr kleinen Anlagen günstiger ausfällt.

Übersicht Investitionskosten für sorptionsgebundene Kältemaschinen:

- ADSorptionskältemaschine (20 – 100 kW_r): 1.000 – 800 €/kW_r
- 1 stufige ABSorptionskältemaschine (10 – 100 kW_r): 1.300 – 465 €/kW_r
- 1 stufige ABSorptionskältemaschine (150 – 600 kW_r): 400 – 200 €/kW_r
- 2 stufige ABSorptionskältemaschine (200 – 600 kW_r): 400 – 250 €/kW_r

Investitionskosten Rückkühler

Generell gibt es drei Arten von Rückkühlern: Trocken-, Nass- und Hybrid-Kühler. Typischerweise sind die Investitionskosten für Trockenrückkühler höher als für Nasskühltürme. Der Hybridrückkühler ist eine Kombination aus luftgekühltem Trockenkühler, welcher aber auf der Außenseite der Wärmetauscher - Fläche besprüht wird (Verdunstungskühlungs-Effekt). Hybridsysteme sind von der Investitionsseite meist am teuersten, dafür ist der Wasserverbrauch deutlich geringer als bei Nasskühltürmen [21]. Die Kostenübersicht befindet sich in Anhang 8.2.3, Abbildung 57.

Übersicht Investitionskosten für Rückkühler:

- Nasskühler (Nasskühlturm) bis 1.000 kW_r: 25 €/kW_r
- Trockenkühler bis 1.000 kW_r: 50 €/kW_r
- Hybridkühlturm bis 1.000 kW_r: 107 €/kW_r

Investitionskosten Wasserspeicher

Die spezifischen Kosten für Wasserspeicher sind in Anhang 8.2.4, Abbildung 58 angegeben. Kaltwasserspeicher sind im Vergleich zu einem Warmwasserspeicher ca. 300 – 400 €/m³ günstiger. Die spezifischen Kosten fallen mit der Vergrößerung des Speichervolumens erheblich.

Übersicht Investitionskosten für Wasserspeicher:

– Kaltwasserspeicher < 5 m ³ :	1.300 – 2.200 €/m ³
– Kaltwasserspeicher > 5 m ³ :	700 – 1.300 €/m ³
– Warmwasserspeicher < 5 m ³ :	1.600 – 2.500 €/m ³
– Warmwasserspeicher > 5 m ³ :	900 – 1.600 €/m ³

Wartungskosten solarthermische Kühlsysteme

Der Aufwand für Wartung ist je nach Aufbau des solaren Kühlsystems unterschiedlich hoch. Da unterschiedliche Elemente kombiniert werden, ist die Komplexität der hydraulischen Anschlüsse höher als bei rein solarthermischen Anlagen zur Wärmeerzeugung. Die Wartung sollte regelmäßig durchgeführt werden, um Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb zu minimieren. Der Wartungsaufwand für die Kältemaschine ist in der Regel gering. AB- und ADSorptionskältemaschinen sind beispielsweise sehr robust, u.a. weil nur sehr wenige bewegte Teile eingesetzt werden. Allerdings erfordert die Instandhaltung dieser Maschinen meistens speziell geschulte Techniker, was wiederum Schwierigkeiten (Mangel an geeignetem Personal sowie teure Wartungskosten) für den Betreiber darstellen kann. Unsachgemäße Wartung kann zu technischen Problemen führen, was wiederum eine Verringerung der Kälteleistung mit sich führt. Aus der Praxis heraus können Wartungskosten von 800 – 1.000 € je System und Jahr angenommen werden [36]. Die Wartungskosten für kleine und große Sorptionskälteanlagen unterscheiden sich dabei nur geringfügig, da der Wartungsaufwand im Wesentlichen gleich ist.

Anhand der VDI-Norm 2067 kann der finanzielle Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Inspektion bezogen auf die Investitionskosten auch errechnet werden. Hierfür werden die Prozentwerte, die sich auf die jeweilige Investitionssumme beziehen, wie in

Tabelle 3 angegeben verwendet. Die Angaben sind Mittelwerte über die Nutzungsdauer der Anlagenkomponenten und entsprechen nicht den tatsächlich anfallenden Jahreskosten. Diese können je nach den vorhandenen Einflussgrößen z.B. Alter, Betriebsdauer und Servicelevels der Komponenten deutlich abweichen.

Tabelle 3: Rechnerische Nutzungsdauer sowie Aufwand für Inspektion, Wartung und Instandsetzung und Bedienen von Komponenten für solarthermische Kühlsysteme (VDI 2067 Blatt1, Anhang A)

Anlagenkomponente	Rechnerische Nutzungsdauer	Aufwand für Instandsetzung (f_{inst})	Aufwand für Wartung und Inspektion (f_{W+Insp})	Aufwand für Bedienung
Einheiten	Jahre	%	%	Stunden pro Jahr (h/a)
Flachkollektor	20	0,5	1	5
Vakuurröhrenkollektor	18	0,5	1	5
Vakuüm-Flachkollektor	15	0,5	1	5
Plattenwärmeübertrager	20	2	0	0
Pumpen	10	2	0	0
Regelung	15	1,5	1	0
Ausdehnungsgefäße	15	0,5	1	0
Absorptions-Kälteanlagen	18	1,5	1,5	0
Rückkühlwerke	20	2	1,5	0
Steuerungen	10	10	5	0,2
Regler	10	10	5	0,2

Wirtschaftlichkeit und Fazit zu solarthermischen Systemen

Die Wirtschaftlichkeit solarthermischer Systeme, insbesondere die Amortisation, ist stark vom Standort der Anlage abhängig. Standorte mit hoher solarer Einstrahlung, langen Kühlperioden, Kombination der Kollektoren des Kühlsystems zur Erwärmung von Heiz- und Brauchwasser oder die Preise von konventioneller Energieerzeugung sind Beispiele für Einflussfaktoren. Auf den gesamten Lebenszyklus eines Systems bezogen (rund 20 Jahre) ist bei Anwendungen mit jährlichen Kühllaststunden größer 2.000 Stunden eine Amortisation möglich.

Entsprechend den untersuchten Best-Practice-Projekten im International Energy Agency (IEA) Solar Heating and Cooling (SHC) Task 48 haben sich ROI's von 6-7 Jahren ergeben [19]. Andere Untersuchungen gehen von 5-15 Jahren bei großen Anlagen aus, bei Kleinanlagen im Wohngebäudebereich ergibt sich ein ROI von 10-20 Jahren [22, 23].

2.5.2 Photovoltaische Systeme mit Kompressionskälteanlage

Investitionskosten Systeme

Die angefragten Hersteller von PV-Gesamtsystemen haben leider keine Preise zu ihren Produkten zur Verfügung gestellt. Daher kann eine Systemkostenbetrachtung nur auf den Einzelpreisen der Komponenten durchgeführt werden. Ein solarelektrisches System besteht (wie schon in Abbildung 4 und Abbildung 5 gezeigt) aus den zwei Hauptkomponenten: PV-Module und Kompressionskältemaschine. Die Kosten für die genannten Geräte werden nun folgend aufgeführt.

Investitionskosten Kompressionskältemaschine

In Anhang 8.2.5, Abbildung 59, sind die spezifischen Kostenverläufe für luft- bzw. wassergekühlte Kompressionskältemaschinen (KKM) dargestellt. Für kleinere Leistungsbereiche bis ca. 70 kW_r sind die Kosten einer luftgekühlten KKM geringer. Ab 70 kW_r Kälteleistung aufwärts sind die Kosten für wassergekühlte KKM geringer.

Übersicht Investitionskosten für Kompressionskältemaschinen:

- Kompressionskältemaschine – luftgekühlt (10 – 70 kW_r): 620 – 345 €/kW_r
- Kompressionskältemaschine – luftgekühlt (70 – 250 kW_r): 345 – 240 €/kW_r
- Kompressionskältemaschine – wassergekühlt (10 – 70 kW_r): 920 – 355 €/kW_r
- Kompressionskältemaschine – wassergekühlt (70 – 250 kW_r): 355 – 180 €/kW_r

Investitionskosten PV-Module

Kristalline PV-Module wurden im April 2017 auf dem europäischen Spotmarkt durchschnittlich je nach Herkunftsland zwischen 0,39-0,53 €/W_p (Netto) gehandelt. Der Verlauf der durchschnittlichen Angebotspreise in Abbildung 17 zeigt einen fallenden Trend. Die Preise chinesischer und deutscher Hersteller sind nahezu identisch (aktuell bei 0,46 €/W_p). Die günstigsten Preise von aktuell 0,39 €/W_p sind nach wie vor den Herstellern aus Südostasien, Indien, Indonesien, Thailand und Taiwan zuzuschreiben gefolgt von chinesischen Herstellern mit 0,46 €/W_p. Japanische und koreanische Fabrikate sind nach wie vor die teuersten am Markt mit 0,53 €/W_p.

Die Preise in Abbildung 17 stellen die durchschnittlichen Angebotspreise auf dem europäischen Markt dar (chinesische Ware verzollt) und sind ohne Umsatzsteuer in Euro pro Watt-peak angegeben. In Deutschland muss für eine schlüsselfertige Solaranlage der Wert mit 2,5 – 3 multipliziert werden.

In Anhang 0, Tabelle 30 sind die Preise verschiedener Modulklassen dargestellt. Ein Kostenvergleich sowie Wirkungsgrade der einzelnen Modultypen sind in Anhang 0

Tabelle 31 aufgeführt.

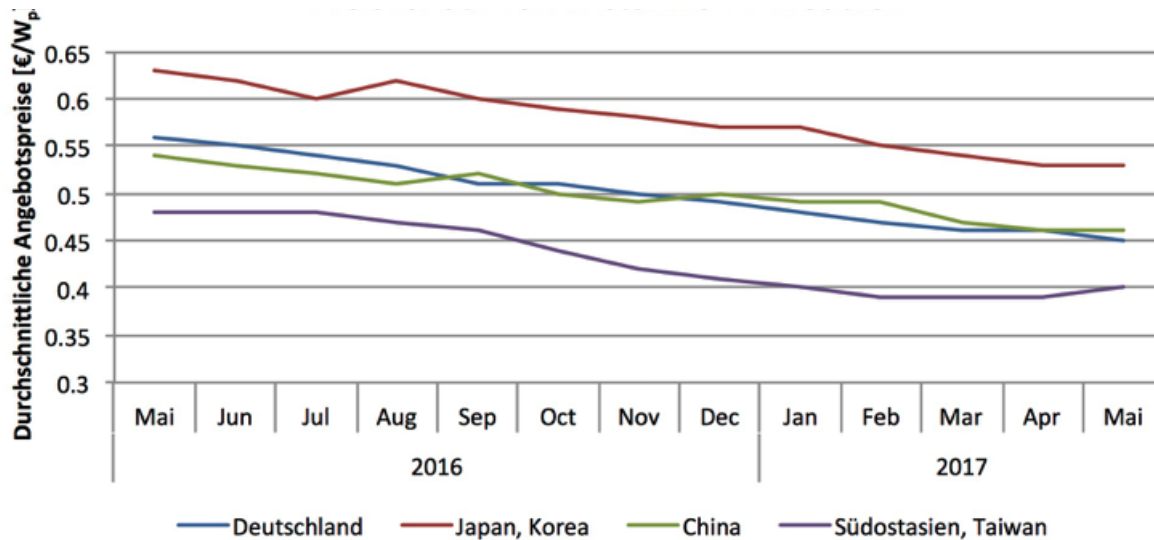


Abbildung 17: Preisverlauf kristalliner Photovoltaikmodule ausgewählter Länder und Regionen (eigene Darstellung, Datenquelle: [42])

Wartungskosten photovoltaischer Kühlsysteme

Eine regelmäßige jährliche Inspektion und eine Wartung im 5-Jahres-Turnus ist für eine KKM sehr empfehlenswert, um eine durchgehend hohe Kälteleistung (und somit hohe Effizienz) der Anlage garantieren zu können. In Tabelle 4 sind Durchschnittspreise von neun unterschiedlichen KKM (mit einer Kühlleistung von jeweils 2 MW_r) berechnet. Dabei beinhalten die Preise eine vorbeugende Wartung und den Austausch von Verschleißteilen [37].

Tabelle 4: Durchschnittliche Wartungskosten für KKM in unterschiedlichen Wartungsintervallen [37].

	Jährlich	5 Jahre	10 Jahre	15 Jahre	Gesamt
Gesamt	1.090 €	2.220 €	2.723 €	20.404 €	43.874 €
spezifisch	0,54 €/kW _r	1,11 €/kW _r	1,36 €/kW _r	10,20 €/kW _r	21,94 €/kW _r

Eine PV-Anlage ist in der Regel auf einen Betriebszeitraum von 20-25 Jahre ausgelegt. Wartungsverträge für Photovoltaikanlagen kosten je nach Anbieter zwischen 150 und 250 Euro (Einfamilienhaus) [6]. Bei Kleinanlagen werden auch Pauschalen von 220 Euro für eine zweijährige Wartung verlangt [7].

Anhand der VDI-Norm 2067 kann auch für photovoltaische Kühlsysteme der Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Inspektion errechnet werden. Hierfür werden die Prozentwerte, die sich auf die jeweilige Investitionssumme beziehen, wie in Tabelle 5 angegeben verwendet. Die Angaben sind Mittelwerte über die Nutzungsdauer der Anlagenkomponenten und entsprechen nicht den tatsächlich anfallenden

Jahreskosten. Diese können je nach den vorhandenen Einflussgrößen z.B. Alter, Betriebsdauer und Servicelevels der Komponenten deutlich abweichen. PV-Module sind in der VDI 2067 (aktuellste Version: Stand 2012) nicht berücksichtigt.

Tabelle 5: Rechnerische Nutzungsdauer sowie Aufwand für Inspektion, Wartung und Instandsetzung und Bedienen von Komponenten für photovoltaische Kühlsysteme (VDI 2067 Blatt1, Anhang A)

Anlagenkomponente	Rechnerische Nutzungsdauer	Aufwand für Instandsetzung (f_{Inst})	Aufwand für Wartung und Inspektion (f_{W+Insp})	Aufwand für Bedienung
Einheiten	Jahre	%	%	Stunden pro Jahr (h/a)
Pumpen	10	2	0	0
Regelung	15	1,5	1	0
Ausdehnungsgefäße	15	0,5	1	0
Kompressions-Kälteanlagen	15	2	1,5	1
Direktverdampfer Einzelgeräte	12	2	2	0
Rückkühlwerke	20	2	1,5	0
Steuerungen	10	10	5	0,2
Regler	10	10	5	0,2

Wirtschaftlichkeit und Fazit zu photovoltaischen Systemen

Die Wirtschaftlichkeit photovoltaischer Systeme, insbesondere die Amortisation, ist auch vom Standort der Anlage abhängig. Standorte mit hoher solarer Einstrahlung und langen Kühlperioden oder die Preise von konventioneller Energieerzeugung sind Beispiele für Einflussfaktoren. Auf den gesamten Lebenszyklus eines Systems bezogen (10-20 Jahre) ist in den meisten Fällen eine Amortisation möglich. So gehen entsprechende Untersuchungen von 5-15 Jahren bei großen Anlagen aus, bei Kleinanlagen im Wohngebäudebereich ergibt sich ein ROI von 10-20 Jahren [22, 23].

3 Anwendungsgebiete und Entwicklungstendenzen der solaren Kühlung

Dieses Kapitel zeigt die bisherige technologische Entwicklung der solaren Kühlung und den aktuellen Stand sowie Zukunftsprognosen der Technologie auf.

3.1 Bisherige Entwicklung

Das weltweit erste solarthermische Kühlsystem lief in Paris, Frankreich, während der Weltausstellung 1878 [31]. Dieses System zur Herstellung von Eis bestand aus einer Ammoniak/Wasser Absorptionskältemaschine und einem Parabolspiegel. Dieses System fand aber keine nennenswerte Verbreitung. Firmen wie die deutsche Dornier-Prinz Solartechnik [32] und Arkla Industries aus den USA [33] haben erst 100 Jahre später in den 1970er bis 1990er Jahren die ersten kommerziellen solarthermischen Kühlsysteme für die Klimatisierung von Gebäuden entwickelt. Diese Systeme kamen vielfach in Demoanlagen zum Einsatz. Fehlende Nachfrage hat jedoch nach kurzer Zeit wieder zur Einstellung der Produktion geführt. Die heutige Verbreitung von solarthermischen Kühlsystemen weltweit begann wieder mit dem Einstieg verschiedener europäischer Firmen (u.a. Conergy, Citrin Solar, SolarNext) Anfang der 2000er Jahre.

Solare Kühlsysteme sind in nahezu jedem Leistungsbereich verfügbar (1 kW_r bis mehrere MW_r) oder können durch die Kombination der Einzelkomponenten so konfiguriert werden, dass diese den geforderten Bedingungen entsprechen. Als Bedingungen gelten beispielsweise Behaglichkeitskriterien im Gebäude und Umwelteinflüsse (z.B. solare Einstrahlung), welche Einfluss auf die Leistung eines Systems haben. Eine weitere Verbreitung und zunehmende Umsetzung von Pilotprojekten kann die Ausbreitung von solarer Kühlung zukünftig beschleunigen.

3.2 Aktueller Stand

Die Marktentwicklung von solarthermischer Kühlung (Abbildung 18) zeigt seit 2004 einen Anstieg der Absatzzahlen dieser Systeme an. Dabei sind jährlich 150-200 neu installierte Systeme zu beobachten. Ein System (Definition entsprechend Kapitel 2.3) kann dabei sowohl für ein als auch für mehrere Wohneinheiten bzw. Gebäude eingesetzt werden. Ähnliche Daten zur Marktentwicklung von photovoltaischen Kühlsystemen liegen bisher nicht vor.

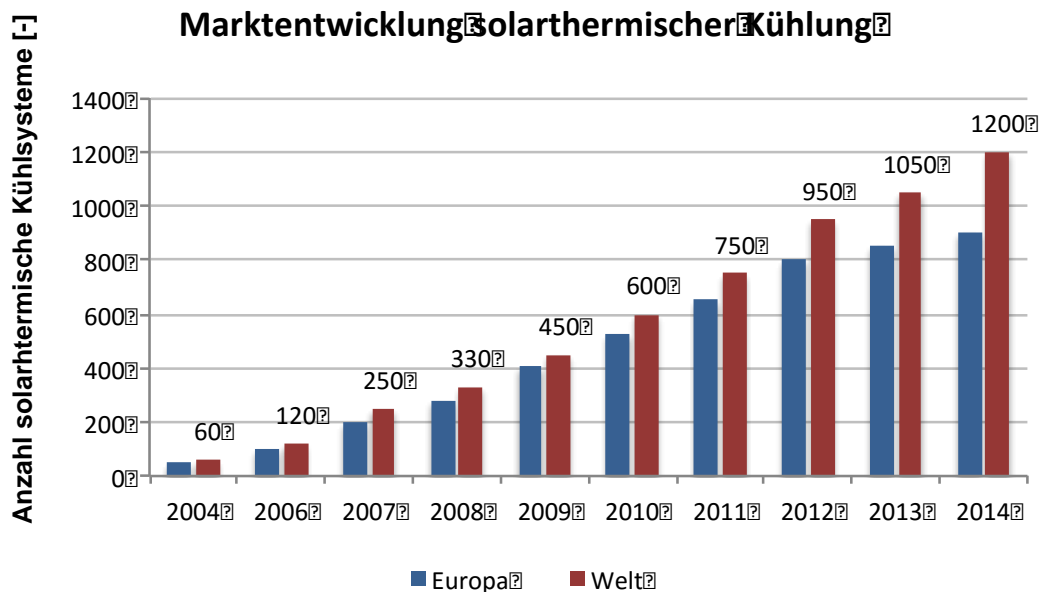


Abbildung 18: Marktentwicklung von solarthermischer Kühlung (SOLEM Consulting/TECSOL)

Abbildung 19 zeigt den derzeitigen Stand der weltweiten Dichte von Projekten mit solarthermischer Kühlung in Bürogebäuden, Hotels, Instituten, Schulen, Shopping Malls, Restaurants, Krankenhäusern, Produktionsgebäuden, Wohngebäuden und Altersheimen. Die Anzahl und Dichte von Projekten, bei denen solarthermische Kühlsysteme eingesetzt werden, ist unterschiedlich hoch (vgl. Abbildung 19). Eine besonders hohe Dichte ist in Europa, Teilen Asiens, Australien und Nordamerika zu erkennen. In Südamerika gibt es derzeit kaum Projekte. In Europa gibt es nach aktuellem Datenstand im Bereich der solarthermischen Kühlung eine Vielzahl an Anlagen in Spanien, Deutschland und Italien [27].

Darüber hinaus gibt es viele „virtuelle“ Anlagen mit photovoltaischer Kühlung in Australien, die nicht explizit als solche dokumentiert sind (getrennte/r Installation/Kauf von PV-Anlage und Split-Gerät/en, also nicht als System projektiert bzw. eingebaut). Diese Anlagen profitieren von den guten Finanzierungsmöglichkeiten von PV-Systemen in Australien sowie dem gleichzeitigen hohen Verbreitungsgrad von Split-Klimaanlagen.

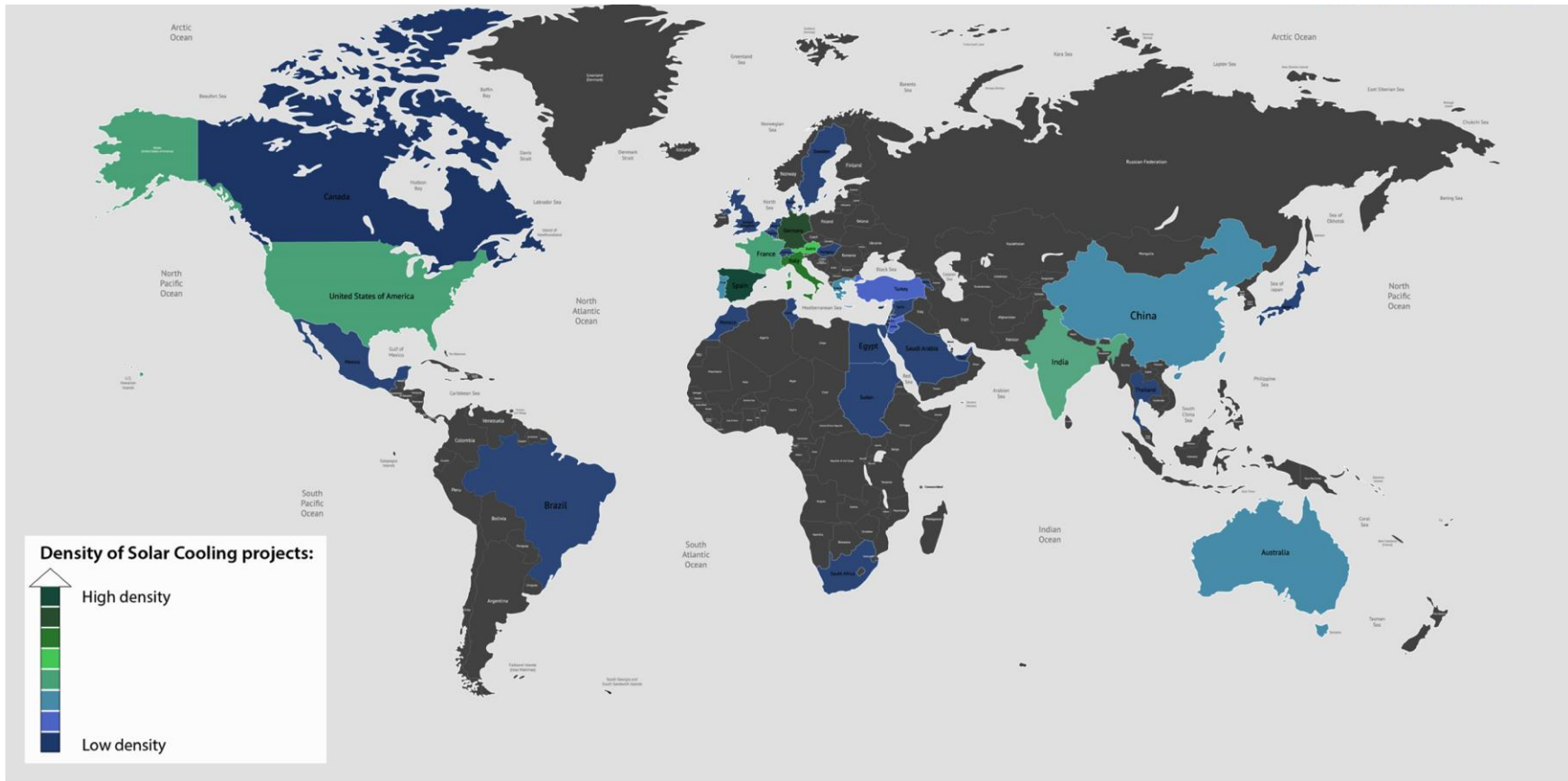


Abbildung 19: Dichte von Projekten mit solarthermischer Kühlung weltweit (SOLEM Consulting)

3.3 Zukunftsprognosen und Ausblick

Durch die Verbreitung des notwendigen Fachwissens zur Auslegung, Installation und zum Betrieb sowie durch weiteren Kostensenkungen der Komponenten bei gleichzeitig steigender weltweiter Nachfrage nach Klimatisierung wird die Verbreitung von solarthermischen und photovoltaischen Systemen weltweit weiter ansteigen. Es ist jedoch zu erwarten, dass der derzeit noch hohe Anteil von solarthermischen Systemen aufgrund der gegenüber photovoltaisch betriebenen Anlagen oft schlechteren Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit dieser Technologie die Nachfrage sich in den nächsten Jahren zu den photovoltaischen Kühlsystemen verschieben wird [28].

So prognostiziert die Studie der „green cooling initiative“ einen Anstieg der sich weltweit in Betrieb befindlichen Kühlgeräte zur Klimatisierung von Gebäuden um bis zu 445 % im Zeitraum von 2016 bis 2050 [24]. Zugleich wird prognostiziert, dass die Anzahl der verkauften Klimageräte im gleichen Zeitraum um 333 % ansteigen wird [25]. Dies zeigt eine positive Marktentwicklung, in der solare Kühlsysteme ihre Marktanteile bekommen werden. Bei einem angenommenen Marktanteil von ca. 1 % im Bereich solarer Kühlung entspräche dies im genannten Zeitraum ca. 1-2,6 Millionen verkauften Systemen pro Jahr. Abbildung 20 zeigt die prognostizierte Marktentwicklung weltweit.

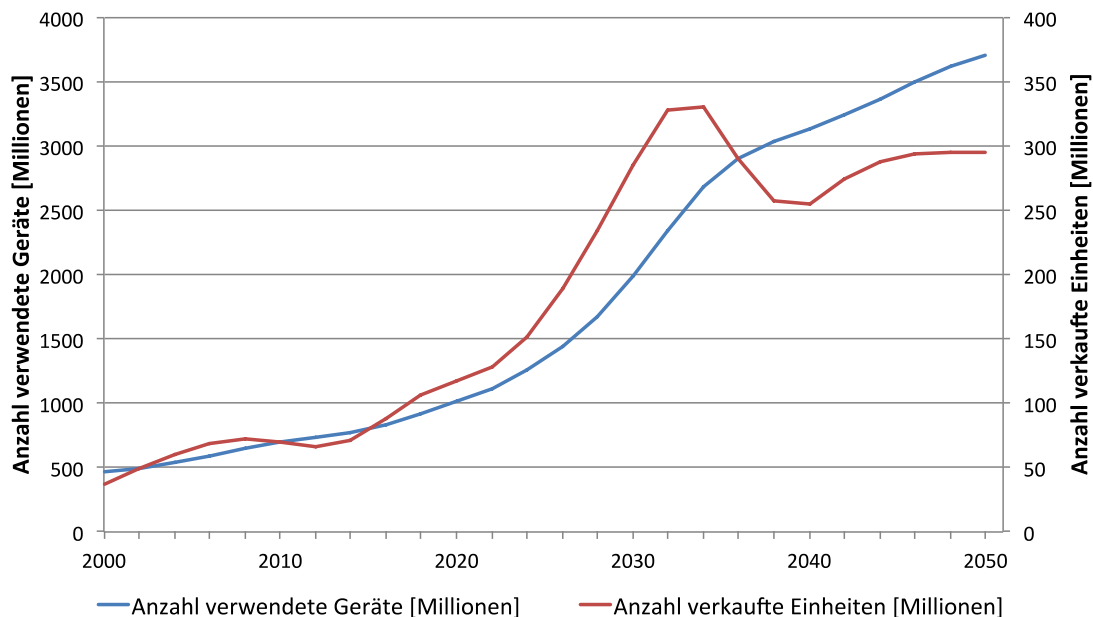


Abbildung 20: Entwicklung der Anzahl der Installationen von Klimageräten weltweit (Eigene Darstellung, Datenquellen: [24, 25])

Legt man den Fokus auf Mexiko, so ergeben sich folgende Daten: Die Anzahl der im Betrieb befindlichen Klimageräte wird Schätzungen zufolge bis zum Jahr 2050 um 271 % steigen (bezogen auf das Jahr 2016) [24]. Die Anzahl der neu verkauften Geräte wird im gleichen Zeitraum um 231 % steigen [25]. Unter der Annahme, dass die solaren Kühlsysteme ebenfalls einen Marktanteil von 1 % in Mexiko erreichen werden, ergeben sich so Verkaufszahlen von Neugeräten in den Jahren 2016 bis 2050 zwischen 10,600 und 20,950 pro Jahr. Abbildung 21 zeigt die prognostizierte Marktentwicklung im Bereich von Klimageräten in Mexiko.

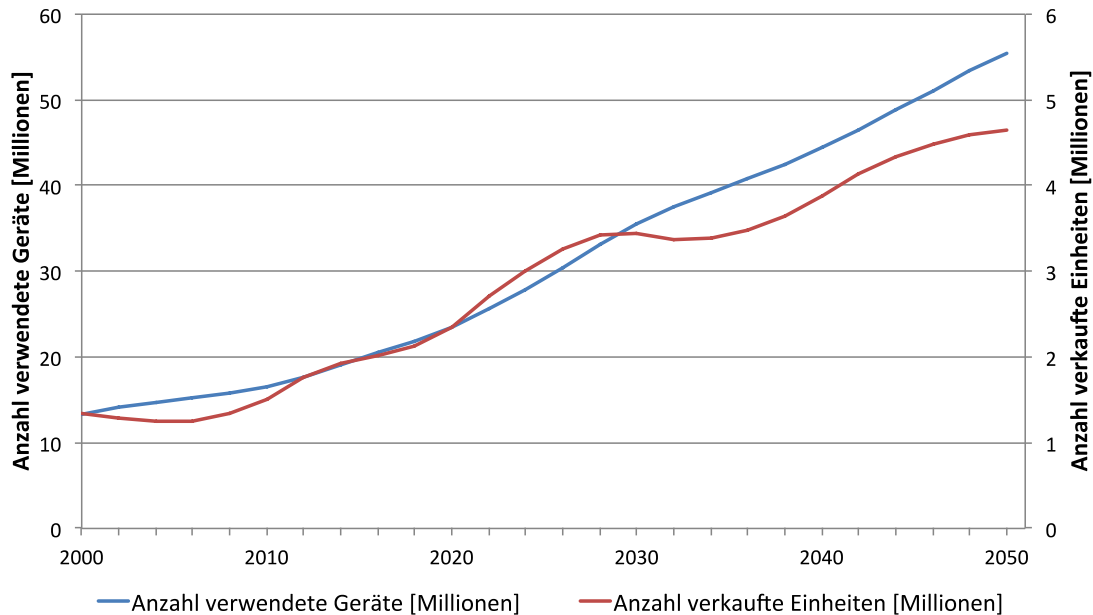


Abbildung 21: Entwicklung der Installationen von Klimageräten in Mexiko (Eigene Darstellung, Datenquellen: [24, 25])

Nach Schätzungen der IEA aus dem Jahre 2012 sollte die Entwicklung der Anteile solarthermischer Kühlung am weltweit steigenden Kühlbedarf bis 2050 einen immer größeren Anteil erreichen (vgl. Abbildung 22). Als Gründe für das starke Wachstum wurden in der IEA Roadmap am Wendepunkt im Jahr 2030 damals rapide sinkende Kosten für solarthermische Kühlsysteme und der gleichzeitige Anstieg der Stromkosten angenommen [29]. Diese Prognose entspricht aber nicht mehr der heutigen Realität, da sich photovoltaische Kühlung immer mehr durchsetzen und solarthermische Kühlsysteme voraussichtlich nur Nischenanwendungen besetzen werden. Neben den großen Ländern mit enormem Einfluss auf den weltweiten Kältebedarf wie China oder Indien wird vor allem im Mittleren Osten und Afrika ein hohes Anwendungspotential erwartet (vgl. Abbildung 23). Lateinamerika hingegen weist das geringste prognostizierte Wachstum auf.

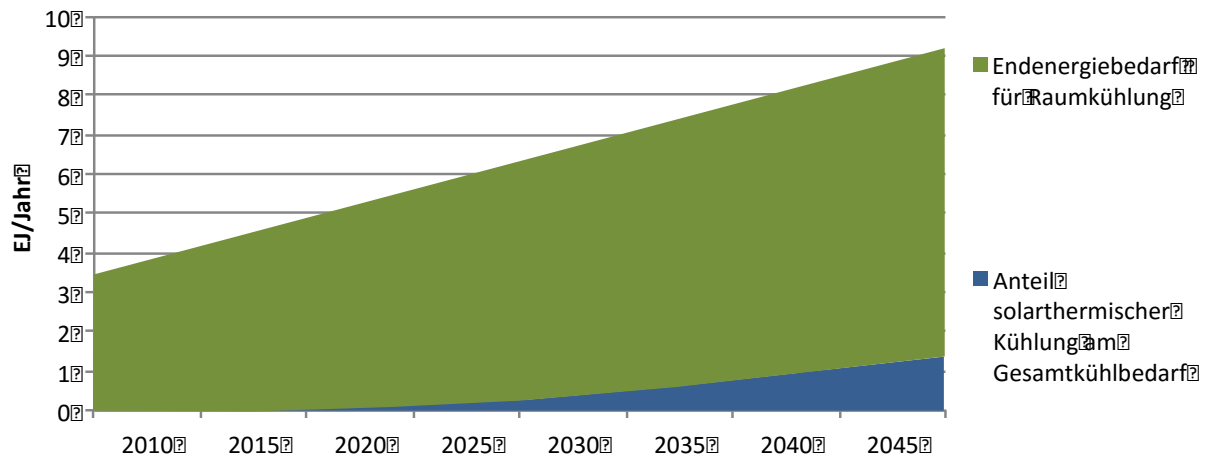


Abbildung 22: Weltweiter Anteil von solarthermischer Kühlung bis 2050 (eigene Darstellung, Datenquelle: [29])

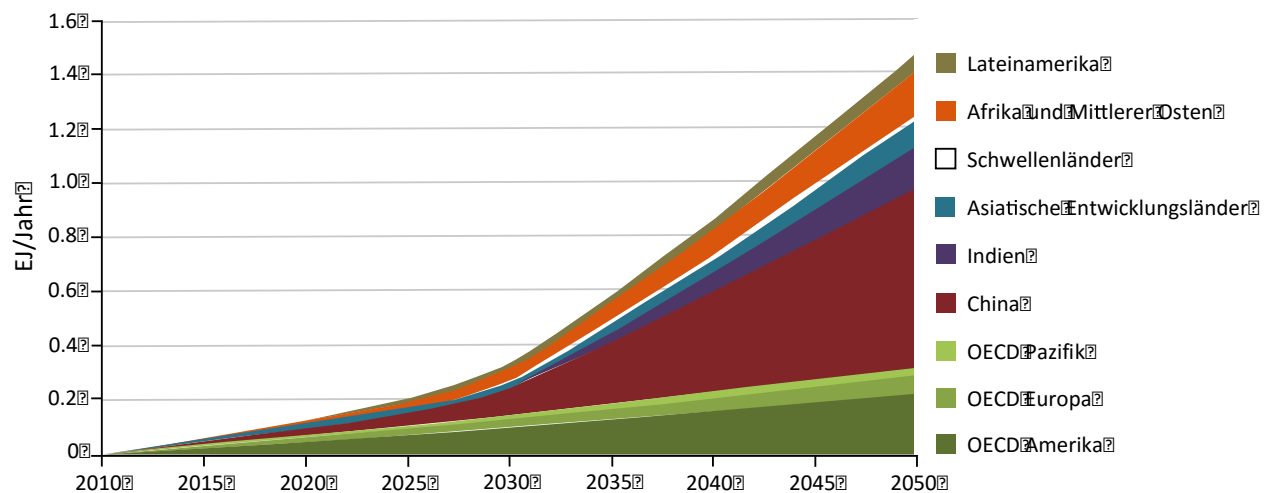


Abbildung 23: Marktpotential von solarthermischer Heizung und Kühlung bis 2050 (eigene Darstellung, Datenquelle: [29])

Für photovoltaische Systeme gibt es bisher keine vergleichbare Studien. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass mit weiter sinkenden PV-Modulpreisen die Kombination aus PV-Anlage mit existierenden oder neu installierten Split-Geräten zunehmen wird. Diese Systeme werden derzeit aber vom Endverbraucher als zwei separate Systeme wahrgenommen – also die Kältemaschine zur Kühlung der Räumlichkeiten und die PV-Anlage zur unabhängigen Stromgewinnung (falls gegeben mit der Option zur Stromspeicherung).

Im Jahr 2016 wurde die Grenze von 300 Gigawatt installierter PV-Leistung weltweit überschritten [34]. Dabei ist China mit 78 GW_{el} installierter Leistung weltweit führend. Dahinter befinden sich dicht gedrängt Japan (42,8 GW_{el}), Deutschland (41,2 GW_{el}) und die USA mit 40,3 GW_{el}. Platz 5 belegt Italien mit 19,3 GW_{el}. In Summe wurden 2016 weltweit 75 GW_{el} an neuen PV-Systemen installiert. Abbildung 24 zeigt die installierte Leistung im Jahr 2015 für verschiedene Länder. Die bereits genannten führenden Nationen befinden sich über der Marke von 15 GW_{el} installierter Anschlussleistung. Erweitert man den Bereich bis

zu einer Grenze von 5 GW_{el} , so fällt auf, dass vor allem Länder mit hoher solarer Einstrahlung vertreten sind. Dadurch gibt es zudem meist hohe Kältelasten in den jeweiligen Klimazonen der vertretenen Länder. Die Verwendung des PV-Stromes wird in den meisten Fällen nicht genau dokumentiert. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil für den Betrieb von elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschinen verwendet wird – also photovoltaische bzw. solarelektrische Kühlsysteme. Unter der Annahme, dass 1 % der installierten PV-Leistung hierfür verwendet wird (also pro 1 GW_{el} dann PV Cooling-Leistung von 20 MW_r bei COP von 2,0 und mittlerer Kälteleistung pro Split-Gerät 5 kW_r), würden sich für 2016 weltweit 1,2 Millionen photovoltaische Kühlsysteme ergeben.

Länder mit einem ebenfalls hohen Potential für die Installation für PV wie Portugal, Türkei, Thailand, Israel, Malaysia oder Mexiko sind hingegen weit entfernt von der 1 GW_{el} -Marke der installierten PV-Leistung (vgl. Abbildung 24). Für Mexiko bedeutet dies unter gleichen Annahmen (1 % der installierten PV Leistung für PV-Kühlung verwendet), dass bei 100 MW_{el} neu installierter PV-Leistung im Jahr 2016 es rund 400 photovoltaische Kühlsysteme mit jeweils 5 kW_r Kälteleistung geben könnte.

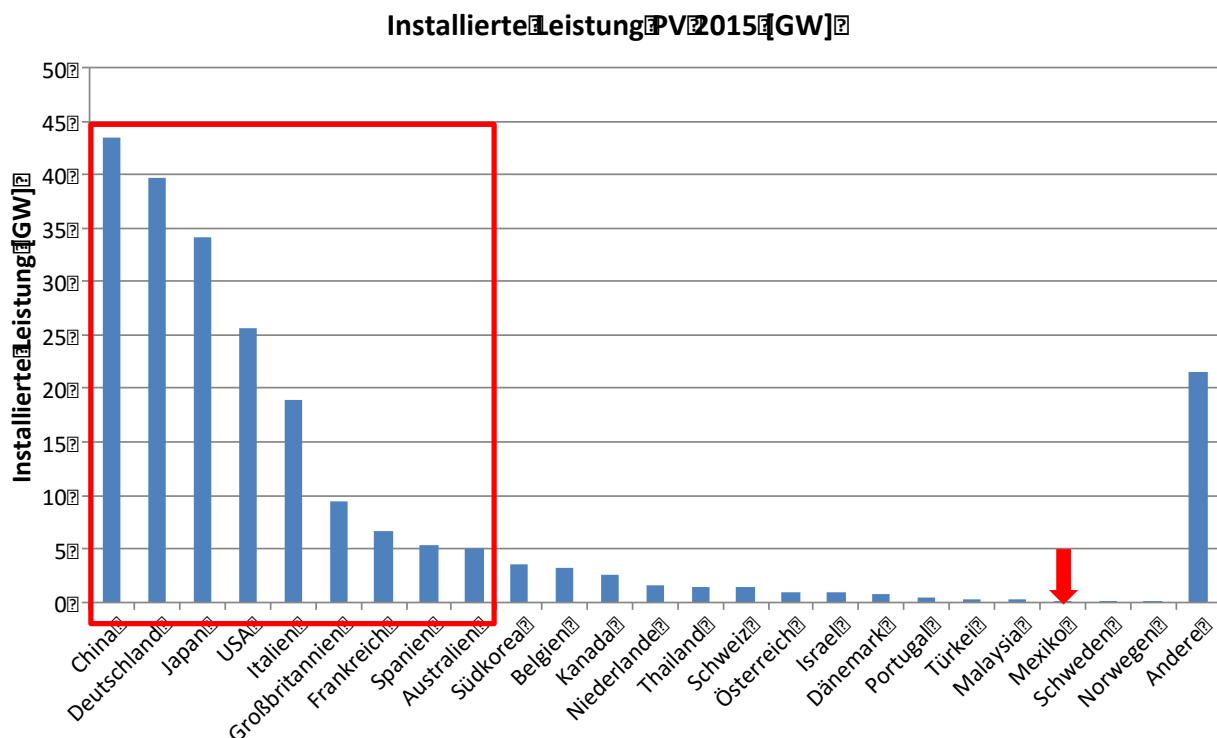


Abbildung 24: Installierte PV-Leistung 2015 nach Ländern (eigene Darstellung, Datenquelle: [8])

4 Solare Kühlung für Wohngebäude allgemein

4.1 Einleitung

In Kapitel 4 wird sowohl die Verwendung solarthermischer als auch die photovoltaischer Kühlsysteme für Wohngebäude (für einzelne Räume oder das gesamte Haus bzw. Wohnung) allgemein untersucht. Damit soll eine Einschätzung gegeben werden, welche Systeme bisher weltweit für welche Gebäudetypen eingesetzt werden. An einigen ausgewählten Projektbeispielen werden Erfahrungen bzw. Erkenntnisse aufgezeigt. Abbildung 25 zeigt zur Orientierung die durchschnittliche Quadratmeterzahl von Wohnungen in verschiedenen Ländern der Welt. Im Vergleich dazu sind die Wohnflächen der untersuchten Gebäudetypen in Mexiko (Kapitel 5) deutlich geringer – Faktor 2 und mehr –, da es sich dabei um sozialen Wohnungsbau handelt.

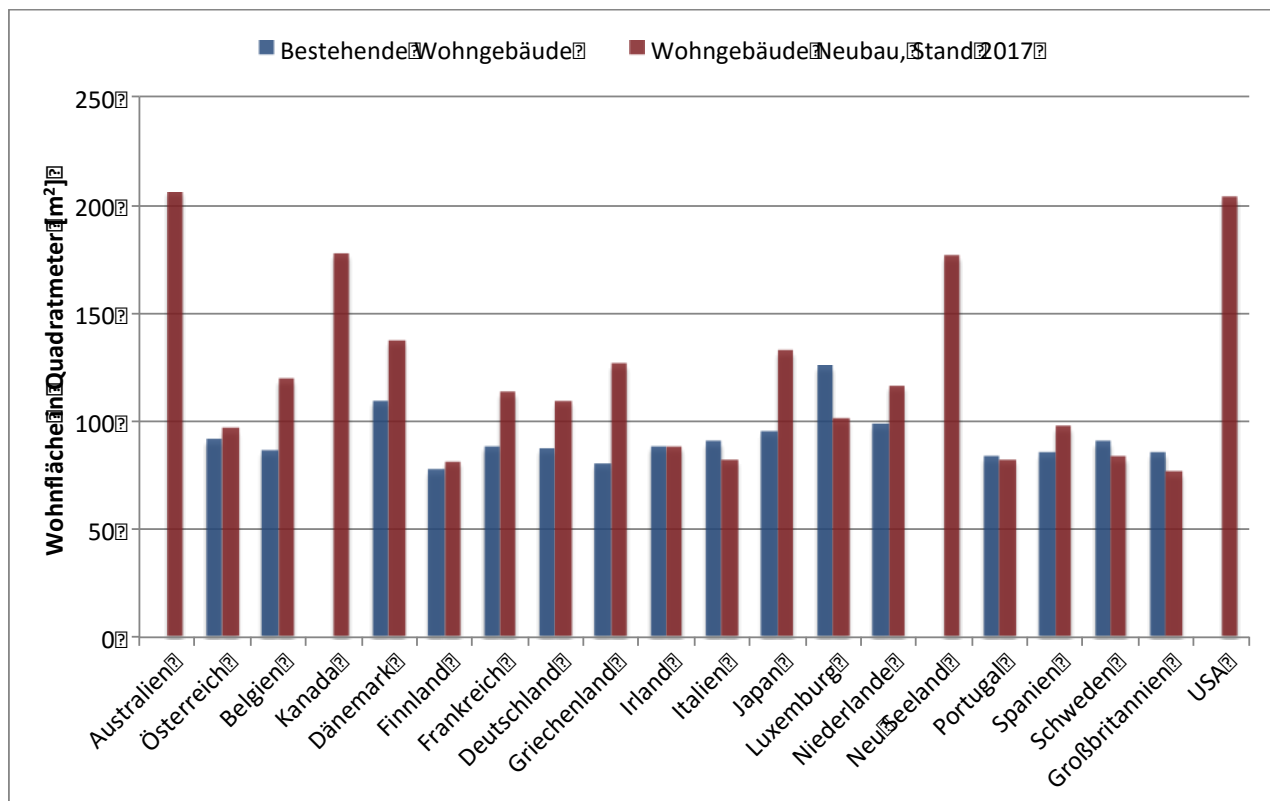


Abbildung 25: Durchschnittliche Wohnfläche aller Wohnungen im Bestand und Neubau in verschiedenen Ländern der Welt (eigene Darstellung, Datenquelle: [9])

Im Rahmen des IEA-SHC Task 38 [27] wurden im Jahr 2008 solarthermische Kühlsysteme dokumentiert. Insgesamt umfasst die Zusammenstellung 122 Projekte im Bereich der Kleinkälteanwendungen bis 20 kW_r Kälteleistung für industrielle, kommerzielle und private Nutzungen. Insgesamt nur 22 Projekte (18 %) befinden sich in Wohngebäuden. Davon wurden wiederum über 50 % der Projekte in Spanien umgesetzt. Von den verbleibenden 45-50 % befinden sich noch 27 % in Europa und die restlichen 18 % in Asien und Nordamerika. Die am häufigsten eingesetzte Technologie für die solare Kälteerzeugung sind hierbei Absorptionskältemaschinen. Für die Wärmeerzeugung kommen Flach- und Vakuumröhrenkollektoren

gleichermaßen zum Einsatz. Die vorgestellten Zahlen zeigen aber, dass solare Kühlung in Wohngebäuden bisher nur einen kleineren Anteil aller Installationen von solarthermischen Kühlsystemen ausmacht.

Für die Nutzung solarer Kühlung in Wohngebäuden eignen sich sowohl solarthermische als auch photovoltaische Kühlsysteme. Dies gilt für Wohngebäude wie das Einfamilienhaus, das Reihenhaus, Mehrfamilienhaus oder die Wohnanlage/Siedlung gleichermaßen. Je nach Gebäude sind jedoch die Anforderungen an den Platzbedarf für die Komponenten unterschiedlich. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass neben der Installation von solarthermischen Kollektoren oder Photovoltaik-Modulen die Rückkühlung und Aufstellung der Kältemaschine einen entsprechenden Bau- bzw. Aufstellraum benötigt. Des Weiteren sind Themen wie Wartung, Sicherheit und Finanzierung wichtig, um solare Kühlsysteme nachhaltig zu realisieren. Daher wird in den folgenden Unterkapiteln auf diese drei Themenfelder näher eingegangen.

4.1.1 **Wartung**

Solarthermische Kollektoren und Sorptionskälteanlage

Das Wartungsintervall einer solarthermischen Anlage liegt bei circa 2 Jahren und beinhaltet unter anderem die Überprüfung des Anteils an Frostschutz im Wärmeträger sowie des pH-Gehalts des Wärmeträgers und die Sichtprüfung aller Komponenten: von den Armaturen über die Kollektoren bis hin zur Rohrdämmung auf dem Dach. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Überprüfung des Rohrdämmmaterials im Außenbereich, da schlecht wärmegeämmte Rohrleitungen oder Defekte am Dämmmaterial zu erheblichem Wärmeverlusten und damit zu Ertragseinbußen führen [39].

Die Sorptionskälteanlage selbst sollte einmal pro Jahr gewartet werden, falls Kältemittel nachgefüllt werden muss bzw. übers Jahr in der Kältemaschine gesammelte Inertgase zur Vakuumerhaltung bei Wasser als Kältemittel abgesaugt werden müssen. Die Wartung selbst sollte nur durch geschultes Fachpersonal erfolgen.

PV-Module und Kompressionskälteanlage

Um einen durchgängig hohen Solarertrag gewährleisten zu können ist, eine regelmäßige Inspektion der PV-Module Pflicht. Hierbei sollte eine Sichtprüfung der Module sowie eine Überprüfung der elektrischen Verbindungen erfolgen. Eine regelmäßige Überprüfung des Wechselrichters ist zudem zu empfehlen. Eine Reinigung der Solarmodule ist bei Ertragsverlusten durch die Verschmutzung unabdingbar. Wie oft die Reinigung durchgeführt werden sollte, hängt sehr stark vom Standort ab. Bei normaler Verschmutzung der Photovoltaikanlage ist eine Reinigung alle zwei Jahre ausreichend [6, 7]. Die Wartung der PV-Module ist durch Fachpersonal durchzuführen, da hier Kenntnisse der Elektrotechnik notwendig sind.

Die Kompressionskälteanlage sollte regelmäßig jährlich durch Fachpersonal (Kältetechniker) inspiziert werden (gegebenenfalls Nachfüllen von Kältemittel aufgrund mittlerer Leckagenraten von 10-30 %). Eine Wartung im 5-Jahres-Turnus ist empfehlenswert, um eine durchgehend hohe Kälteleistung und somit hohe Effizienz der Anlage garantieren zu können.

4.1.2 **Sicherheit**

Um einen sicheren und langfristigen Betrieb der solarthermische bzw. photovoltaischen Kühlsysteme zu gewährleisten, sind einige Sicherheitsvorkehrungen zu treffen.

Solarthermische Kollektoren

Da die solarthermischen Kollektoren auf ihrer Oberfläche sehr heiß werden können (Temperaturen im Stillstand über 200 °C), ist die Installation einer Absperrung mit entsprechenden Warnhinweisen empfehlenswert, sofern die Kollektoren auf dem Boden/den Freiflächen neben dem/den Wohngebäude(n) aufgebaut sind. Zusätzlich sind die Kollektoren und Rohrleitungen gegen Zutritt von Unbefugten zu schützen. Neben den Kollektoren werden die Leitungen der thermischen Solaranlage sehr heiß. Bei Beschädigung der Rohrwärmedämmung kann es gegebenenfalls zu schweren Verletzungen kommen.

PV-Module

Bei photovoltaischen Modulen sind die stromführenden Kabel vor Berührung und Manipulation zu schützen. Zu beachten ist auch eine mögliche Verschattung der Module, welche Leistungsminderung oder punktuelle Überhitzung bei PV-Modulen bewirken kann. Dies führt zu Leistungsabfall im System, Nutzung von kostenpflichtiger Hilfsenergie (Netzbezug) oder der Beschädigung der Module. Deshalb ist eine regelmäßige Wartung der Module mit einer Prüfung auf Beschädigungen oder Verschattung durchzuführen. Das Entfernen von gegebenenfalls verschattendem Pflanzenbewuchs kann durch einen Facility Manager oder Gärtner ausgeführt werden. Die Häufigkeit richtet sich hierbei nach der Stärke des botanischen Wachstums.

Unterkonstruktion

Wettereinflüsse haben weiteren Einfluss auf solare Energiesysteme. Je nach Klimazone treten unterschiedliche Wetterphänomene auf, welche berücksichtigt werden müssen. Die Kollektoren bzw. PV-Module sind aufgrund ihrer Bauweise anfällig für Wind- oder Schneelasten. Um diese dagegen zu sichern, müssen die Tragkonstruktionen der Kollektoren durch mechanische Befestigung am darunterliegenden Tragwerk des Gebäudes oder durch Beschwerung gesichert werden. Zur Berechnung der richtigen Art und Gewicht der Sicherung ist es hilfreich, die maximal auftretenden Windlasten durch Analyse von Windkarten am jeweiligen Standort zu berechnen. Ein anderes Phänomen ist die Bildung von Eis und Ablagerung von Schnee auf und an den Kollektoren. Dabei ist zu beachten, dass wichtige mechanische und hydraulische Bauteile davor geschützt oder vom Schnee befreit werden. Die Unterkonstruktion der Kollektoren/PV-Module ist entsprechend so auszuführen, dass auftretende Wind- und Schneelasten aufgenommen werden können.

Personal

Die Installation der Kollektoren/PV-Module und deren Anschluss an das Gesamtsystem darf nur durch geschultes Fachpersonal durchgeführt werden. Die Installation von solarthermischen Kollektoren erfordert die Kenntnisse eines Heizung-/Solar-Installateurs. Der Anschluss von photovoltaischen Modulen hingegen die eines Elektrikers. Hierbei ist der richtige Anschluss an den Wechselrichter zu beachten.

4.1.3 Finanzierung

Eigenfinanzierung

Eine Möglichkeit der Finanzierung eines solarthermischen bzw. photovoltaischen Kühlsystems für den Wohngebäudebereich (Einfamilienhaus, Reihenhaus, evtl. auch Mehrfamilienwohnhaus bei einem

Eigentümer) besteht durch die Verwendung von Eigenkapital und – falls gegeben – staatlichen Fördergeldern für solare Kühlung, z.B. BAFA Förderung in Deutschland oder Conto Termico Programm in Italien.

Fremdfinanzierung durch Banken

Sollte kein oder wenig Eigenkapital vorhanden sein, dann kann Fremdkapital von Banken zur Finanzierung des solarthermischen bzw. photovoltaischen Kühlsystems herangezogen werden. Dies kann wiederum durch staatliche Fördergelder flankiert werden. Bei größeren Bauprojekten (Mehrfamilien-wohnhaus, Wohnanlage/Siedlung) kann dies auch über Förderkredite wie z.B. von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) zur Finanzierung von Energieeffizienz-Maßnahmen bezuschusst werden.

Betreibermodelle (ESCO)

Bei größeren Bauprojekten kann auch eine Energy Service Company (ESCO) als professioneller Geschäftspartner die spätere Energieversorgung der Wohngebäude übernehmen (Abbildung 26). ESCOs bieten den Verbrauchern die Möglichkeit, durch eine breite Palette von Energiedienstleistungen ihren Energieverbrauch und damit auch ihre Energiekosten zu senken. Dabei kann die Dienstleistung die folgenden aufgelisteten Bereiche umfassen [18]:

- Energiemanagement mit Energieanalyse und Audits
- Projektierung und Implementierung
- Energieversorgung und Energieerzeugung
- Wartung und Betrieb
- Controlling mit Monitoring, Facility- und Risikomanagement.

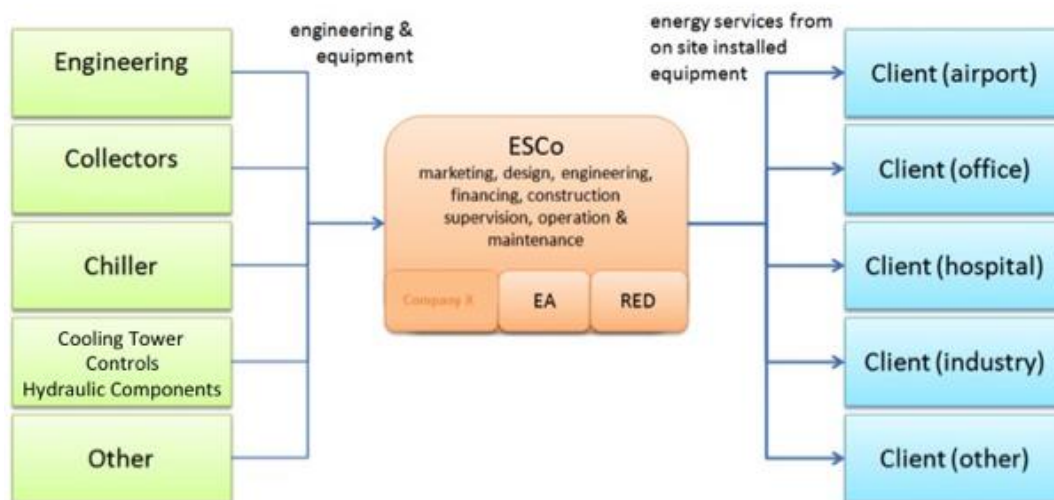


Abbildung 26: Wichtigste ESCo-Systemkomponenten mit theoretischem Prozessablauf [18]

Solarthermische und photovoltaische Kühlungssysteme sind zwar technisch ausgereift, dennoch sind diese Techniken in Bezug auf ihr Potential noch wenig auf dem europäischen sowie weltweiten ESCO Markt verbreitet. Ein wesentlicher Hauptgrund dafür ist die Unsicherheit der Endverbraucher bezüglich hohen Investitionskosten und der Zuverlässigkeit des noch „unbekannten“ Systems.

Um ESCos von anderen Energiedienstleistern (wie z.B. Beratungsunternehmen, Energieversorger und Gerätehersteller) unterscheiden zu können, sind folgende Eigenschaften von ESCo-Dienstleistern aufgelistet. Charakteristische Eigenschaften von ESCos sind:

- Eine Garantie gleich hoher Energieeinsparungen gegenüber anderen Energiedienstleistern zu geringeren Kosten. Dies kann gewährleistet werden durch: Abdeckung der zurückzuzahlenden Kosten durch tatsächliche Energieeinsparungen oder Erbringung der gleichen Leistungen zu geringeren Kosten.
- Die Vergütung einer ESCo ist direkt an die erzielten Energieeinsparungen des neuen Systems gebunden.
- Anbieten einer Unterstützung bei der Finanzierung des solaren Kühlsystems, da eine Energieeinsparung garantiert ist (Vertrauensstärkung).
- Übernehmen einer operativen Rolle bei Überprüfung und Monitoring der Anlage.

Das ESCo-Modell ist als wichtiges Instrument zur Erreichung der gesteckten Energieeffizienz- und Energieeinsparziele der EU-Mitgliedstaaten auch in der Energy Service Directive (ESD) (2006/32/EC), dem Energy Performance Contracting (EPC) und der Third Party Financing (TPF) Berichte beschrieben. ESD definiert ein ESCo als ein Unternehmen, welches eine Energiedienstleistung zur Verbesserung der Energieeffizienz innerhalb einer Organisation liefert und dabei ein gewisses finanzielles Risiko übernimmt. Die Zahlung der erbrachten Leistungen erfolgt (ganz oder teilweise) über die Erreichung von Verbesserungen der Energieeffizienz und über die Erfüllung der zusätzlich vereinbarten Leistungskriterien.

Vorteile eines ESCo-Finanzierungsmodells sind:

- Keine oder sehr niedrige Investitionskosten für den Kunden (minimiert finanzielles Risiko)
- Garantierter Wärme-/Kältepreis pro kWh_{th}, Vorteil gegenüber anderen Energiequellen
- Komplettes Energiedienstleistungspaket, von einem Unternehmen übernommen (Kunde kann sich auf andere wichtige Kernaktivitäten konzentrieren)
- Maximal möglicher Solarertrag für Kunden auch im Interesse der ESCo
- Gewährleistung moderner, technischer und wirtschaftlicher Lösungen
- Prestige (eine positive Einstellung zu neuen Technologien)
- Marketing-Strategien (um auch ökologische Vorteile zu verkaufen, um Engineering zu verkaufen)
- Möglichkeit, den niedrigsten Preis für Wärme- oder Kälteenergie zu zahlen.

In einigen Ländern, in denen große ESCos existieren wie zum Beispiel in Frankreich, wird die Finanzierung der Projekte durch das eigene Kapital der ESCos durchgeführt, sodass Banken nur eine kleine Rolle bei der gesamten Finanzierung spielen.

Bisher gibt es zwei dokumentierte solarthermische Kühlsysteme im großen Leistungsbereich (> 1 MW_r) in Singapur und USA, welche über ESCo-Modelle entsprechend der individuellen geschäftlichen Anforderungen der Bauherren realisiert wurden [18].

4.2 Beispiele aus verschiedenen Ländern

Folgend sind einige Beispiele für solarthermischer Kühlsysteme in Wohngebäuden mit Darlegung der technischen Eckdaten, teilweise Kosten und Wirtschaftlichkeit aufgeführt. Die Datenlage bei den dokumentierten Projektbeispielen ist generell nicht umfangreich. Oft fehlen Informationen bzw. Angaben zu den Kosten (Investition, Wartung), ROI sowie Erfahrungsberichte bzgl. der eingesetzten Systeme. Projekte zu photovoltaischen Kühlsystemen sind nicht aufgeführt, da hier die eingehende Recherche derzeit leider kein Ergebnis hinsichtlich dokumentierter Projekte erbracht hat.

Beispiel 1: Wohngebäude in Wiesloch, Deutschland [1, 10]

Eines der ersten Wohngebäude in Europa mit solarer Kühlung befindet sich in Wiesloch. Das System besteht aus einer ADSorptionskältemaschine mit 7,5 kW_r Leistung. Die notwendige Wärmeenergie für den Betrieb der Kältemaschine wird von 40 m² Flachkollektoren geliefert, die als In-Dach-System ausgeführt sind. Das Kühlsystem wurde im Rahmen einer energetischen Sanierung des 260 m² großen Wohnhauses installiert. Die Rückkühlung findet über einen Trockenrückkühler statt, der im Garten des Gebäudes aufgestellt ist. Dieser hat zudem die Möglichkeit, bei hohen Außenlufttemperaturen eine adiabate Kühlung über ein Wassersprühsystem zuzuschalten. Als Back-up System für die Wärmeerzeugung für die Kältemaschine steht ein Öl-Brenner zur Verfügung. Zusätzlich wird das Warmwasser in einem 2 m²-Tank gespeichert. Die Kosten für des installierten Systems betragen in Summe 60.400 €. Aus dem Marktanreizprogramm des deutschen BAFA hat der Gebäudeeigentümer zusätzliche Fördergelder für die Solarkollektoren in Höhe von 8.400 € erhalten. Somit reduzieren sich die Investitionskosten auf 52.000 €. Mit 13.500 € entfallen 22 % der Kosten auf die Kollektoren und den Speicher. Der Öl-Brenner hat mit 6.700 € einen Anteil von 11 % an den Gesamtkosten. Die Kältemaschine kostete 17.000 €, die Kälteverteilung 13.200 € und die Installation des Systems 10.000 €. Abzüglich der erhaltenen Fördergelder ergibt sich somit ein spezifischer Systempreis von 6.933 €/kW_r installierter Kälteleistung. Bezieht man die Kosten auf die Kollektorfläche, so sind es 1.300 €/m².

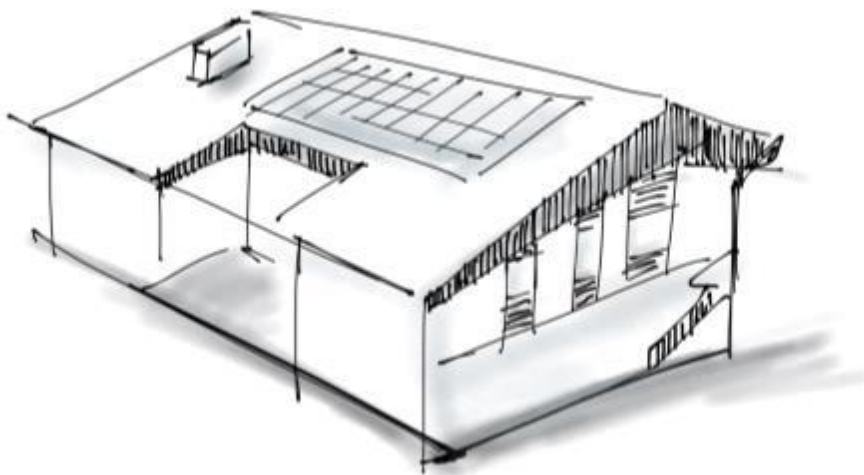


Abbildung 27: Einstöckiges Wohngebäude in Wiesloch (SOLEM Consulting)

Eckdaten solarthermische Kühlung Wohngebäude in Wiesloch:

Kälteleistung / Technologie	7,5 kW _r / Adsorptionskältemaschine
Kollektorfläche / Technologie	36 m ² / Flachkollektoren
Rückkühlung	Trockenrückkühler
Speichergröße	2 m ² für Warmwasser

Beispiel 2: Einfamilienhaus in Thening, Österreich [13]

Zur Klimatisierung dieses zweistöckigen Einfamilienhauses mit 177 m² Wohnfläche wurde ein Adsorptionskältemaschine mit 5.5 kW_r installiert. Mit einer Vorlauftemperatur von 19°C werden die Kühlwände im Gebäude während der Kühlperiode im Juli und August betrieben. Die Betriebstemperatur der Adsorptionskältemaschine von 75°C wird von Flachkollektoren mit einer Gesamtfläche von 38 m² bereitgestellt. Als Back-Up-System steht ein Biomasseboiler mit 10 kW_{th} bereit. Dieses wird in der Heizperiode zur Beheizung des Gebäudes verwendet. Zur Wärmespeicherung stehen insgesamt drei Speicher mit insgesamt 6 m³ Volumen zur Verfügung. Für die Rückkühlung wird auf ein Nasskühlturm zurückgegriffen.

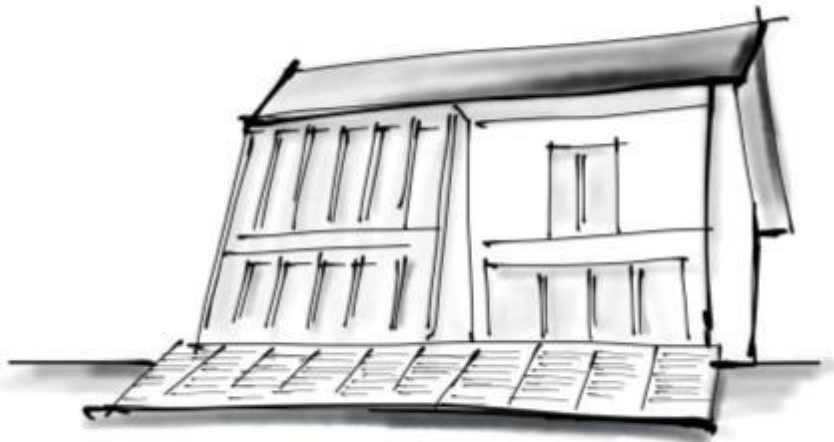


Abbildung 28: Zweistöckiges Wohngebäude in Thening (SOLEM Consulting)

Eckdaten solarthermische Kühlung Einfamilienhaus in Thening:

Kälteleistung / Technologie	5,5 kW _r / Adsorptionskältemaschine
Kollektorfläche / Technologie	38 m ² / Flachkollektoren
Rückkühlung	Nasskühlturm
Speichergröße	6 m ² für Warmwasser

Beispiel 3: Einfamilienhaus in Mailand, Italien [12]

Das Wohngebäude mit einer Fläche von 90 m² in Mailand erstreckt sich über 2 Stockwerke. Für die Klimatisierung der Wohnräume zwischen Mai und September wird auf ABSorptionssystem mit 4,5 kW_r bei einer Betriebstemperatur von 90°C vertraut. Die Verteilung der Kälte im Gebäude erfolgt über Umluftkühler (sogenannte Fan Coils). Für den Betrieb des Systems mit einem COP zwischen 0,6 und 0,7 werden CPC-Vakuumröhrenkollektoren mit einer Aperturfläche von 20 m² verwendet. Die Rückkühlung erfolgt über einen Trockenrückkühler. Einziges Speichersystem sind zwei Warmwasserspeicher mit 2 m³.

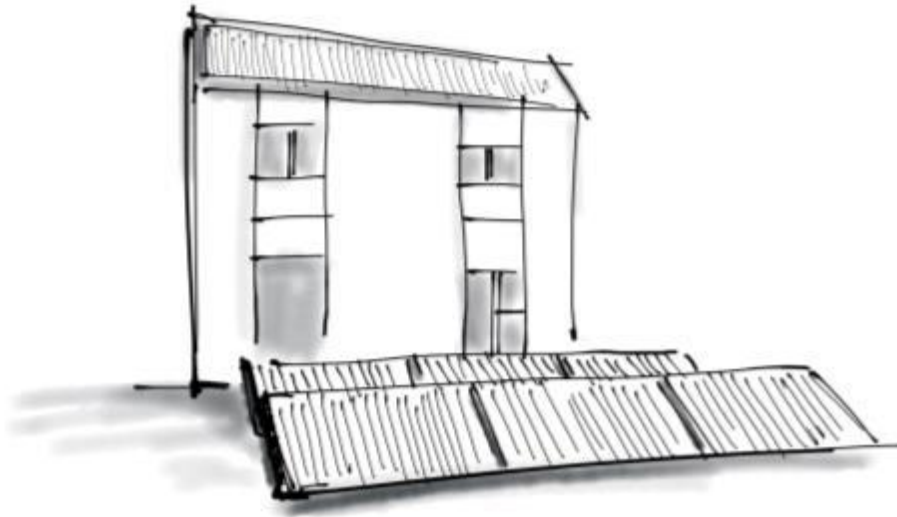


Abbildung 29: Zweistöckiges Wohngebäude in Mailand (SOLEM Consulting)

Eckdaten solarthermische Kühlung Einfamilienhaus in Mailand:

Kälteleistung / Technologie	4,5 kW _r / ABSorptionssystem
Kollektorfläche / Technologie	20 m ² / CPC-Vakuumröhrenkollektoren
Rückkühlung	Trockenrückkühler
Speichergröße	2 m ³

Beispiel 4: Wohngebäude mit solarer Kühlung und Heizung in Derio, Spanien [11]

Eine ABSorptionssystem mit 10 kW_r Kälteleistung und 21,6 m² Vakuumkollektorfläche sind die Eckdaten eines solaren Kühlungssystems für ein Wohngebäude in Spanien. Für die Kühlung von 200 m² Wohnfläche wird eine Fußbodenkühlung verwendet. Die Kühlperiode ist in dieser Region Spaniens in den Monaten Juni bis August. In das System ist ein Speicher mit einem Volumen von 0,6 m³ integriert. Die Rückkühlung des Kältemittels erfolgt über den Bewässerungstank des Gebäudes.

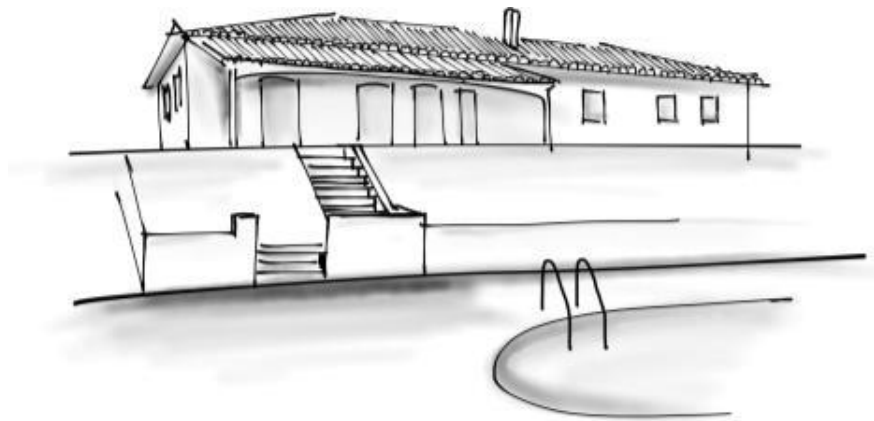


Abbildung 30: Wohngebäude in Spanien (SOLEM Consulting)

Eckdaten solarthermische Kühlung Wohngebäude in Derio:

Kälteleistung / Technologie	10 kW _r / Adsorptionskältemaschine
Kollektorfläche / Technologie	21,6 m ² / Vakuumröhrenkollektoren
Rückkühlung	Bewässerungstank
Speichergröße	0,6 m ³ für Warmwasser

Beispiel 5: Wohnhaus in Aqaba, Jordanien [14, 15]

Das Einfamilienhaus in Jordanien hat zur Deckung des Kältebedarfs eine Adsorptionskältemaschine mit 15 kW_r installiert. Die Wärme für den Betrieb der Kältemaschine wird durch Röhrenkollektoren mit einer Fläche von 32 m² bereitgestellt. Das Projekt wurde bereits im Jahr 2007 durch das Institut für Energieeffizienz im Konstruktionssektor im Mittelmeerraum in Kooperation mit dem Jordanischen Unternehmen Millennium Energy Industries realisiert.



Abbildung 31: Dreistöckiges Einfamilienhaus in Aqaba (SOLEM Consulting)

Eckdaten solarthermische Kühlung Wohnhaus in Aqaba:

Kühlerleistung / Technologie	15 kW _r / Adsorptionskältemaschine
Kollektorfläche / Technologie	32 m ² / Vakuumröhrenkollektoren
Rückkühlung	Nasskühlturm
Speichergröße	k.A.

Beispiel 6: Villa in Peking, China [10]

Ebenfalls im Jahr 2008 wurde ein Pekinger Privathaus mit einem solaren Kühlsystem ausgestattet. Die 7,5 kW_r Adsorptionskältemaschine erzeugt die benötigte Kälte der Raumlüftung. Bereitgestellt wird die Antriebswärme durch 20,5 m² Flachkollektoren. Zwei Speicher mit je 1.000 Liter puffern Warm- und Kaltwasser. Die Rückkühlung erfolgt über einen Trockenrückkühler mit zusätzlicher Besprühung.

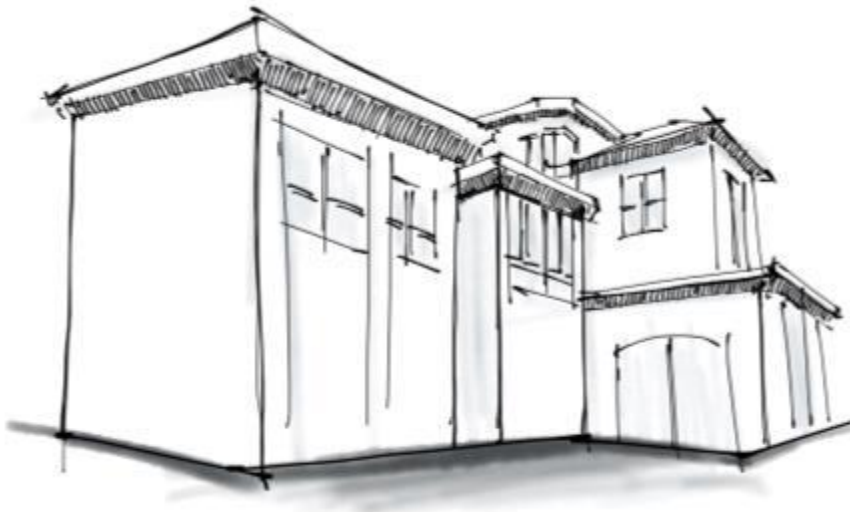


Abbildung 32: Villa in Peking (SOLEM Consulting)

Eckdaten solarthermische Kühlung Villa in Peking:

Kälteleistung / Technologie	8 kW _r / Adsorptionskältemaschine
Kollektorfläche / Technologie	20,5 m ² / Vakuumröhrenkollektoren
Rückkühlung	Trockenrückkühler
Speichergröße	1.000 Liter Warmwasser; 1.000 Liter Kaltwasser

Beispiel 7: Zweifamilienhaus in Alzenau, Deutschland [10]

Seit dem Jahr 2008 besitzt ein Zweifamilienhaus in Alzenau eine ADSorptionskältemaschine mit einer Leistung von 8 kW_r . Angetrieben durch die Wärme von Flachkollektoren mit einer Kollektorfläche von 24 m^2 und einem Biomassensystem als Back-up erzeugt die Kältemaschine die benötigte Kälte, die für eine Lüftungsanlage benötigt wird. Ein Speicher mit 2.000 Litern Warmwasser dient als Puffer. Die Abwärme wird über einen Trockenrückkühler mit zusätzlicher Besprühung abgeführt.

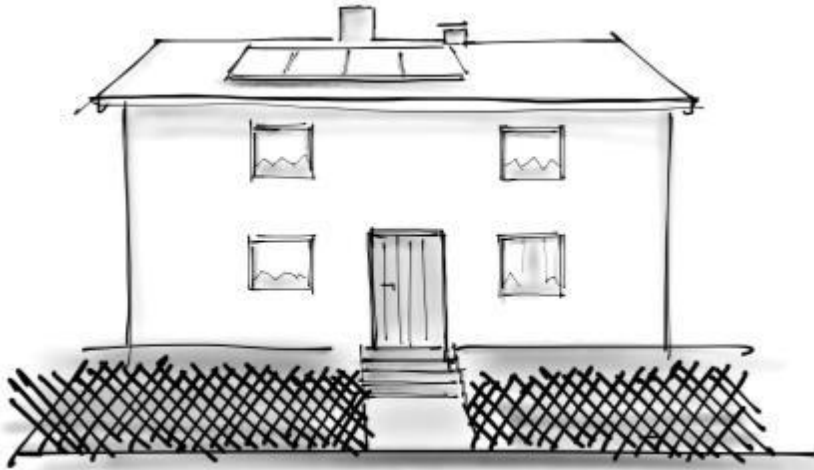


Abbildung 33: Zweifamilienhaus in Alzenau (SOLEM Consulting)

Eckdaten solarthermische Kühlung Zweifamilienhaus in Alzenau:

Kälteleistung / Technologie	8 kW_r / ADSorptionskältemaschine
Kollektorfläche / Technologie	24 m^2 / Flachkollektoren
Rückkühlung	Trockenrückkühler
Speichergröße	2.000 Liter Warmwasser

Beispiel 8: Kühlung für ein Theater- und Wohngebäude in Nordrhein-Westfalen, Deutschland [10]

Eine Kombination aus thermischen Kollektoren und einem Blockheizkraftwerk (BHKW) betreiben eine ADSorptionkältemaschine mit 10 kW_r Kälteleistung. Die Rückkühlung erfolgt über einen Trockenrückkühler mit drehzahlgeregelten Motoren. Das Kaltwasser wird über Fan Coils im Gebäude zur Kühlung genutzt. Das erzeugte Warmwasser von Kollektoren und BHKW findet unter anderem in der Wandheizung seine Anwendung.



Abbildung 34: Zweistöckiges Wohngebäude in Nordrhein Westfalen (SOLEM Consulting)

Eckdaten solarthermische Kühlung Theater- und Wohngebäude:

Kälteleistung / Technologie	10 kW _r / ADSorptionskältemaschine
Kollektorfläche / Technologie	k.A.
Rückkühlung	k.A.
Speichergröße	k.A.

Beispiel 9: Résidence du Lac, Maclas, Frankreich [26]

Die Seniorenresidenz in Frankreich kann mit einem Mehrfamilienhaus verglichen werden. Lediglich ein Teil des Gebäudes mit einer Fläche von 210 m² wird gekühlt. Dies geschieht mit einer ABSorptionskältemaschine, die eine Leistung von 10 kW_r besitzt. Als Backup-System für die Kältemaschine steht eine 3 kW Kompressionskältemaschine bereit. Während der Kühlperiode von Juni bis September erzeugen Vakuumröhrenkollektoren mit einer Fläche von 24 m² die benötigte Wärmeenergie für die Kältemaschine. In dieser Zeit beträgt die Kühlenergie in Summe ca. 4.300 kWh/a. Die Energieeinsparungen durch die solare Kühlung wird mit 5 EUR cent/kWh_r angenommen und beträgt somit in Summe 215 EUR/a. Als Wärmespeicher stehen ein 0,5 m³ Speicher und ein 80 Liter Kältespeicher zur Verfügung.

Die Investitionskosten für dieses System betragen 70.000 € (ohne Mehrwertsteuer). Bezogen auf eine Laufzeit von 15 Jahren betragen die jährlichen Abschreibungskosten 4.667 € bzw. bezogen auf die installierte Leistung entsprechend 7.000 €/kW. Die Betriebskosten für Pumpen und Kältemaschine belaufen sich auf 25 €/Jahr. Kosten für die jährliche Wartung sind nicht angegeben.

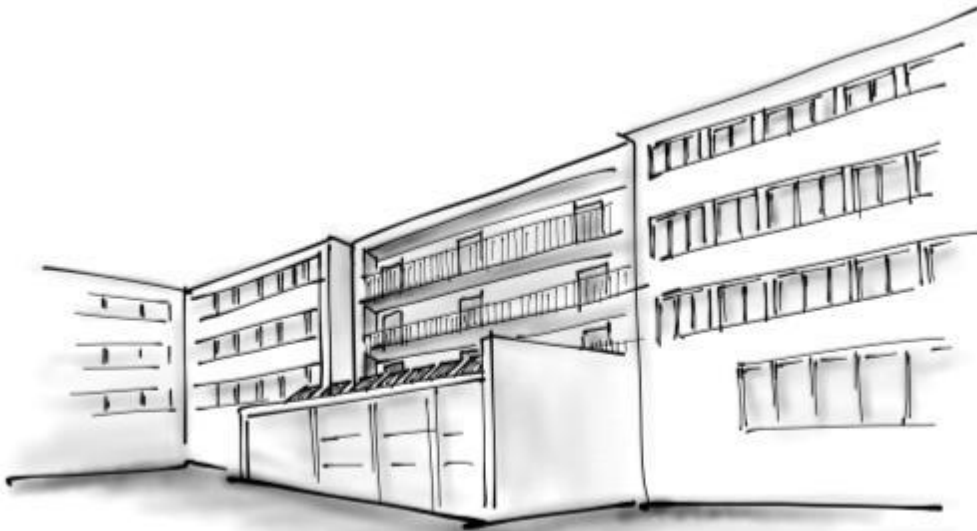


Abbildung 35: Seniorenresidenz in Maclas (SOLEM Consulting)

Eckdaten solarthermische Kühlung Seniorenresidenz Maclas:

Kälteleistung / Technologie	10 kW _r / ABSorptionskältemaschine
Kollektorfläche / Technologie	24 m ² / Vakuurröhrenkollektoren
Rückkühlung	Trockenrückkühler
Speichergröße	0,5 m ³ Warmwasser; 80 Liter Kaltwasser

4.3 Fazit

Solare Kühlung in Wohngebäuden findet bisher nur in sehr geringem Umfang Anwendung. Dies gilt sowohl für solarthermische als auch photovoltaische Kühlungssysteme. Vor zehn Jahren (2005-2008) haben die Firmen Rotartica und Climatwell in Spanien und teilweise Italien eine größere Anzahl von solarthermische Kühlungssystemen mit ABSorptionskälteanlagen in Wohngebäuden realisiert (ca. 150-200 Installationen) [40], aber die beiden Firmen haben mit dem Platzen der Immobilienblase in Spanien im Jahr 2007 die Vermarktung ihrer Produkte eingestellt. Die Beispiele zeigen, dass es weltweit Projekte im Wohngebäudebereich gibt, aber im Verhältnis zu anderen Anwendungsbereichen (z.B. Bürogebäude, Hotels, Institute, Schulen, Einkaufszentren, Restaurants, Krankenhäuser, Produktionsgebäude und Altersheime etc.) wiederum sehr wenige.

Die Anzahl und Dichte von Projekten, bei denen solarthermische Kühlsysteme eingesetzt werden, ist unterschiedlich hoch (vgl. Abbildung 19). Eine besonders hohe Dichte ist in Europa, Teilen Asiens, Australien und Nordamerika zu erkennen. In Südamerika gibt es derzeit kaum Projekte. In Europa gibt es nach aktuellem Datenstand im Bereich der solarthermischen Kühlung eine Vielzahl an Anlagen in Spanien, Deutschland und Italien [27].

Darüber hinaus gibt es viele „virtuelle“ Anlagen mit photovoltaischer Kühlung, die nicht explizit als solche dokumentiert sind (getrennte/r Installation/Kauf von PV-Anlage und Split-Gerät/en, also nicht als System projiziert bzw. eingebaut). Diese Anlagen profitieren weltweit von den guten Finanzierungsmöglichkeiten von PV-Systemen sowie dem gleichzeitigen hohen Verbreitungsgrad von Split-Klimaanlagen.

Wie groß dabei das Potential zur Energie- und Kosteneinsparung ist, zeigt eine Beispielanalyse der Firma ClimateWell für ein Einfamilienhaus in Italien [41]. So betragen die jährlichen Einsparungen 1.357 €/a bzw. 85 % weniger Energieaufwand für Gas (Warmwasser, Heizung) bzw. Strom (Kühlung), was 8.351 kWh/a für die Kühlung entspricht. Umgerechnet in CO₂ entspricht dies einer Einsparung von 6.778 kg/a. Ein wichtiger Faktor hierbei ist die lange Dauer der Kühlperiode von April bis November in Italien.

Photovoltaische Kühlungssysteme werden hingegen in der Zukunft im Wohngebäuden voraussichtlich eine größere Rolle spielen, da die Preise für PV-Module stark gesunken sind und in Wohngebäuden entweder schon Split-Geräte zur Kühlung von Räumlichkeiten im Wohngebäude existieren bzw. neu eingebaut werden und damit sich „virtuell“ ein solarelektrisches Kühlsystem ergibt.

Die Autoren gehen davon aus, dass solare Kühlung in Wohngebäuden in der Zukunft verstärkt im Kälte-/Klimatechnik-Markt vertreten sein wird, da der Klimatisierungsbedarf weltweit stetig wächst und die CO₂-Einsparung bzw. Energieeffizienz und der Einsatz von Erneuerbaren Energien im politischen Fokus steht.

5 Solare Kühlung für sozialen Wohnungsbau in Mexiko

5.1 Zielstellung

Mexiko wird bis zum Jahr 2050 eine Bevölkerung von schätzungsweise 150 Millionen Menschen haben (Stand 2016 ca. 123 Millionen). Derzeit werden aufgrund des Bevölkerungswachstums und gleichzeitiger zunehmender Urbanisierung rund eine halbe Million neue Sozialwohnungen pro Jahr in städtischem oder stadtnahem Umfeld gebaut. Der Energieverbrauch dieser neu entstehenden Wohnungen soll im Rahmen einer nachhaltigen Stadtentwicklung im Vergleich zum bestehenden Gebäudestandard reduziert werden, um die Klimaschutzziele Mexikos auch im Wohnungssektor erreichen zu können.

In diesem Kapitel wird untersucht, ob solare Kühlung im sozialen Wohnungsbau in Mexiko unter wirtschaftlichen und energetischen Gesichtspunkten sinnvoll betrieben werden und zum Erreichen der Klimaschutzziele einen Beitrag leisten kann.

Dabei wird zwischen zwei verschiedenen Technologien zur solaren Kühlung und vier verschiedenen Gebäudetypen unterschieden. Folgende Technologien zur solaren Kühlung werden untersucht (siehe auch Kapitel 2.2):

- Solarthermischer Betrieb von AB- und Adsorptionskälteanlagen
- Photovoltaischer Betrieb von Kompressionskälteanlagen mit Eigenverbrauch

Folgende Gebäudetypen werden untersucht (detaillierte Beschreibung folgt in Kap. 5.3):

- Einfamilienhaus
- Reihenhaushaus
- Mehrfamilienhaus
- Wohnanlage

5.2 Methodik

Der Vergleich der Technologiealternativen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für Mexiko wird in dieser Studie hinsichtlich der folgenden Parameter durchgeführt:

- Klimakälte-Gestehungskosten (Levelized Cost of Cooling Energy, LCCE)
- Amortisationszeit
- Energieeinsparpotential

Die drei Parameter werden im Vergleich zu einem Referenzszenario, bestehend aus konventionellen Splitgeräten zur Gebäudekühlung, bewertet. Die verwendete Methodik besteht aus den in Tabelle 6 aufgeführten Schritten und wird für jeden Gebäudetyp sowie für die Wohnanlage in Mexiko einzeln durchgeführt.

Tabelle 6: Vorgehensweise bei der Untersuchung der Wohngebäude in Mexiko (je Gebäudetyp/Wohnanlage):





Zuordnung	Schritt Nr.	Inhalt
Gebäude allgemein	1	Ermittlung der maximal verfügbaren Dachfläche, Neigung und Ausrichtung
	2	Ermittlung des Kühlbedarfs im Gebäude je Jahr sowie der Spitzenlast
	3	Berechnung des elektrischen Energieverbrauchs je Jahr zur Deckung des Kühlbedarfs
Szenario „Referenz“	4	Ermittlung der Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten je Jahr für Szenario „Referenz“
	5	Berechnung der Gesteungskosten Kühlung (LCCE) für Szenario Referenz
Szenario „solare Kühlung“	6	Ermittlung der max. möglichen Kollektorabsorber-/Modulfläche
	7	Auswahl eines geeigneten Modells einer AB- oder ADSorptionskälteanlage bzw. einer Kompressionskälteanlage (Leistung, COP, Temperaturen)
	8	Simulation des Solarertrags der Kollektoren bzw. PV-Module für Szenario „solare Kühlung“
	9	Berechnung des Kälteertrags für Szenario „solare Kühlung“
	10	Ermittlung der Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten je Jahr für Szenario „solare Kühlung“
	11	Berechnung der Gesteungskosten Kühlung (LCCE) für für Szenario „solare Kühlung“
Szenarien Vergleich	12	Berechnung der Energie- und Kosteneinsparung im Vergleich beider Szenarien
	13	Berechnung der Amortisationszeit im Vergleich beider Szenarien

5.3 Annahmen

5.3.1 Gebäude und Klimazonen

Die Untersuchungen dieser Studie beziehen sich auf drei spezifische Gebäudetypologien. Zusätzlich wird die Untersuchung der Einsetzbarkeit von solarer Kühlung auf Siedlungsebene (Wohnanlage) durchgeführt. Die betrachteten Gebäudetypologien leiten sich aus einem beispielhaften Bebauungsplan eines sozialen Siedlungsgebietes ab. In einer Studie der SEMARNAT [2] wird dabei in drei Gebäudetypen unterschieden, zusätzlich wird noch als eine vierte Variante eine Wohnanlage definiert, vgl. Tabelle 7.

Tabelle 7: Übersicht der untersuchten Gebäudetypologien

Typologie	Einfamilienhaus (aislada)	Reihenhaus (adosada)	Mehrfamilienhaus (vertical)	Wohnanlage
Beispielansicht	 Bildquelle: [2]	 Bildquelle: [2]	 Bildquelle: [2]	 Bildquelle: [3]
Anzahl Gebäude je Typologie	1	1	1	100 davon: 50 Reihenhäuser, 50 Wohnungen in Mehrfamilienhäusern (viergeschossig)
Wohneinheiten je Typologie	1	1	8	450 davon: 50 Reihenhäuser, 400 in Mehrfamilienhäusern
Wohnfläche je Wohneinheit	40 m ²	70 m ²	40 m ²	40 m ² Reihenhäuser 70 m ² –Wohnungen in Mehrfamilienhäusern
Gesamtwohnfläche je Typologie	40 m ²	70 m ²	320 m ²	19.500 m ² davon: 3.500 m ² in Reihenhäusern, 16.000 m ² in Mehrfamilienhäusern
Anzahl Geschosse	1	2	4	2/4

Die untersuchten Gebäudetypologien werden jeweils für vier Städte betrachtet, welche die heißen Hauptklimazonen Mexikos repräsentieren:

Trocken-heißes Klima:

- Mexicali, Bundesstaat Baja California,
- Hermosillo, Bundesstaat Sonora

Semiarides-heißes Klima:

- Monterrey, Bundesstaat Nuevo León

Feucht-heißes Klima:

- Cancun, Bundesstaat Quintana Roo

Abbildung 36 zeigt die untersuchten Standorte mit den jeweiligen Klimazonen.

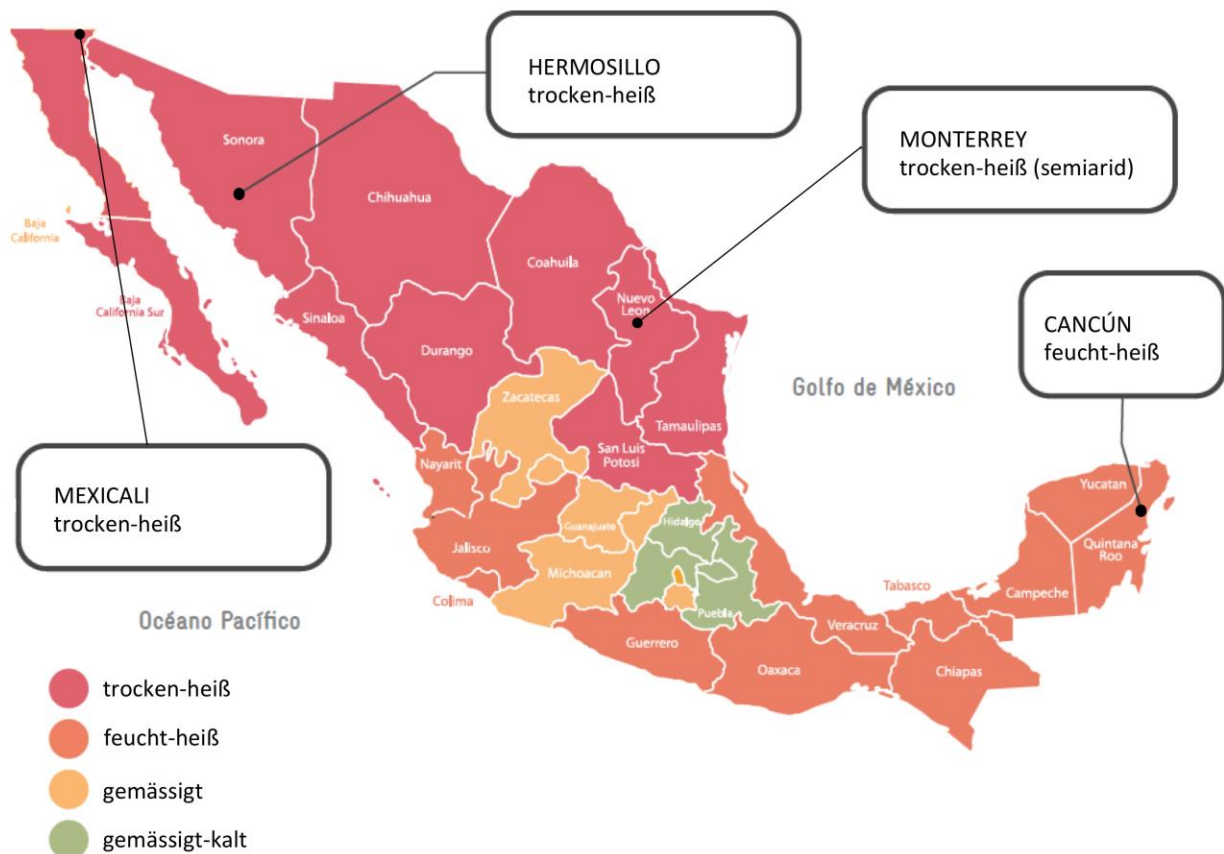


Abbildung 36: Übersicht der in dieser Studie untersuchten Standorte und Klimazonen [2, p.47, modifiziert]

Innerhalb der Studie werden vier verschiedene Standorte in drei verschiedenen Klimazonen in Mexiko untersucht. Damit ändern sich die Anforderungen an die Kälteerzeugung/Klimatisierung für jeden Standort. Folgende Faktoren müssen dabei beachtet werden:

- Dauer der Klimakälte-Anforderung (Volllaststunden und nominale Leistung je Jahr)
- Verfügbarkeit der solaren Einstrahlung, Anteil Direkt-/Diffusstrahlung
- Verhältnis sensibler zu latenter Wärmelast im Gebäude²

Je nach Standort kann die Ergänzung durch weitere Systemkomponenten wie Wärme- und Kältespeicher sinnvoll sein. Darauf wird innerhalb der Studie eingegangen. Zunächst wird anhand der definierten Wohnflächen der Kältebedarf pro Wohneinheit in der jeweiligen Klimazone ermittelt, um die nominale Leistung für die Klimaanlage/Kältemaschine festzulegen. Anhand dieser Angaben wird dann die Dimensionierung der Kältesysteme durchgeführt. Alle dazu verwendeten Angaben/Daten stammen aus [2].

5.3.2 Technische und wirtschaftliche Annahmen

Alle Annahmen für installierte Kälteleistung und jeweiligen Kühlbedarf pro Jahr für alle Gebäude sind in Tabelle 8 zusammengefasst:

Tabelle 8: Annahmen für installierte Kälteleistung und Kühlbedarf je Jahr. [2, p.183 ff.]

		Einfamilienhaus (Aislada)		Reihenhaus (Adosada)		Mehrfamilienhaus (Vertical)		Wohnanlage	
Zu kühlende Gebäudefläche		40 m ²		70 m ²		320 m ²		19.500 m ²	
Klimazone	Standorte	Gesamte Kühllast je Bauweise (Baseline)	Kühlbedarf je Jahr (Baseline)	Gesamte Kühllast je Bauweise (Baseline)	Kühlbedarf je Jahr (Baseline)	Gesamte Kühllast je Bauweise (Baseline)	Kühlbedarf je Jahr (Baseline)	Gesamte Kühllast je Bauweise (Baseline)	Kühlbedarf je Jahr (Baseline)
		kWr	MWh _{th} /a	kWr	MWh _{th} /a	kWr	MWh _{th} /a	kWr	MWh _{th} /a
Heiß und trocken	Mexicali Hermosillo	8,0	19,64	10,8	24,57	42	115,52	2635	7005
Semi-arid	Monterrey								
Heiß und feucht	Cancun	4,0	27,8	5,2	39,62	19,8	176,32	1251	10797

Für eine komfortable Konditionierung der Raumluft in den Wohnräumen der Gebäude sind Richtwerte zwischen 20°C und 25°C vorgegeben [2]. Die Gebäude werden zudem als Massivgebäude angenommen, deren Bodenplatten und Wände aus bewehrtem Beton bestehen. Die transparenten Bauteile werden als Einscheiben-Verglasung mit Aluminiumrahmen und ohne weitere thermische Isolierung angenommen. Dies hat Einfluss auf die thermische Speichermasse der Gebäude und die solaren Einträge, die sich auf die Dimensionierung der Kältemaschinen auswirkt [2, p.79].

² Unter sensibler Wärmelast versteht man die Wärme, die abgeführt werden muss, um die Temperatur im Gebäude konstant zu halten. Unter latenter Wärmelast versteht man die Wärme, die zusätzlich abgeführt werden muss, um die Luftfeuchtigkeit im Gebäude konstant zu halten.

Weitere Randbedingungen sind interne Wärmelasten von $5,3 \text{ W/m}^2$ und ein Infiltrationswert von **5 h-1** durch die Undichtigkeit der Gebäudehülle [2, p.81].

Dieser Untersuchung liegen folgende weitere Annahmen zugrunde:

Allgemeine technische Annahmen:

- i. Elektrischer Strom ist zeitlich immer verfügbar, d.h. ein konventionelles Klimagerät im Netzbetrieb (Szenario Referenz) deckt 100 % des jährlichen Gebäudekühlbedarfs ab.
- ii. Erdgas ist über ein Gasnetz oder aus Haustanks zeitlich immer verfügbar.
- iii. Die verfügbare Brutto-Dachfläche eines Gebäudes entspricht der Bruttogrundfläche des Gebäudes (Flachdach), wird jedoch nur zu maximal 90 % mit solarthermischen Kollektoren bzw. Photovoltaik-Modulen belegt.
- iv. Alle Dachflächen sind unverschattet, Montage der Module/Kollektoren dachparallel (nicht aufgeständert) auf Flachdach³
- v. Energiebedarf für Heizen und Warmwasser im Gebäude wird nicht berücksichtigt.
- vi. Solare Einstrahlungsdaten wurden je Standort aus Meteonorm-Daten ermittelt.
- vii. Der Heizwert von Erdgas in Mexiko wird mit $13,3 \text{ kWh/kg}$ angenommen.
- viii. Die Kostenangaben beziehen sich auf Juli 2017.
- ix. Alle angegebenen Kosten sind Netto-Kosten ohne Umsatzsteuer und beinhalten Kosten für Installation und Transport zum jeweiligen Standort, sofern nicht explizit anders angegeben. Alle Kosten sind in Euro angegeben.
- x. Mögliche Einschränkungen bei der Errichtung/dem Betrieb einer Photovoltaikanlage an den Standorten sind nicht berücksichtigt: Es wurde jeweils angenommen, dass Bau und Betrieb der Anlage möglich ist. Damit stellt diese Studie eine Pre-Feasibility-Potentialbetrachtung dar, macht jedoch keine Aussage darüber, ob Errichtung und Betrieb tatsächlich möglich sind.
- xi. Die Jahresarbeitszahl (COP) aller Kompressions-Klimaanlagen (Kaltwassersatz, Split- und VRF-Geräte) wird konstant mit 2,5 angenommen [2, p. 185 ff]
- xii. Der solare Deckungsgrad gibt an, wieviel Prozent des jährlichen Klimakältebedarfs durch die jeweilige verwendete Solartechnologie gedeckt wird.

Annahmen für Photovoltaik-Anlagen:

- xiii. Verwendetes PV-Modul: SS MONO 255Wp der Firma SunSolar Energy Ltd.
- xiv. Moduldegradation: 20 % über 25 Jahre
- xv. Kabelverluste (AC+DC) wurden pauschal mit 2 % angenommen
- xvi. Überschüssig erzeugter Strom wird in das Netz eingespeist, jedoch nicht vergütet oder mit anderen Stromverbrauchern im Haus verrechnet. Die jährlich produzierte elektrische Energiemenge der PV-Anlage ist nicht gleich der verbrauchten elektrischen Energiemenge für Klimatisierung, da das Verbrauchsprofil der Klimaanlage nicht genau dem Erzeugungsprofil der PV-Anlage entspricht.

Annahmen für Solarthermie-Anlagen:

- xvii. Verwendeter Flachkollektor: GreenOneTec GK3003
- xviii. Verwendeter Vakuumröhrenkollektor: WIKORA Wikosun HP20-24

³ Eine aufgeständerte Variante wurde ebenfalls untersucht, führte aber zu höheren Kosten und geringeren Jahreserträgen.

- xix. Verwendeter Parabolrinnenkollektor: Soltigua PTMx
- xx. Keine Degradation über 25 Jahre
- xxi. Wärmeverluste über Rohrleitungen werden im Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhaus vernachlässigt (kurze Wege), in der Wohnanlage berücksichtigt
- xxii. Überschüssig erzeugte Wärme wird nicht vergütet oder mit anderen Wärmeverbrauchern im Haus verrechnet.

Annahmen für Berechnung der Wirtschaftlichkeit:

- xxiii. Betriebskosten und Anschaffungen (Reparatur/Ersatz) in den Jahren 2-20 unterliegen der Inflation.
- xxiv. Kältegestehungskosten (Levelized Cost of Cooling, LCCE) werden mittels der Methode der finanzmathematischen Durchschnittskosten berechnet. Dabei werden Investitionen und Zahlungsströme über die Laufzeit der Anlage auf einen gemeinsamen Bezugszeitpunkt diskontiert. Die Kältegestehungskosten werden über 20 Jahre mit den Annahmen in Tabelle 10 ermittelt.

$$LCCE = \frac{I_0 + \overset{n}{\underset{t=1}{\ddot{a}}} \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\overset{n}{\underset{t=1}{\ddot{a}}} \frac{M_t}{(1+i)^t}}$$

LCCE Gestehungskosten Klimakälte in Euro/kWh
 I₀ Investitionsausgaben in Euro
 A_t Jährliche Gesamtkosten in Euro im Jahr t
 M_t, Dem Gebäude entzogenen Wärmeenergie im
 jeweiligen Jahr in kWh
 i realer kalkulatorischer Zinssatz in %
 n wirtschaftliche Lebensdauer in Jahren
 t Jahr der Nutzungsperiode (1, 2, ...n)

- xxv. Die statische Amortisationszeit wird nach folgender Formel berechnet:

$$t_{Am} = \frac{I_{0,Solar} - I_{0,Ref}}{\bar{A}_{Ref} - \bar{A}_{Solar}} = \frac{\text{Mehrkosten durch Solarsystem}}{\text{durchschn. jährliche Kosteneinsparung}}$$

- xxvi. Das jährliche Energieeinsparpotential durch Verwendung solarer Kühlung im Vergleich zum Referenz-Szenario wird auf der Basis von Primärenergie nach untenstehender Formel berechnet. Dabei wird ein durchschnittlicher elektrischer Kraftwerkswirkungsgrad von $\eta_{KW,MX} = 45\%$ für Mexiko angenommen [4].

$$DQ_{PE} = \frac{W_{el,ref} - W_{el,Solar}}{\eta_{KW,MX}} - Q_{Gas,Solar}$$

- W_{el,Ref} elektrischer Energieverbrauch je Jahr der Referenzanlage in MWh_{el}
- W_{el,Solar} elektrischer Energieverbrauch je Jahr der Anlage solarer Kühlung in MWh_{el}
- Q_{Gas,Solar} Energieverbrauch Gas je Jahr der Anlage solarer Kühlung in MWh_{ch}
- $\eta_{KW,MX}$ durchschnittlicher elektrischer Kraftwerkswirkungsgrad (45%)

- xxvii. Die Lebensdauer der einzelnen Hauptkomponenten wird wie folgt angenommen, Tabelle 9:

Tabelle 9: Technische Lebensdauer der Anlagenkomponenten

Kenngröße	Wert
Lebensdauer solarthermische Kollektoren	20 Jahre
Lebensdauer PV-Module	20 Jahre
Lebensdauer Wechselrichter	10 Jahre
Lebensdauer Absorptionskältemaschine	20 Jahre
Lebensdauer Kompressionskältemaschine	12 Jahre

xxviii. Folgende finanzmathematische Kenngrößen werden angenommen, Tabelle 10:

Tabelle 10: Finanzmathematische Randbedingungen für Wirtschaftlichkeitsrechnungen [2]

Kenngröße	Beschreibung	Einheit
Effektivzinssatz	2,0 %	pro Jahr
Inflationsrate	4,0 %	pro Jahr
Steigerung Wasserpreis	2,0 %	pro Jahr
Steigerung Gaspreis	2,1 %	pro Jahr
Steigerung Strompreis	4,0 %	pro Jahr

xxix. Stromkosten: Es werden zwei verschiedene Strompreis-Szenarien unterschieden:

- a) Tarif „Consumo Base“
- b) Tarif „Consumo Excedente“

Der Tarif „Consumo Base“ repräsentiert nach grober Schätzung 60% der Bevölkerung im sozialen Wohnungsbau und bildet daher die heutige Ist-Situation recht gut ab. Der Tarif „Consumo Excedente“ ist derzeit nur bei wenigen Haushalten Realität. Hier wird jedoch zukünftiges Potenzial für solare Kühlung erwartet für den Fall, dass die Subventionen auf den Strompreis in Mexicali und Hermosillo mittel- und langfristig gesenkt werden. [5].

Weiterhin wird zwischen zwei verschiedenen Szenarien der staatlichen Subvention des Strompreises unterschieden. In den Bundesstaaten Baja California (Mexicali) und Sonora (Hermosillo) wird im Zeitraum 01.05. bis 31.10. des Jahres eine Subvention von 66 % auf die Stromkosten gewährt. Dadurch sinken die Strompreise in diesem Zeitraum entsprechend. Folgende Energie- und Wasserpreise je Standort werden angenommen (Tabelle 11):

Tabelle 11: Energie- und Wasserkosten für Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Standort	Strompreis Tarif Consumo Base	Strompreis Tarif Consumo Excedente	Subvention auf Strompreis (beide Tarife)	Gaspreis	Wasserpreis

Standort	Strompreis Tarif Consumo Base	Strompreis Tarif Consumo Excedente	Subvention auf Strompreis (beide Tarife)	Gaspreis	Wasserpreis
	€/kWh	€/kWh	%	€/kWh	€/m ³
Mexicali	0,037	0,132	-66 % im Zeitraum 01.05. bis 31.10.	0,053	0,276
Hermosillo	0,036	0,130	-66 % im Zeitraum 01.05. bis 31.10.	0,053	0,769
Monterrey	0,039	0,137	Keine	0,051	0,691
Cancun	0,038	0,134	Keine	0,055	0,864

5.4 Berechnung für verschiedene Wohngebäudetypologien

Die Nutzung der solaren Kühlung erfolgt in den drei Gebäudetypologien Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhaus mit jeweils prinzipiell gleichem Anlagenaufbau für die Optionen solarthermische und photovoltaische Kühlung. Abbildung 37 zeigt schematisch den Aufbau der Anlagen zum solarthermischen und photovoltaischen Kühlen für die Gebäude Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhaus. Der Unterschied zwischen den Gebäudetypologien liegt in der zur Verfügung stehenden Dachfläche, der zu kühlenden Raumfläche sowie der verwendeten Klimaanlageentechnologie. Tabelle 12 zeigt die Übersicht der verwendeten Parameter und Anlagen für die Optionen Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhaus. Auf die technische Auslegung für die Wohnanlage wird in Kap. 5.4.4 detailliert eingegangen.

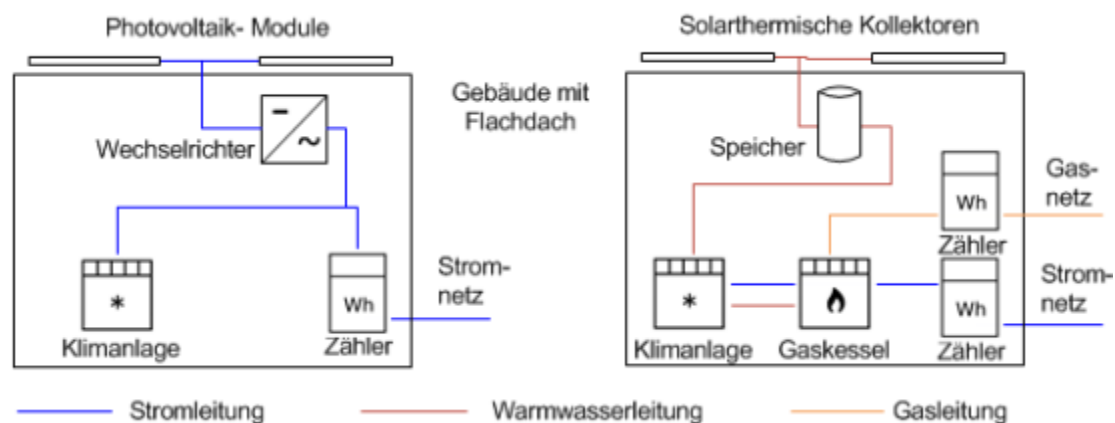


Abbildung 37: Übersicht des Anlagenaufbaus für photovoltaische (links) und solarthermische Kühlung (rechts) für die Gebäudetypologien Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhaus.

Tabelle 12: Übersicht der verwendeten Klimaanlage, Speichertechnologien, Backup-Systeme und Dachflächen

	Einfamilienhaus (Aislada)		Reihenhaus (Adosada)		Mehrfamilienhaus (Vertical)	
	Solarthermische Kühlung	Photovoltaische Kühlung	Solarthermische Kühlung	Photovoltaische Kühlung	Solarthermische Kühlung	Photovoltaische Kühlung
Art der Klimaanlage	Adsorptionskälteanlage mit 2-4 Inneneinheiten	Splitgerät mit 2-4 Inneneinheiten	Adsorptionskälteanlage mit 3-5 Inneneinheiten	Splitgerät mit 3-5 Inneneinheiten	Absorptionskälteanlage mit 16 Inneneinheiten	VRF-Gerät mit 16 Inneneinheiten
Energiespeicher	Warmwasser	-	Warmwasser	-	Warmwasser	-
Backup-System	Gaskessel	Stromnetz	Gaskessel	Stromnetz	Gaskessel	Stromnetz
Verfügbare Dachfläche	36 m ²		63 m ²		81 m ²	
Zu kühlende Raumfläche	40 m ²		70 m ²		320 m ²	

5.4.1 Einfamilienhaus

Die Nutzungsvariante solarer Kühlung im Einfamilienhaus beinhaltet folgende technische Auslegung.

Ein-familien-haus	Standort	-	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
	zu kühlende Fläche im Gebäude	m2	40	40	40	40
	Kühllast Gebäude	kWr	8,4	8,4	8,4	4,0
Referenz-anlage, reiner Netzbetrieb (REF)	Technologie Kälte	-	Multi-Split	Multi-Split	Multi-Split	Multi-Split
	Hersteller Kälteanlage	-	GREE	GREE	GREE	GREE
	Modell/Typ	-	GWHD-36-NK3BO	GWHD-36-NK3BO	GWHD-36-NK3BO	GWHD-18-NK3KO
	Anzahl Inneneinheiten/Kreise	-	4	4	4	2
	Nominale Kühlleistung	kWr	10,5	10,5	10,5	5
Photo-voltaik-System (PVAC)	Technologie Kälte	-	Multi-Split	Multi-Split	Multi-Split	Multi-Split
	Hersteller Kälteanlage	-	GREE	GREE	GREE	GREE
	Modell/Typ	-	GWHD-36-NK3BO	GWHD-36-NK3BO	GWHD-36-NK3BO	GWHD-18-NK3KO
	Kühlleistung	kWr	10,5	10,5	10,5	5
	Technologie PV	-	Monokristallin	Monokristallin	Monokristallin	Monokristallin
	Hersteller PV-Module	-	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd
	Modell/Typ PV-Module	-	MONO SS 255	MONO SS 255	MONO SS 255	MONO SS 255
	Peakleistung PV	kWp	5,4	5,4	5,4	5,4
	Hersteller Wechselrichter	-	SMA	SMA	SMA	SMA
	Modell/Typ Wechselrichter	-	Sunny Boy 1AV 5.0-40	Sunny Boy 1AV 5.0-40	Sunny Boy 1AV 5.0-40	Sunny Boy 1AV 5.0-40
Solar-thermie-System (STAC)	Technologie Kälte	-	Adsorption	Adsorption	Adsorption	Adsorption
	Hersteller Kälteanlage	-	Invensor	Invensor	Invensor	Invensor
	Modell/Typ	-	LTC10eplus	LTC10eplus	LTC10eplus	LTC10eplus
	Kühlleistung nominal	kWr	9,5	9,5	9,5	5
	Nominaler COP inkl. elektr. Verbrauch	-	0,5	0,5	0,5	0,5
	Kaltwasser VL/RL	°C	13/18	13/18	13/18	10/15
	Kühlwasser VL/RL	°C	27/	27/	27/	27/
	Heisswasser VL/RL	°C	85/	85/	85/	65/
	Technologie Kollektoren	-	Vakuümrohre	Vakuümrohre	Vakuümrohre	Flachkollektor
	Wärmeträger Kollektoren	-	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser
	Hersteller Kollektoren	-	WIKORA	WIKORA	WIKORA	GreenOneTec
	Modell/Typ Kollektoren	-	WIKOSUN HP70-24	WIKOSUN HP70-24	WIKOSUN HP70-24	GK 3003
	Installierte Aperturfläche	m2	24	24	24	24

Die sich daraus ergebenden Investitions- und Installationskosten sind in Anhang 8.3.1 detailliert aufgeführt.

5.4.2 Reihenhaushaus

Die Nutzungsvariante solarer Kühlung im Reihenhaushaus beinhaltet folgende technische Auslegung.

Reihenhaus	Standort	-	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
	zu kühlende Fläche im Gebäude	m ²	70	70	70	70
	Kühllast Gebäude	kWr	10,8	10,8	10,8	5,2
Referenzanlage, reiner Netzbetrieb (REF)	Technologie Kälte	-	Multi-Split	Multi-Split	Multi-Split	Multi-Split
	Hersteller Kälteanlage	-	GREE	GREE	GREE	GREE
	Modell/Typ	-	GWHD-42-NK3BO	GWHD-42-NK3BO	GWHD-42-NK3BO	GWHD-24-NK3MO
	Anzahl Inneneinheiten/Kreise	-	5	5	5	3
	Nominale Kühlleistung	kWr	12,1	12,1	12,1	7
Photovoltaik-System (PVAC)	Technologie Kälte	-	Multi-Split	Multi-Split	Multi-Split	Multi-Split
	Hersteller Kälteanlage	-	GREE	GREE	GREE	GREE
	Modell/Typ	-	GWHD-42-NK3BO	GWHD-42-NK3BO	GWHD-42-NK3BO	GWHD-24-NK3MO
	Kühlleistung	kWr	12,1	12,1	12,1	7
	Technologie PV	-	Monokristallin	Monokristallin	Monokristallin	Monokristallin
	Hersteller PV-Module	-	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd
	Modell/Typ PV-Module	-	MONO SS 255	MONO SS 255	MONO SS 255	MONO SS 255
	Peakleistung PV	kWp	10,2	10,2	10,2	10,2
	Hersteller Wechselrichter	-	SMA	SMA	SMA	SMA
	Modell/Typ Wechselrichter	-	Sunny Tripower 10000 TL20	Sunny Tripower 10000 TL20	Sunny Tripower 10000 TL20	Sunny Tripower 10000 TL20
Solarthermie-System (STAC)	Technologie Kälte	-	Adsorption	Adsorption	Adsorption	Adsorption
	Hersteller Kälteanlage	-	Invensor	Invensor	Invensor	Invensor
	Modell/Typ	-	LTC10eplus	LTC10eplus	LTC10eplus	HTC18
	Kühlleistung nominal	kWr	11	11	11	5
	Nominaler COP inkl. elektr. Verbrauch	-	0,5	0,5	0,5	0,5
	Kaltwasser VL/RL	°C	9/12	9/12	9/12	10/15
	Kühlwasser VL/RL	°C	27/	27/	27/	27/
	Heisswasser VL/RL	°C	75/	75/	75/	65/
	Technologie Kollektoren	-	Vakuümrohre	Vakuümrohre	Vakuümrohre	Flachkollektor
	Wärmeträger Kollektoren	-	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser
	Hersteller Kollektoren	-	WIKORA	WIKORA	WIKORA	GreenOneTec
	Modell/Typ Kollektoren	-	WIKOSUN HP70-24	WIKOSUN HP70-24	WIKOSUN HP70-24	GK 3003
	Installierte Aperturfläche	m ²	32	32	32	32

Die sich daraus ergebenden Investitions- und Installationskosten sind in Anhang 8.3.2 detailliert aufgeführt.

5.4.3 Mehrfamilienhaus

Die Nutzungsvariante solarer Kühlung im Mehrfamilienhaus beinhaltet folgende technische Auslegung.

Mehrfamilienhaus	Standort	-	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
	zu kühlende Fläche im Gebäude	m ²	320	320	320	320
	Kühllast Gebäude	kWr	42	42	42	20
Referenzanlage, reiner Netzbetrieb (REF)	Technologie Kälte	-	VRF	VRF	VRF	VRF
	Hersteller Kälteanlage	-	GREE	GREE	GREE	GREE
	Modell/Typ	-	GMV-450WMB-X	GMV-450WMB-X	GMV-450WMB-X	GMV-280WMB-X
	Anzahl Inneneinheiten/Kreise	-	16	16	16	16
	Nominale Kühlleistung	kWr	45	45	45	28
Photovoltaik-System (PVAC)	Technologie Kälte	-	VRF	VRF	VRF	VRF
	Hersteller Kälteanlage	-	GREE	GREE	GREE	GREE
	Modell/Typ	-	GMV-450WMB-X	GMV-450WMB-X	GMV-450WMB-X	GMV-280WMB-X
	Kühlleistung	kWr	45	45	45	28
	Technologie PV	-	Monokristallin	Monokristallin	Monokristallin	Monokristallin
	Hersteller PV-Module	-	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd
	Modell/Typ PV-Module	-	MONO SS 255	MONO SS 255	MONO SS 255	MONO SS 255
	Peakleistung PV	kWp	11,5	11,5	11,5	11,5
	Hersteller Wechselrichter	-	SMA	SMA	SMA	SMA
	Modell/Typ Wechselrichter	-	Sunny Boy 3.6 1AV-40	Sunny Boy 3.6 1AV-40	Sunny Boy 3.6 1AV-40	Sunny Boy 3.6 1AV-40
Solarthermie-System (STAC)	Technologie Kälte	-	Absorption	Absorption	Absorption	Absorption
	Hersteller Kälteanlage	-	EAW	EAW	EAW	EAW
	Modell/Typ	-	Wegracal SE50	Wegracal SE50	Wegracal SE50	Wegracal SE30
	Kühlleistung nominal	kWr	45	45	45	20
	Nominaler COP inkl. elektr. Verbrauch	-	0,7	0,7	0,7	0,7
	Kaltwasser VL/RL	°C	10,5/	10,5/	10,5/	10/
	Kühlwasser VL/RL	°C	27/	27/	27/	29/
	Heisswasser VL/RL	°C	86/	86/	86/	90/
	Technologie Kollektoren	-	Vakuümrohre	Vakuümrohre	Vakuümrohre	Vakuümrohre
	Wärmeträger Kollektoren	-	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser
	Hersteller Kollektoren	-	WIKORA	WIKORA	WIKORA	WIKORA
	Modell/Typ Kollektoren	-	WIKOSUN HP70-24	WIKOSUN HP70-24	WIKOSUN HP70-24	WIKOSUN HP70-24
	Installierte Aperturfläche	m ²	85	85	85	85

Die sich daraus ergebenden Investitions- und Installationskosten sind in Anhang 8.3.3 detailliert aufgeführt.

5.4.4 Wohnanlage

Als Ergänzung zu den Einzelgebäuden wird beispielhaft eine Wohnanlage simuliert, welche aus 50 Reihenhäusern und 50 Mehrfamilienhäusern besteht. Im Gegensatz zu den Einzelgebäuden ist man somit nicht mehr zwingend durch die zur Verfügung stehende Dachfläche beschränkt, da eine solarthermische oder photovoltaische Anlage nun auch auf einer Freifläche aufgestellt und somit im Verhältnis zur gekühlten Fläche auch größer dimensioniert werden kann. Weiterhin können auch größere Kälteanlagen verwendet werden, was wiederum Auswirkungen auf die spezifischen Kosten hat. Die Untersuchung wird ebenfalls für die vier Standorte Mexicali, Hermosillo, Monterrey und Cancún durchgeführt und deckt somit drei der heißen Klimazonen Mexikos ab (trocken heiß, semiarid-heiß, feucht-heiß).

Die Berechnung der Kenngrößen für die Wohnanlage stützt sich auf die Annahme, dass 50 Reihenhäuser und 50 Mehrfamilienhäuser eine Einheit bilden, welche von einer oder mehreren Anlagen zum solaren Kühlen versorgt werden. Damit ergibt sich eine Gesamtanzahl von 450 Wohneinheiten mit einer zu kühlenden Gesamtfläche von 19.500 m², siehe auch Tabelle 7. Eine Zusammensetzung der jeweiligen Gebäudetypologien auf Quartiersebene könnte wie in Abbildung 38 dargestellt aussehen. Dabei sind die Anzahl der unterschiedlichen Gebäudetypen und die Größe der Wohnfläche entscheidend für die Dimensionierung und Verknüpfung von Gebäuden an ein zentrales Kältenetz, welches über solare Kühlung versorgt wird. Alternativ dazu können die Gebäude auch dezentral separat versorgt werden. Nachfolgend wird auf beide Fälle eingegangen.



Abbildung 38: Auszug aus Quartiersplanung San Marcos, Beispiel Siedlungsebene [3].

5.4.4.1 Zentrale Versorgung mit Kaltwassernetz

In dieser Variante gibt es eine Kälteanlage (sog. Kaltwassersatz), welche entweder solarthermisch oder solarelektrisch angetrieben wird. Die jeweilige Solarfläche befindet sich ebenerdig als Freifläche innerhalb des Siedlungsgebiets. Ein unterirdisch verlegtes Kaltwassernetz versorgt die Wohneinheiten mit Klimakaltwasser, Abbildung 39. Innerhalb der Wohnungen werden Gebläsekühler (sog. fan coils) verwendet, um die Wärmeenergie des Gebäudes ans Kaltwassernetz abzuführen. Im solarthermischen Fall sorgt ein Gasbrenner für Backup-Antriebswärme der Absorptionskälteanlage, falls die Solarenergie nicht zur Deckung der Kühllast ausreicht. In der solarelektrischen Variante wird in diesem Fall zusätzlicher Strom aus dem Netz bezogen. Im Szenario „Referenz“ fällt das Solarfeld weg und der Kaltwassersatz wird rein elektrisch mit Netzstrom betrieben.

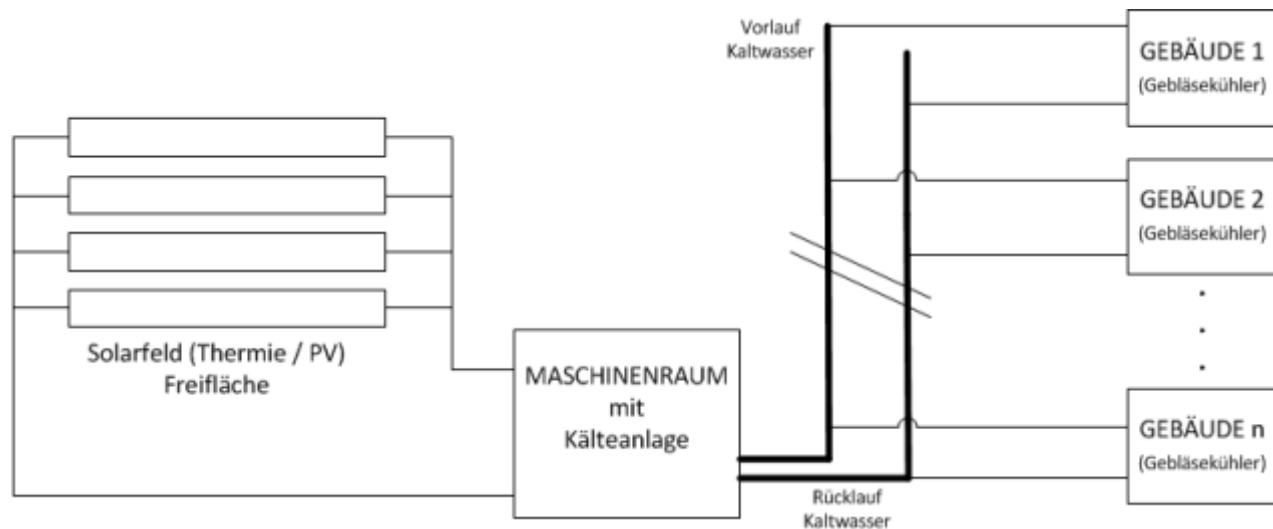


Abbildung 39: Schema einer zentralen Versorgung der Wohnanlage mit Kaltwassernetz

Für die einzelnen Standorte wurde die Auslegung der Solarfläche bzw. der Kälteanlage anhand der maximalen benötigten Kälteleistung der Wohnanlage durchgeführt. Das Solarfeld ist also in der Lage, die Kühllast im Maximalfall abzudecken. Es wurden folgende Auslegungen angenommen, Tabelle 13.

Tabelle 13. Technische Auslegung für: Wohnanlage mit Kaltwassernetz

WOHN-ANLAGE mit KW-Netz	Standort	-	Mexicali		Hermosillo		Monterrey		Cancun	
	zu kühlende Fläche Gebäude	m2	19500		19500		19500		19500	
	Kühllast Gebäude	kWr	2635		2635		2635		1215	
Referenzanlage, reiner Netzbetrieb (REF)	Technologie Kälte	-	Turbo Wassergekühlt		Turbo Wassergekühlt		Turbo Wassergekühlt		Turbo Wassergekühlt	
	Hersteller Kälteanlage	-	Daikin		Daikin		Daikin		Daikin	
	Modell/Typ	-	DWSC113MBE83G		DWSC113MBE83G		DWSC113MBE83G		DWSC087MAU57G	
	Anzahl Splitgeräte/Kreise	-	-		-		-		-	
	Nominale Kühlleistung	kWr	2910		2910		2910		1454	
Photovoltaik-System (PVAC)	Technologie Kälte	-	Turbo Wassergekühlt		Turbo Wassergekühlt		Turbo Wassergekühlt		Turbo Wassergekühlt	
	Hersteller Kälteanlage	-	Daikin		Daikin		Daikin		Daikin	
	Modell/Typ	-	DWSC113MBE83G		DWSC113MBE83G		DWSC113MBE83G		DWSC087MAU57G	
	Kühlleistung	kWr	2910		2910		2910		1454	
	Technologie PV	-	Monokristallin		Monokristallin		Monokristallin		Monokristallin	
	Hersteller PV-Module	-	SunSolar Energy Ltd		SunSolar Energy Ltd		SunSolar Energy Ltd		SunSolar Energy Ltd	
	Modell/Typ PV-Module	-	MONO SS 255		MONO SS 255		MONO SS 255		MONO SS 255	
Peakleistung PV	kWp	1163		1163		1163		582		
Solarthermie-System (STAC)	Unterteilung nach Effizienz	-	LoEff	HiEff	LoEff	HiEff	LoEff	HiEff	LoEff	HiEff
	Technologie Kälte	-	Absorption	Absorption	Absorption	Absorption	Absorption	Absorption	Absorption	Absorption
	Hersteller Kälteanlage	-	Shuangliang	BROAD	Shuangliang	BROAD	Shuangliang	BROAD	Shuangliang	BROAD
	Modell/Typ	-	827H2 Double Stage	BH 250 Double Effect	827H2 Double Stage	BH 250 Double Effect	827H2 Double Stage	BH 250 Double Effect	413H2 Double Stage	BH 125 Double Effect
	Kühlleistung nominal	kWr	2910	2908	2910	2908	2910	2908	1450	1454
	Nominaler elektr. COP	-	0,77	1,39	0,77	1,39	0,77	1,39	0,77	1,39
	Kaltwasser VL/RL	°C	7/12	7/12	7/12	7/12	7/12	7/12	7/12	7/12
	Kühlwasser VL/RL	°C	32/38	30/37	32/38	30/37	32/38	30/37	32/38	30/37
	Heisswasser VL/RL	°C	130/68	170/155	130/68	170/155	130/68	170/155	130/68	170/155
	Technologie Kollektoren	-	Vakuümrohre	Parabolrinne	Vakuümrohre	Parabolrinne	Vakuümrohre	Parabolrinne	Vakuümrohre	Parabolrinne
	Wärmeträger Kollektoren	-	Wasser	Thermoöl	Wasser	Thermoöl	Wasser	Thermoöl	Wasser	Thermoöl
	Hersteller Kollektoren	-	WIKORA	Soltigua	WIKORA	Soltigua	WIKORA	Soltigua	WIKORA	Soltigua
	Modell/Typ Kollektoren	-	WIKOSUN HP70-24	PTMx	WIKOSUN HP70-24	PTMx	WIKOSUN HP70-24	PTMx	WIKOSUN HP70-24	PTMx
Installierte Aperturfläche	m2	7332	5650	7332	5650	7332	6785	3666	3488	

Wie in Tabelle 13 zu sehen, wurden jeweils zwei Varianten für die solarthermische Option berechnet – eine Variante mit konzentrierenden Parabolrinnenkollektoren (im folgenden mit „HiEff“ abgekürzt) und eine Variante mit nicht-konzentrierenden Vakuumröhrenkollektoren (im folgenden mit „LoEff“ abgekürzt). Dies erfolgt aufgrund der Tatsache, dass an einigen Standorten (z.B. Cancún) der Direktstrahlungsanteil nicht besonders hoch ist. Parabolrinnenkollektoren benötigen aufgrund der verwendeten Spiegel jedoch einen hohen Direktstrahlungsanteil, ansonsten sinkt die Wirtschaftlichkeit. Sie erlauben im Gegenzug jedoch die Verwendung von Absorptionskälteanlagen mit höherer Effizienz, dadurch sinkt die benötigte Kollektorfläche und somit die Kosten.

Eine detaillierte Übersicht der Kosten der Wohnanlage mit Kaltwassernetz für die einzelnen Standorte findet sich in Anhang 8.3.4.

5.4.4.2 Zentrale Versorgung ohne Kaltwassernetz

Die solarthermisch angetriebene Kälteanlage benötigt das unterirdische Kaltwassernetz, da der Wärmeträger in diesem Fall Wasser ist. In der solarelektrischen zentralen Versorgungsvariante ist das Kaltwassernetz nicht zwingend notwendig, da in diesem Fall auch die solar erzeugte elektrische Energie per Kabel in die Gebäude transportiert werden kann. Dort können dann einzelne Split- bzw. VRF-Klimageräte für die Kühlung sorgen. Diese Variante wird im Folgenden separat dargestellt, (siehe Abbildung 40). Überschüssiger Photovoltaik-Strom wird ins Stromnetz eingespeist bzw. zusätzlicher benötigter Strom aus dem Netz bezogen. Im Referenzfall fällt das PV-Feld weg und jedes Gebäude wird separat versorgt wie in Kap. 5.4.2 und 5.4.3 beschrieben.

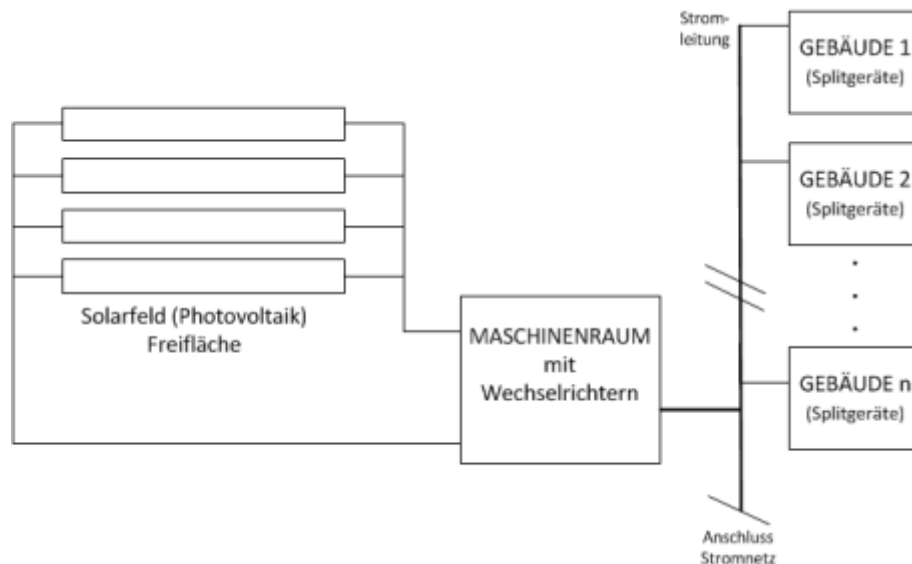


Abbildung 40: Schema einer zentralen Versorgung der Wohnanlage mit Photovoltaik-Anlage und Eigenverbrauch für Klimatisierung

Für die einzelnen Standorte wurde die Auslegung der Solarfläche ebenfalls anhand der maximalen Kälteleistung der Wohnanlage durchgeführt. Das Solarfeld ist also auch in dieser Variante in der Lage, die Kühllast im Maximalfall abzudecken. Die Kühllast ergibt sich in diesem Fall aus der Summe der Leistungen der einzelnen Split- und VRF-Geräte (siehe Kapitel 5.4.2 und 5.4.3.) Es wurde folgende Auslegung

angenommen (siehe Tabelle 14). Eine detaillierte Übersicht der Kosten der Wohnanlage ohne Kaltwassernetz für die einzelnen Standorte findet sich in Anhang 8.3.5.

Tabelle 14: Technische Auslegung für: Wohnanlage ohne Kaltwassernetz – nur Photovoltaik-Option

WOHN-ANLAGE ohne KW-Netz	Standort	-	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
	zu kühlende Fläche Gebäude	m2		19500	19500	19500
Kühllast Gebäude	kWr		2635	2635	2635	1215
Referenzanlage, reiner Netzbetrieb (REF)	Technologie Kälte	-	50x Splitgerät Reihenhaus 50x VRF-Gerät Mehrfamilienhaus	50x Splitgerät Reihenhaus 50x VRF-Gerät Mehrfamilienhaus	50x Splitgerät Reihenhaus 50x VRF-Gerät Mehrfamilienhaus	50x Splitgerät Reihenhaus 50x VRF-Gerät Mehrfamilienhaus
	Hersteller Kälteanlage	-	Siehe Kap. 5.4.2 und 5.4.3	Siehe Kap. 5.4.2 und 5.4.3	Siehe Kap. 5.4.2 und 5.4.3	Siehe Kap. 5.4.2 und 5.4.3
	Modell/Typ	-				
	Anzahl Splitgeräte/Kreise	-				
	Nominale Kühlleistung	kWr	2855	2855	2855	1750
PhotovoltaikSystem (PVAC)	Technologie Kälte	-	Siehe Kap. 5.4.2 und 5.4.3	Siehe Kap. 5.4.2 und 5.4.3	Siehe Kap. 5.4.2 und 5.4.3	Siehe Kap. 5.4.2 und 5.4.3
	Hersteller Kälteanlage	-				
	Modell/Typ	-				
	Kühlleistung	kWr	2855	2855	2855	1750
	Technologie PV	-	Monokristallin	Monokristallin	Monokristallin	Monokristallin
	Hersteller PV-Module	-	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd	SunSolar Energy Ltd
	Modell/Typ PV-Module	-	MONO SS 255	MONO SS 255	MONO SS 255	MONO SS 255
	Peakleistung PV	kWp	1142	1142	1142	700

5.4.4.3 Dezentrale Versorgung mit Dachanlagen

Für die Klimatisierung der Gebäude der Wohnanlage besteht auch die Option, auf jedem einzelnen Gebäude eine separate Anlage zur individuellen solaren Kühlung zu installieren. Damit ergibt sich je Gebäude die Auslegung für die Gebäudetypologien Reihenhaus (siehe Kap. 5.4.2) und Mehrfamilienhaus (siehe Kap. 5.4.3) in je 50-facher Ausführung. Die technische Auslegung der Anlagen bleibt in diesem Fall gleich, auch die spezifischen Erträge verändern sich nicht. Es ist anzunehmen, dass bei der Abnahme von je 50 Anlagen die Anschaffungskosten im Vergleich zu einer Einzelanschaffung aufgrund von Rabatten sinken werden. Dies wurde in dieser Studie jedoch nicht separat berechnet.

Auch ist davon auszugehen, dass überschüssiger Strom aus PV-Anlagen in einem Verbund aus 100 Einzelanlagen besser quergenutzt werden kann. Der Überschussstrom der Reihenhäuser würde von den Verbrauchern der Mehrfamilienhäuser sicherlich zu einem großen bis sehr großen Teil abgenommen. Damit würde der Strombezug der Wohnanlage aus dem Netz insgesamt sinken. Dies würde sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Die Berechnung dieser Option war jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

5.5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Simulationsrechnungen dargestellt.

5.5.1 Einfamilienhaus

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung für das Einfamilienhaus sind in den Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt. Die Ergebnisse als Zahlenwerte sind in den Tabelle 15 und Tabelle 16 aufgeführt.

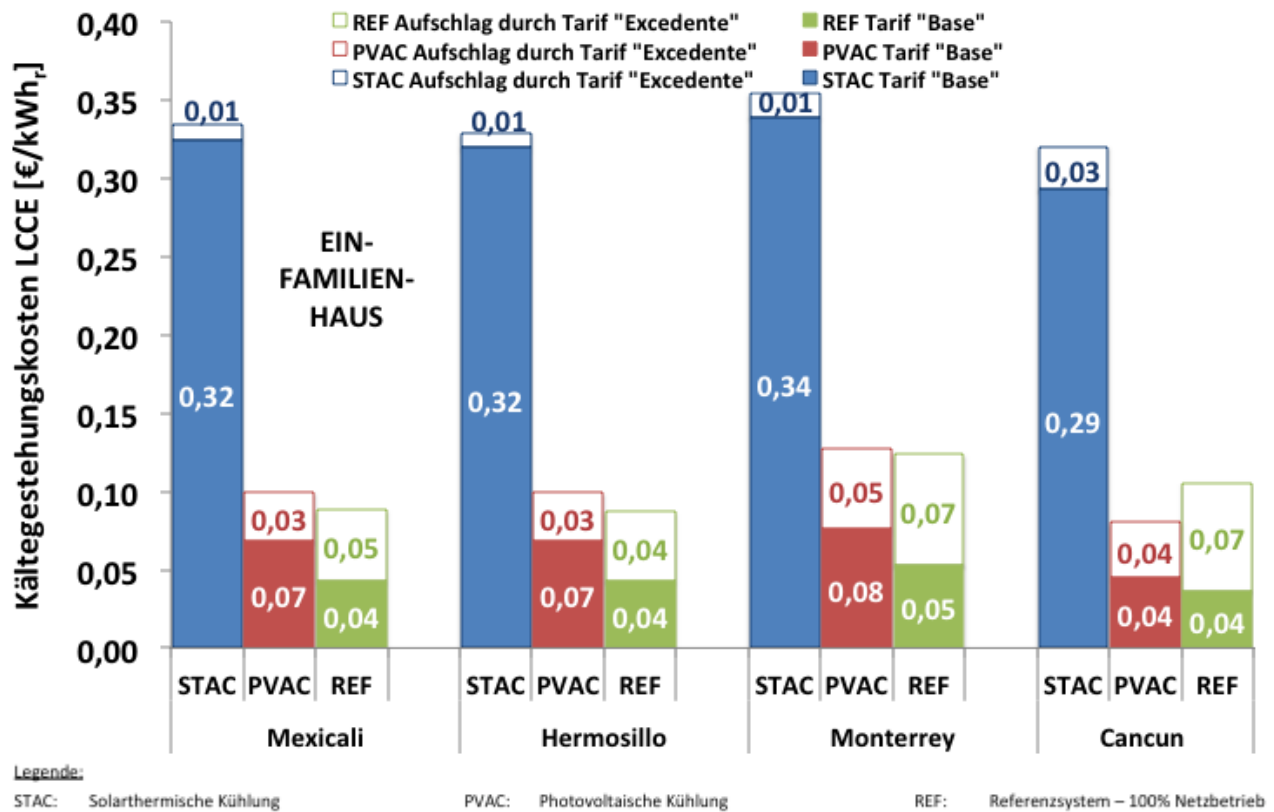


Abbildung 41: Kältegestehungskosten (LCCE) für Einfamilienhaus

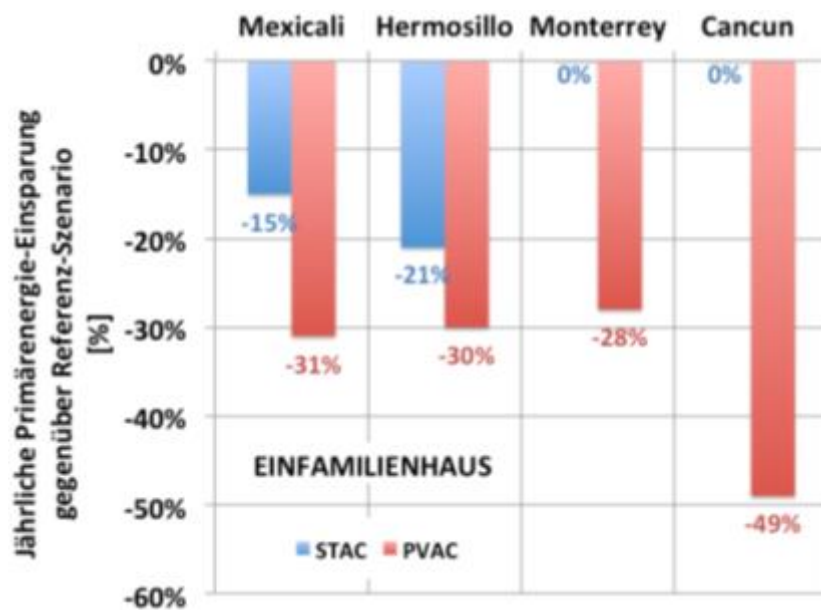
Tarif Base:

Aus Abbildung 41 und Tabelle 15 wird ersichtlich, dass beide Optionen zur solaren Kühlung eines Reihenhauses in allen Klimazonen und an allen Standorten im Tarif „Base“ keine wirtschaftliche Lösung darstellen, da die Kältegestehungskosten in jedem Fall höher sind als im Szenario Referenz. Die Amortisationszeiten sind in jeder Variante größer als 20 Jahre.

Tarif Excedente:

Legt man den teureren Tarif „Excedente“ zugrunde (Tabelle 16), so ergeben sich geringere Kältegestehungskosten der photovoltaischen Option am Standort Cancún und eine Amortisationszeit von 7 Jahren. Am Standort Monterrey sind die Kältegestehungskosten der photovoltaischen Option und der Referenz nahezu gleich; es ergibt sich eine Amortisationszeit von 18 Jahren. An den Standorten Mexicali und Hermosillo ergibt sich keine wirtschaftliche Lösung für die photovoltaische Option. Die solarthermische Option ist auch im Tarif „Excedente“ an keinem Standort wirtschaftlich.

Die mögliche Primärenergieeinsparung solarer Kühlung gegenüber dem Referenz-Szenario (100 % Netzbetrieb) beträgt bis zu 31 % in der Klimazone „Extrem heiß und trocken“ (Mexicali) und bis zu 49 % am Standort Cancún, Abbildung 42. Dabei ist die Einsparung der photovoltaischen Option PVAC jeweils größer als die der solarthermischen Option STAC. In Monterrey und Cancún ist die Einsparung der STAC-Option Null aufgrund des hohen zusätzlichen Gasverbrauchs an Tagen ohne ausreichende Sonneneinstrahlung.



Legende:

STAC: Solarthermische Kühlung

PVAC: Photovoltaische Kühlung

REF: Referenzsystem – 100% Netzbetrieb

Abbildung 42: Primärenergie-Einsparpotential gegenüber Referenz-Szenario für Einfamilienhaus

Tabelle 15: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Einfamilienhaus – Tarif „Base“

Einfamilien-haus Tarif „Base“	Standort	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
Auslegungs- parameter	Kühlbedarf Gebäude (kW _r)	8,4	8,4	8,4	4
	Leistung Kälteanlage (kW _r)	9,5	9,5	9,5	5
Solarer Deckungsgrad (%)	STAC	74%	77%	66%	39%
	PVAC	36%	41%	27%	23%
Investitions- kosten inkl. Installation (€)	STAC	82.114 €	82.114 €	82.114 €	71.035 €
	PVAC	11.428 €	11.428 €	11.428 €	9.928 €
	REF	3.290 €	3.290 €	3.290 €	1.790 €
Betriebskosten in Jahr 1 (€/a)	STAC	860 €	792 €	1.050 €	2.489 €
	PVAC	133 €	133 €	219 €	216 €
	REF	193 €	190 €	304 €	423 €
Amortisations-zeit (Jahre)	STAC	> 20	> 20	> 20	> 20
	PVAC	> 20	> 20	> 20	> 20
Kapitalwert (€)	STAC	-100.078 €	-98.728 €	-103.939 €	-121.759 €
	PVAC	-19.695 €	-19.680 €	-21.735 €	-18.237 €
	REF	-11.591 €	-11.525 €	-14.231 €	-13.623 €
LCCE (€/kWh _{el})	STAC	0,325	0,319	0,339	0,293
	PVAC	0,068	0,068	0,076	0,045
	REF	0,043	0,043	0,053	0,037
Primärenergie- Einsparung gegenüber Referenz pro Jahr	STAC (MWh/a)	2,5	3,7	0,0	0,0
	PVAC (MWh/a)	5,4	5,3	4,9	12,1
	STAC (%)	15%	21%	0%	0%
	PVAC (%)	31%	30%	28%	49%

Tabelle 16: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Einfamilienhaus – Tarif „Excedente“⁴

Einfamilienhaus Tarif „Excedente“	Standort	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
Auslegungs- parameter	Kühlbedarf Gebäude (kW _c)	8,4	8,4	8,4	4
	Leistung Kälteanlage (kW _c)	9,5	9,5	9,5	5
Solarer Deckungsgrad (%)	STAC	74%	77%	66%	39%
	PVAC	36%	41%	27%	23%
Investitions-kosten inkl. Installation (€)	STAC	82.114 €	82.114 €	82.114 €	71.035 €
	PVAC	11.428 €	11.428 €	11.428 €	9.928 €
	REF	3.290 €	3.290 €	3.290 €	1.790 €
Betriebskosten in Jahr 1 (€/a)	STAC	964 €	894 €	1.213 €	2.918 €
	PVAC	476 €	473 €	778 €	765 €
	REF	690 €	679 €	1.079 €	1.496 €
Amortisationszeit (Jahre)	STAC	> 20	> 20	> 20	> 20
	PVAC	> 20	> 20	18	7
Kapitalwert (€)	STAC	-102.561 €	-101.168 €	-107.810 €	-131.937 €
	PVAC	-27.837 €	-27.762 €	-34.985 €	-31.250 €
	REF	-23.384 €	-23.116 €	-32.618 €	-39.067 €
LCCE (€/kWh _{el})	STAC	0,33	0,33	0,35	0,32
	PVAC	0,10	0,10	0,13	0,08
	REF	0,09	0,09	0,12	0,11
Primärenergie- Einsparung gegenüber Referenz pro Jahr	STAC (MWh/a)	2,5	3,7	0,0	0,0
	PVAC (MWh/a)	5,4	5,3	4,9	12,1
	STAC (%)	15%	21%	0%	0%
	PVAC (%)	31%	30%	28%	49%

⁴ Änderungen zu Ergebnissen im Tarif „Base“ sind **fett und kursiv** markiert.

5.5.2 Reihenhaus

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung für das Reihenhaus sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 dargestellt. Die Ergebnisse als Zahlenwerte sind in Tabelle 17 und Tabelle 18 aufgeführt.

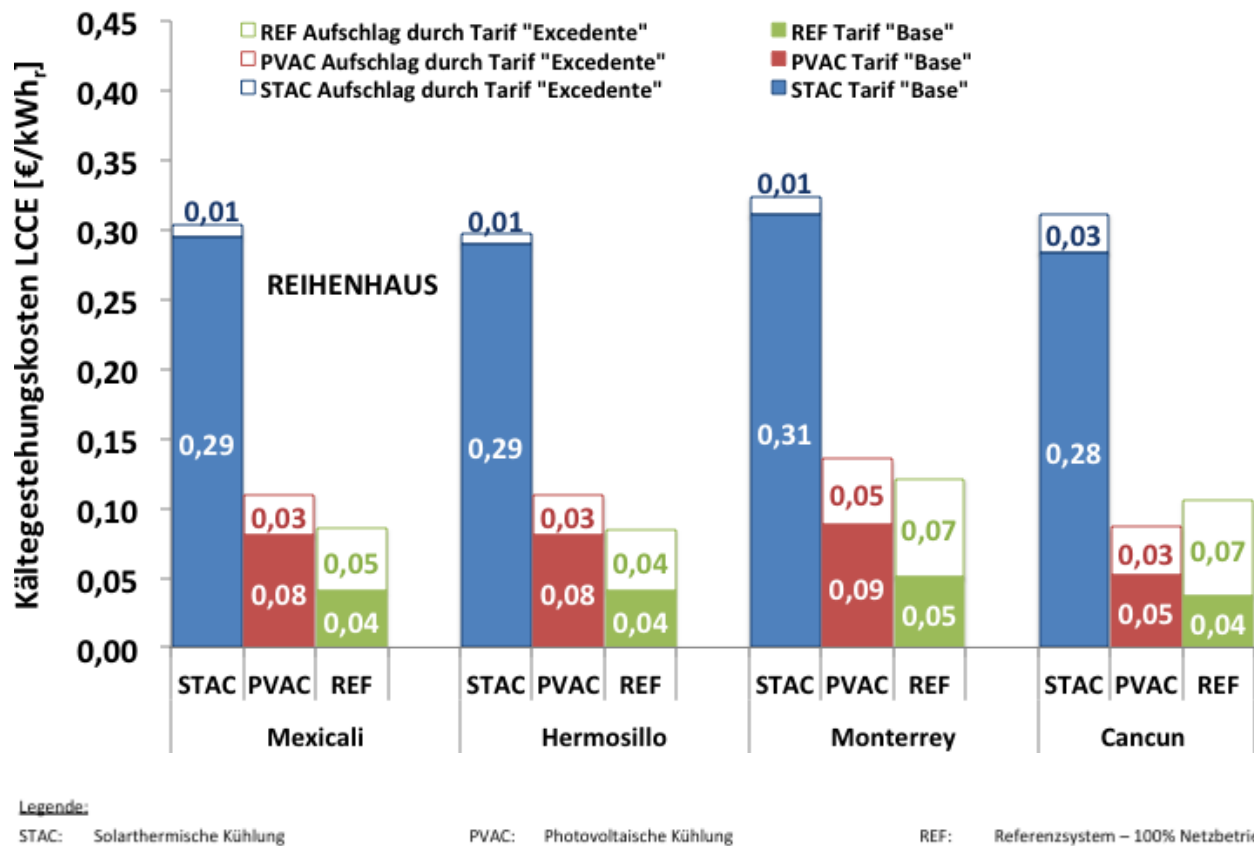


Abbildung 43: Kältegestehungskosten (LCCE) für Reihenhaus

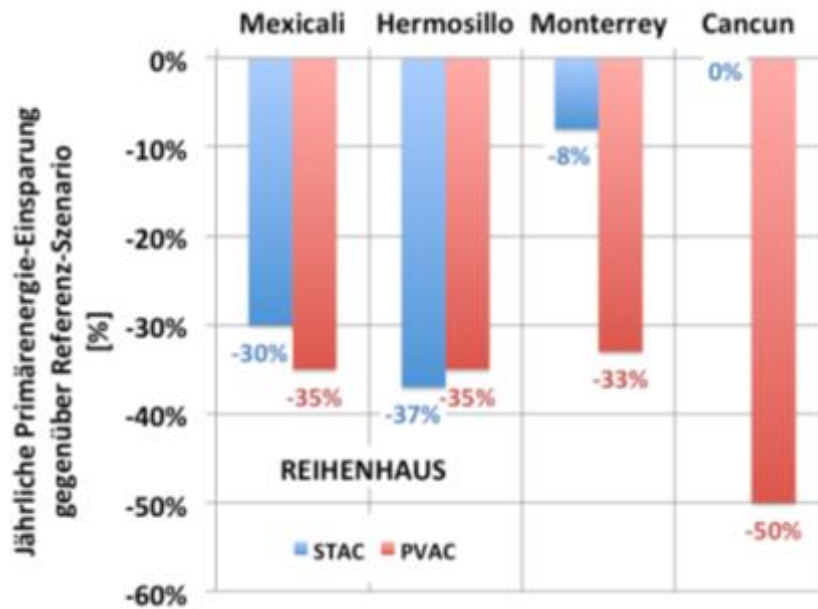
Tarif Base:

Aus Abbildung 43 und Tabelle 17 wird ersichtlich, dass beide Optionen zur solaren Kühlung eines Reihenhauses in allen Klimazonen und an allen Standorten im Tarif Base keine wirtschaftliche Lösung darstellen, da die Kältegestehungskosten in jedem Fall höher sind als im Szenario Referenz. Die Amortisationszeiten sind in jeder Variante größer als 20 Jahre.

Tarif Excedente:

Legt man den teureren Tarif „Excedente“ zugrunde, Tabelle 18, so ergeben sich geringere Kältegestehungskosten der photovoltaischen Option am Standort Cancun und eine Amortisationszeit von 10 Jahren. An allen anderen Standorten ergibt sich keine wirtschaftliche Lösung für die photovoltaische Option. Die solarthermische Option ist auch im Tarif „Excedente“ an keinem Standort wirtschaftlich.

Die mögliche Primärenergieeinsparung solarer Kühlung im Reihenhaus gegenüber dem Referenz-Szenario (100 % Netzbetrieb) beträgt bis zu 37 % in der Klimazone „Extrem heiß und trocken“ (Mexicali) und bis zu 50 % am Standort Cancún, Abbildung 44. Dabei ist die Einsparung der photovoltaischen Option PVAC an den Standorten Mexicali und Monterrey größer als die der solarthermischen Option STAC, in Hermosillo ist es umgekehrt. In Cancún ist die Einsparung der STAC-Option Null aufgrund des hohen zusätzlichen Gasverbrauchs an Tagen ohne ausreichende Sonneneinstrahlung.



Legende:

STAC: Solarthermische Kühlung

PVAC: Photovoltaische Kühlung

REF: Referenzsystem – 100% Netzbetrieb

Abbildung 44: Primärenergie-Einsparpotential gegenüber Referenz-Szenario für Reihenhaus

Tabelle 17. Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Reihenhaus – Tarif „Base“

Reihenhaus Tarif „Base“	Standort	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
Auslegungs- parameter	Kühlbedarf Gebäude (kW _c)	10,8	10,8	10,8	5,2
	Leistung Kälteanlage (kW _c)	11	11	11	5
Solarer Deckungsgrad (%)	STAC	79%	82%	70%	37%
	PVAC	97%	104%	84%	49%
Investitions-kosten inkl. Installation (€)	STAC	96.066 €	96.066 €	96.066 €	95.093 €
	PVAC	19.061 €	19.061 €	19.061 €	17.961 €
	REF	3.690 €	3.690 €	3.690 €	2.590 €
Betriebskosten in Jahr 1 (€/a)	STAC	872 €	783 €	1.127 €	3.589 €
	PVAC	156 €	155 €	256 €	301 €
	REF	242 €	238 €	381 €	603 €
Amortisationszeit (Jahre)	STAC	> 20	> 20	> 20	> 20
	PVAC	> 20	> 20	> 20	> 20
Kapitalwert (€)	STAC	-114.277 €	-112.512 €	-119.436 €	-167.855 €
	PVAC	-29.613 €	-29.599 €	-31.985 €	-30.536 €
	REF	-13.656 €	-13.574 €	-16.958 €	-19.723 €
LCCE (€/kWh _{el})	STAC	0,29	0,29	0,31	0,28
	PVAC	0,08	0,08	0,09	0,05
	REF	0,04	0,04	0,05	0,04
Primärenergie- Einsparung gegenüber Referenz pro Jahr	STAC (MWh/a)	6,5	8,0	1,7	0,0
	PVAC (MWh/a)	7,7	7,6	7,2	17,6
	STAC (%)	30%	37%	8%	0%
	PVAC (%)	35%	35%	33%	50%

Tabelle 18: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Reihenhaus – Tarif „Excedente“⁵

Reihenhaus Tarif „Excedente“	Standort	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
Auslegungs- parameter	Kühlbedarf Gebäude (kW _e)	10,8	10,8	10,8	5,2
	Leistung Kälteanlage (kW _e)	11	11	11	5
Solarer Deckungsgrad (%)	STAC	79%	82%	70%	37%
	PVAC	97%	104%	84%	49%
Investitions-kosten inkl. Installation (€)	STAC	96.066 €	96.066 €	96.066 €	95.093 €
	PVAC	19.061 €	19.061 €	19.061 €	17.961 €
	REF	3.690 €	3.690 €	3.690 €	2.590 €
Betriebskosten in Jahr 1 (€/a)	STAC	985 €	894 €	1.304 €	4.200 €
	PVAC	558 €	554 €	908 €	1.063 €
	REF	863 €	849 €	1.350 €	2.131 €
Amortisationszeit (Jahre)	STAC	> 20	> 20	> 20	> 20
	PVAC	> 20	> 20	> 20	10
Kapitalwert (€)	STAC	-116.959 €	-115.148 €	-123.618 €	-182.361 €
	PVAC	-39.143 €	-39.066 €	-47.454 €	-48.628 €
	REF	-28.409 €	-28.073 €	-39.961 €	-55.985 €
LCCE (€/kWh _e)	STAC	0,30	0,30	0,32	0,31
	PVAC	0,11	0,11	0,14	0,09
	REF	0,09	0,08	0,12	0,11
Primärenergie- Einsparung gegenüber Referenz pro Jahr	STAC (MWh/a)	6,5	8,0	1,7	0,0
	PVAC (MWh/a)	7,7	7,6	7,2	17,6
	STAC (%)	30%	37%	8%	0%
	PVAC (%)	35%	35%	33%	50%

⁵ Änderungen zu Ergebnissen im Tarif „Base“ sind **fett und kursiv** markiert.

5.5.3 Mehrfamilienhaus

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung für das Mehrfamilienhaus sind in Abbildung 45 und Abbildung 46 dargestellt. Die Ergebnisse als Zahlenwerte sind in Tabelle 19 und Tabelle 20 aufgeführt.

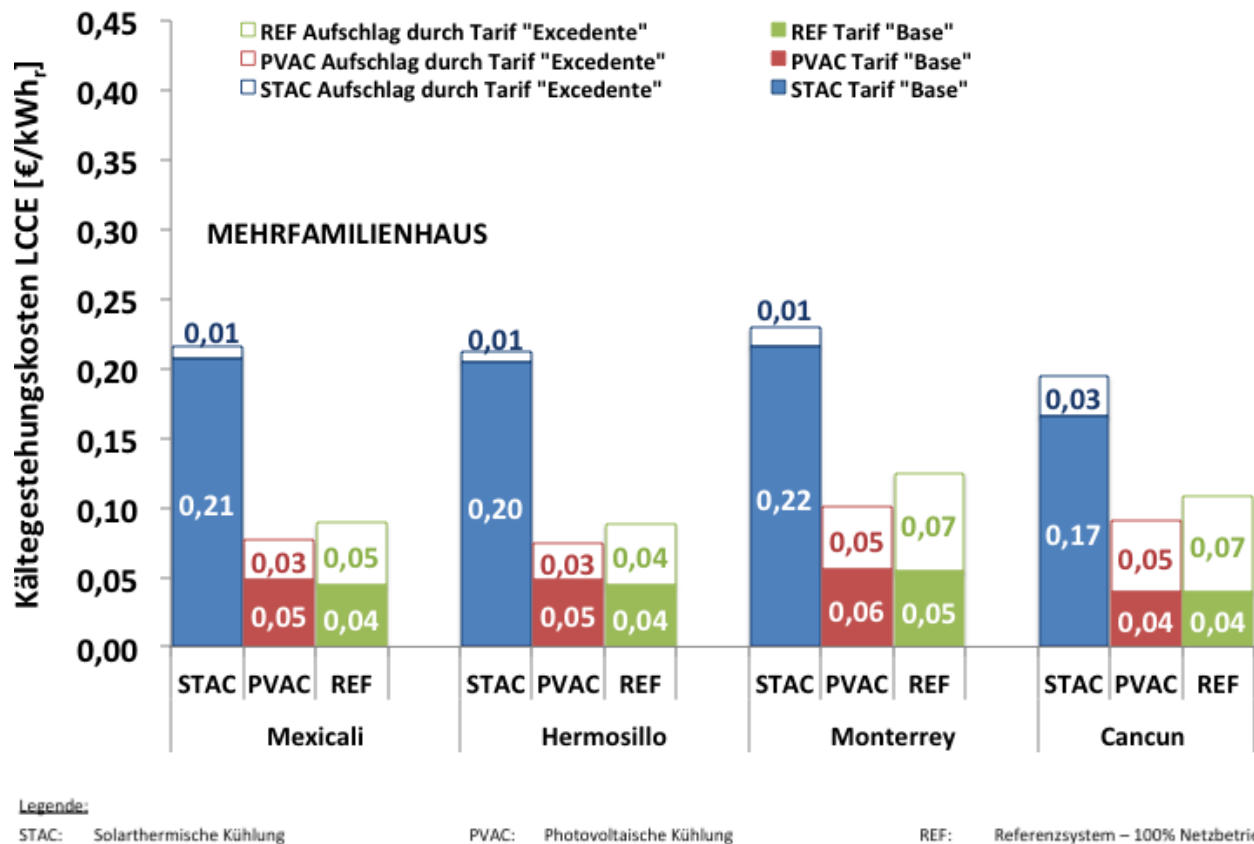


Abbildung 45: Kältegestehungskosten (LCCE) für Mehrfamilienhaus

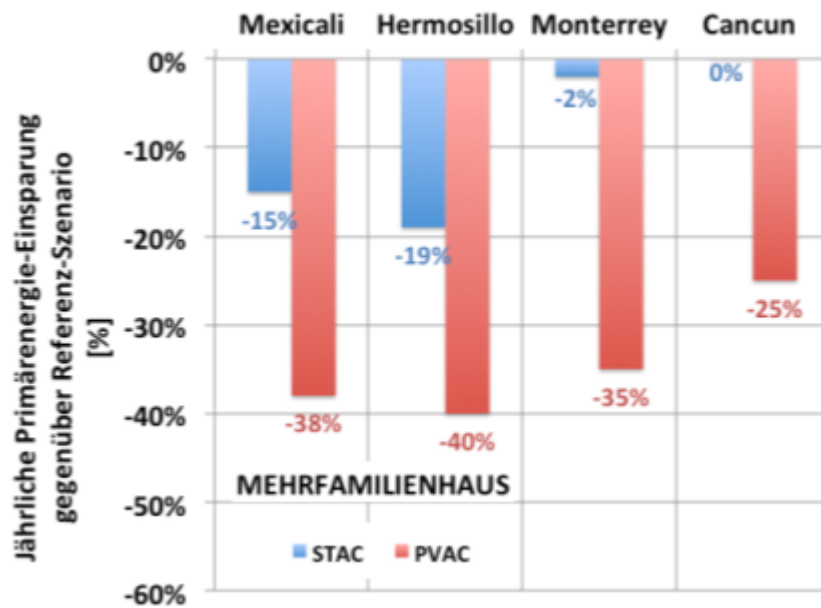
Tarif Base:

Aus Abbildung 45 und Tabelle 19 wird ersichtlich, dass die solarthermische Optionen zur solaren Kühlung eines Mehrfamilienhauses in allen Klimazonen und an allen Standorten im Tarif Base keine wirtschaftliche Lösung darstellt, da die Kältegestehungskosten in jedem Fall höher sind als im Szenario Referenz. Die Amortisationszeiten sind in jeder Variante größer als 20 Jahre. Die photovoltaische Option hat an den Standorten Monterrey und Cancun nahezu gleiche Kältegestehungskosten wie das Szenario Referenz. Es ergeben sich Amortisationszeiten von 18 und 17 Jahren.

Tarif Excedente:

Legt man den teureren Tarif „Excedente“ zugrunde, Tabelle 20, so ergeben sich für alle Standorte geringere Kältegestehungskosten der photovoltaischen Option. Die Amortisationszeiten bewegen sich zwischen 5 und 8 Jahren. Die solarthermische Option ist auch im Tarif „Excedente“ an keinem Standort wirtschaftlich.

Die mögliche Primärenergieeinsparung solarer Kühlung im Mehrfamilienhaus gegenüber dem Referenz-Szenario (100 % Netzbetrieb) beträgt bis zu 40 % in der Klimazone „Extrem heiß und trocken“ (Hermosillo) und bis zu 25 % am Standort Cancún, Abbildung 46. Dabei ist die Einsparung der photovoltaischen Option PVAC an allen Standorten größer als die der solarthermischen Option STAC. In Cancún ist die Einsparung der STAC-Option Null aufgrund des hohen zusätzlichen Gasverbrauchs an Tagen ohne ausreichende Sonneneinstrahlung.



Legende:

STAC: Solarthermische Kühlung

PVAC: Photovoltaische Kühlung

REF: Referenzsystem – 100% Netzbetrieb

Abbildung 46: Primärenergie-Einsparpotential gegenüber Referenz-Szenario für Mehrfamilienhaus

Tabelle 19: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Mehrfamilienhaus – Tarif „Base“

Mehr-familienhaus Tarif „Base“	Standort	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
Auslegungsparameter	Kühlbedarf Gebäude (kW _r)	41,9	41,9	41,9	19,8
	Leistung Kälteanlage (kW _r)	45	45	45	20
Solarer Deckungsgrad (%)	STAC	63%	65%	56%	37%
	PVAC	38%	40%	35%	25%
Investitionskosten inkl. Installation (€)	STAC	288.898 €	288.898 €	288.898 €	201.667 €
	PVAC	39.411 €	39.411 €	39.411 €	33.051 €
	REF	22.080 €	22.080 €	22.080 €	15.720 €
Betriebskosten in Jahr 1 (€/a)	STAC	4.189 €	3.934 €	4.841 €	11.205 €
	PVAC	808 €	777 €	1.258 €	2.109 €
	REF	1.236 €	1.219 €	1.890 €	2.785 €
Amortisationszeit (Jahre)	STAC	> 20	> 20	> 20	> 20
	PVAC	> 20	> 20	18	17
Kapitalwert (€)	STAC	-373.429 €	-368.366 €	-386.812 €	-428.649 €
	PVAC	-81.091 €	-80.357 €	-91.771 €	-98.772 €
	REF	-70.963 €	-70.578 €	-86.489 €	-94.536 €
LCCE (€/kWh _{el})	STAC	0,21	0,20	0,22	0,17
	PVAC	0,05	0,05	0,06	0,04
	REF	0,04	0,04	0,05	0,04
Primärenergie-Einsparung gegenüber Referenz pro Jahr	STAC (MWh/a)	15,0	19,0	2,2	0,0
	PVAC (MWh/a)	38,7	40,6	36,3	39,5
	STAC (%)	15%	19%	2%	0%
	PVAC (%)	38%	40%	35%	25%

Tabelle 20: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Mehrfamilienhaus – Tarif „Excedente“⁶

Mehr-familien-haus Tarif „Excedente“	Standort	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
Auslegungs- parameter	Kühlbedarf Gebäude (kW _e)	41,9	41,9	41,9	19,8
	Leistung Kälteanlage (kW _e)	45	45	45	20
Solarer Deckungsgrad (%)	STAC	63%	65%	56%	37%
	PVAC	38%	40%	35%	25%
Investitions-kosten inkl. Installation (€)	STAC	288.898 €	288.898 €	288.898 €	201.667 €
	PVAC	39.411 €	39.411 €	39.411 €	33.051 €
	REF	22.080 €	22.080 €	22.080 €	15.720 €
Betriebskosten in Jahr 1 (€/a)	STAC	4.733 €	4.469 €	5.690 €	14.053 €
	PVAC	2.630 €	2.514 €	4.207 €	7.197 €
	REF	4.159 €	4.092 €	6.448 €	9.586 €
Amortisationszeit (Jahre)	STAC	>20	>20	>20	>20
	PVAC	8	7	5	5
Kapitalwert (€)	STAC	-386.339 €	-381.054 €	-406.940 €	-496.227 €
	PVAC	-124.327 €	-121.582 €	-161.737 €	-219.511 €
	REF	-140.328 €	-138.749 €	-194.641 €	-255.915 €
LCCE (€/kWh _e)	STAC	0,22	0,21	0,23	0,19
	PVAC	0,08	0,07	0,10	0,09
	REF	0,09	0,09	0,12	0,11
Primärenergie- Einsparung gegenüber Referenz pro Jahr	STAC (MWh/a)	15,0	19,0	2,2	0,0
	PVAC (MWh/a)	38,7	40,6	36,3	39,5
	STAC (%)	15%	19%	2%	0%
	PVAC (%)	38%	40%	35%	25%

⁶ Änderungen zu Ergebnissen im Tarif „Base“ sind **fett und kursiv** markiert.

5.5.4 Wohnanlage

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung für die Wohnanlage sind in Abbildung 47 bis Abbildung 49 dargestellt. Die Ergebnisse als Zahlenwerte sind in Tabelle 21 bis Tabelle 24 aufgeführt. Eine ausführliche Kostenübersicht der einzelnen Anlagen je Standort findet sich in Anhang 8.3.4 und 8.3.5.

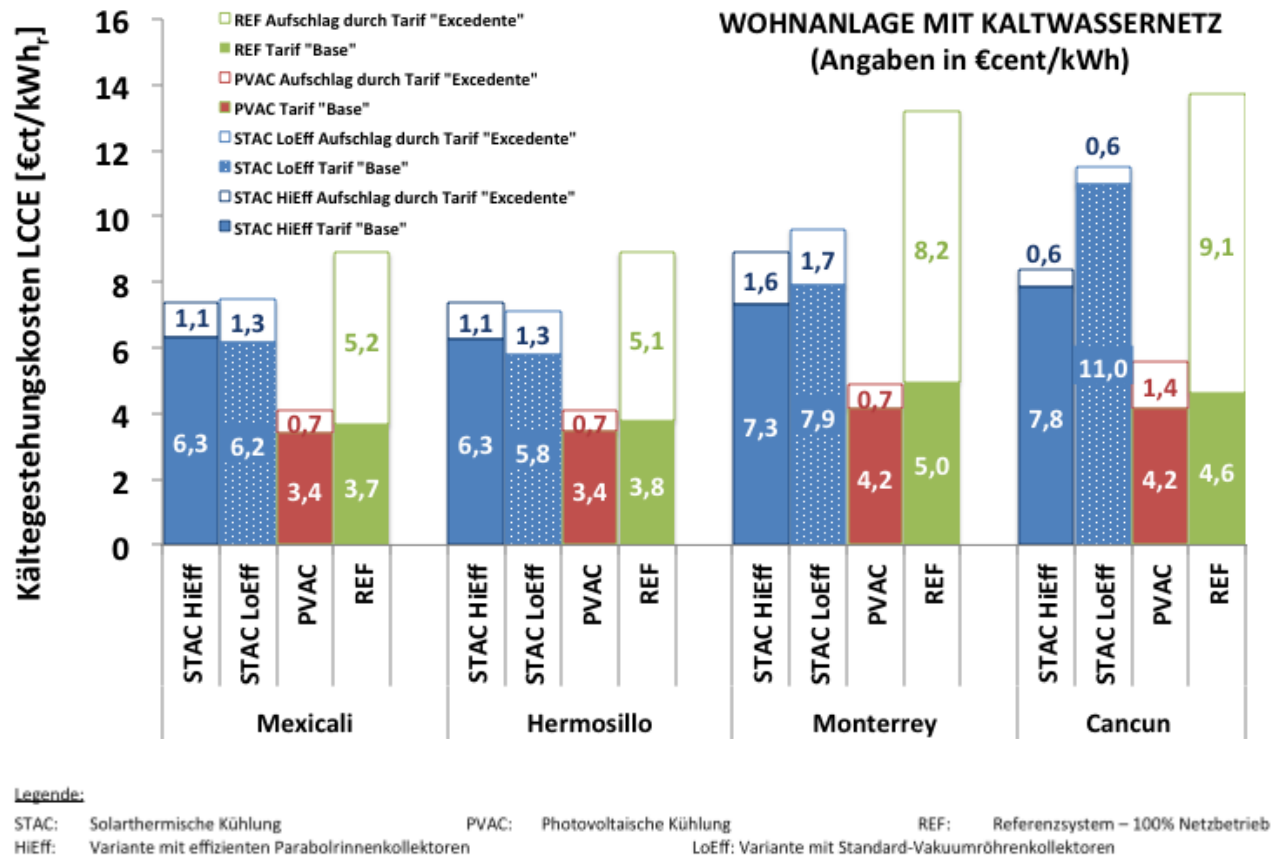


Abbildung 47: Kältegestehungskosten (LCCE) für Wohnanlage mit Kaltwassernetz

Tarif Base:

Aus Abbildung 47 und Tabelle 21 wird ersichtlich, dass die solarthermische Option zur solaren Kühlung der angenommenen Wohnanlage mit Kaltwassernetz in allen Klimazonen und an allen Standorten im Tarif Base keine wirtschaftliche Lösung darstellt, da die Kältegestehungskosten in jedem Fall höher sind als im Szenario Referenz. Die Amortisationszeiten sind in jeder Variante größer als 20 Jahre. Die photovoltaische Option hat jedoch an allen Standorten geringere Kältegestehungskosten als das Szenario Referenz. Er ergeben sich Amortisationszeiten zwischen 8 und 14 Jahren.

Die Variante der Wohnanlage ohne Kaltwassernetz ist in Tabelle 23 und Abbildung 48 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die photovoltaische Option ohne Kaltwassernetz zum einen an jedem Standort geringere Kältegestehungskosten als das Referenz-Szenario hat, zum anderen im Vergleich zur Variante

photovoltaische Option mit Kaltwassernetz (Abbildung 47) ebenfalls insgesamt geringere Kältegestehungskosten hat. Die photovoltaische Variante ohne Kaltwassernetz hat im Tarif Base Amortisationszeiten zwischen 10 und 14 Jahren.

Tarif Excedente:

Legt man für die Option mit Kaltwassernetz den teureren Tarif „Excedente“ zugrunde, Tabelle 22, so ergeben sich für alle Standorte geringere Kältegestehungskosten sowohl der solarthermischen als auch der photovoltaischen Option. Die Amortisationszeiten der solarthermischen Option bewegen sich zwischen 5 und 14 Jahren, die Amortisationszeiten der photovoltaischen Option zwischen 3 und 4 Jahren.

Im Falle der Variante ohne Kaltwassernetz ergeben sich ebenfalls für alle Standorte geringere Kältegestehungskosten im Vergleich zum Referenz-Szenario. Die Amortisationszeiten bewegen sich zwischen 3 und 4 Jahren.

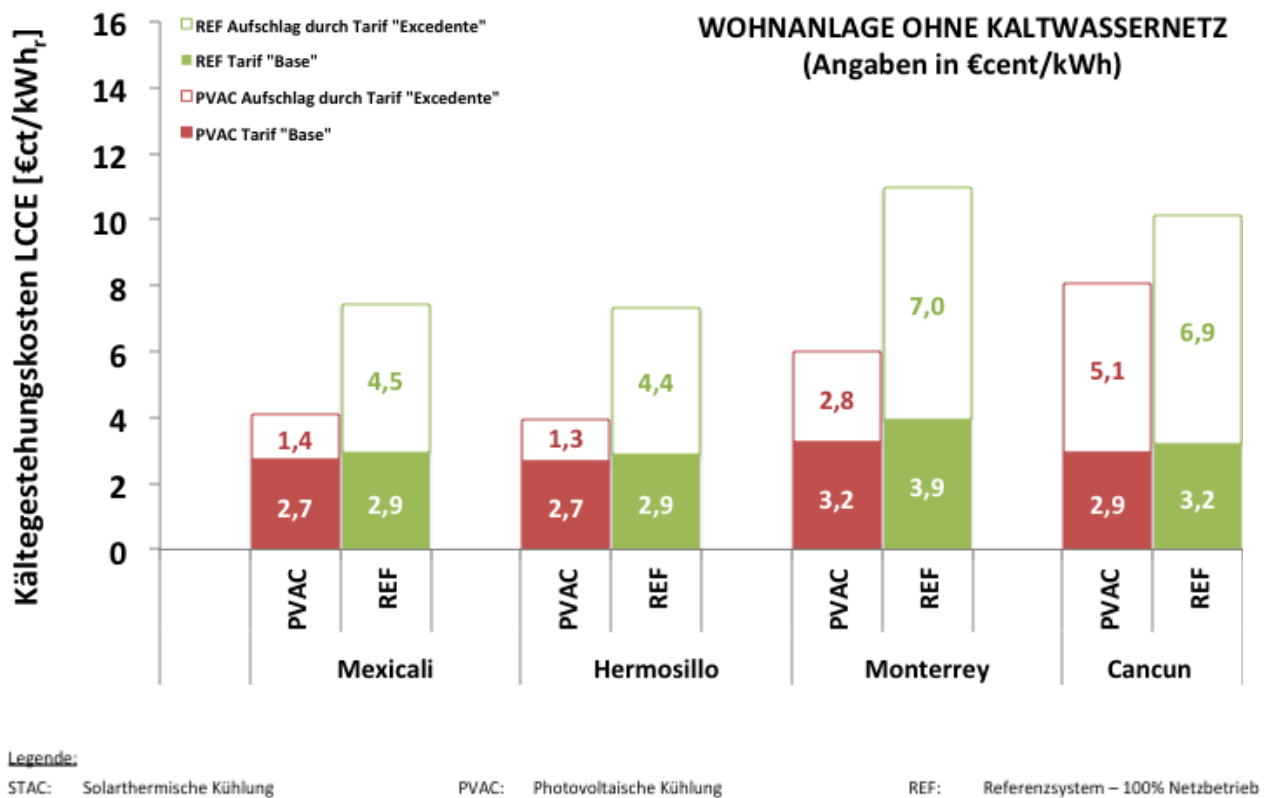


Abbildung 48: Kältegestehungskosten (LCCE) für Wohnanlage ohne Kaltwassernetz

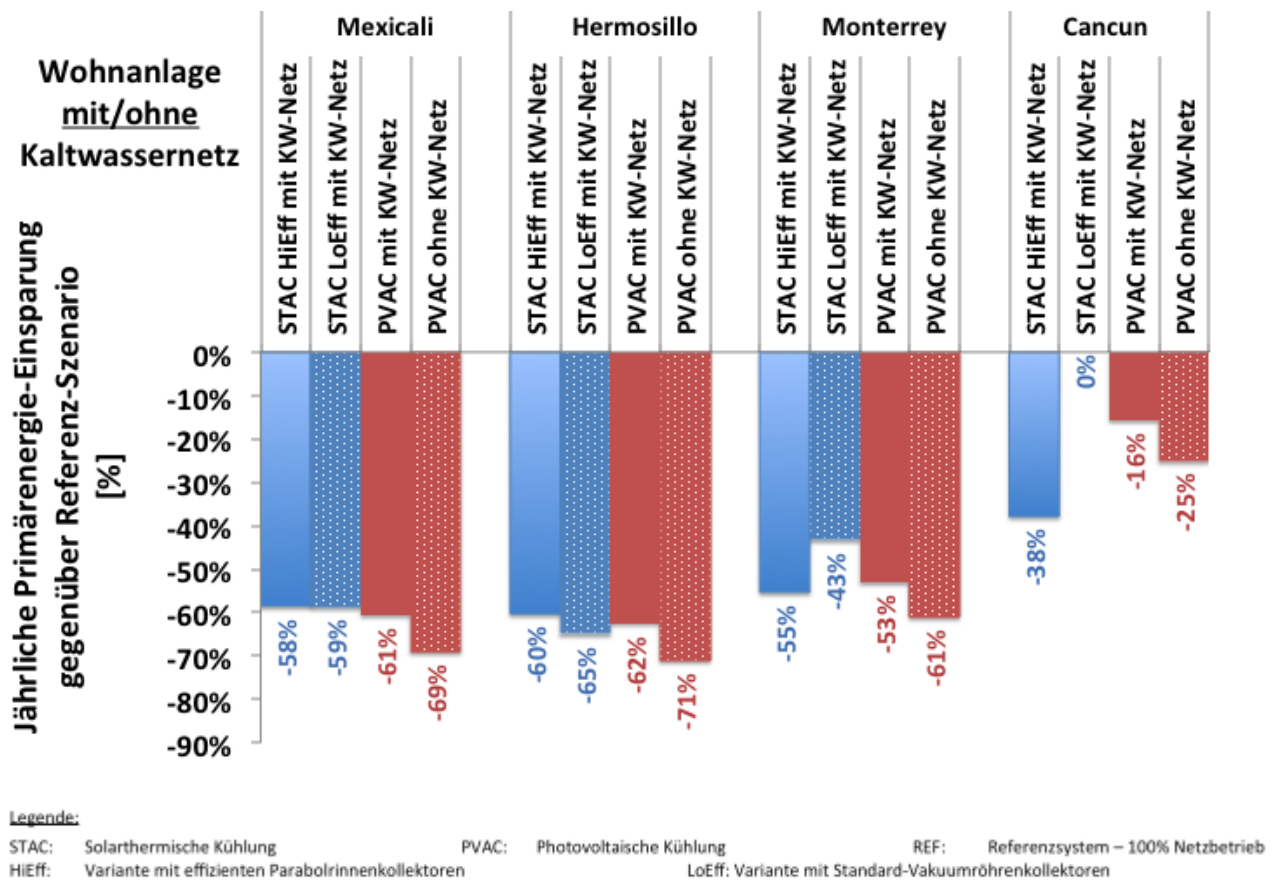


Abbildung 49: Primärenergie-Einsparpotential gegenüber Referenz-Szenario für Wohnanlage mit und ohne Kaltwassernetz

Die mögliche Primärenergieeinsparung solarer Kühlung in der Wohnanlage gegenüber dem Referenz-Szenario (100 % Netzbetrieb) beträgt bis zu 71 % in der Klimazone „Extrem heiß und trocken“ (Hermosillo) und bis zu 38 % am Standort Cancún, Abbildung 49. Dabei ist die Einsparung der photovoltaischen Option PVAC an den Standorten Mexicali, Hermosillo und Monterrey größer als die der solarthermischen Option STAC. In Cancún ist die Einsparung der solarthermischen Option HiEff⁷ größer. Die Einsparung der solarthermischen Option LoEff ist in Cancún Null aufgrund des hohen zusätzlichen Gasverbrauchs an Tagen ohne ausreichende Sonneneinstrahlung.

⁷ HiEff: Variante mit konzentrierenden Parabolrinnenkollektoren, LoEff: Variante mit nicht-konzentrierenden Vakuumröhrenkollektoren.

Tabelle 21: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Wohnanlage, zentral, mit Kaltwassernetz – Tarif „Base“

Wohnanlage Zentrale mit Kaltwassernetz Tarif „Base“	Standort	Mexicali		Hermosillo		Monterrey		Cancun	
	Solarkollektoren	Parabolrinne (HiEff)	Vakuurröhre (LoEff)	Parabolrinne (HiEff)	Vakuurröhre (LoEff)	Parabolrinne (HiEff)	Vakuurröhre (LoEff)	Parabolrinne (HiEff)	Vakuurröhre (LoEff)
Auslegungs- parameter	Kühlbedarf Gebäude (kW _r)	2635 kW _r	2635 kW _r	2635 kW _r	2635 kW _r	2635 kW _r	2635 kW _r	1251 kW _r	1251 kW _r
	Leistung Kälteanlage (kW _r)	2908 kW _r	2910 kW _r	2908 kW _r	2910 kW _r	2908 kW _r	2910 kW _r	1454 kW _r	1450 kW _r
Solarer Deckungsgrad (%)	STAC	76%	88%	79%	93%	70%	75%	23%	25%
	PVAC	61%	61%	62%	62%	53%	53%	16%	16%
Investitionskosten inkl. Installation (€)	STAC	4.775.687 €	4.800.090 €	4.775.687 €	4.800.090 €	5.232.525 €	4.800.090 €	3.905.482 €	3.038.380 €
	PVAC	2.339.485 €		2.339.485 €		2.339.485 €		1.621.893 €	
	REF	1.318.137 €		1.318.137 €		1.318.137 €		1.112.468 €	
Betriebskosten in Jahr 1 (€/a)	STAC	99.794 €	90.799 €	96.410 €	72.953 €	127.286 €	172.709 €	411.402 €	675.746 €
	PVAC	34.435 €		36.954 €		64.908 €		187.078 €	
	REF	84.502 €		90.316 €		136.519 €		237.401 €	
Amortisationszeit (Jahre)	STAC	>20	>20	>20	>20	>20	>20	>20	>20
	PVAC	14	14	13	13	10	10	8	8
Kapitalwert (€)	STAC	-6.812.268 €	-6.665.341 €	-6.733.721 €	-6.294.682 €	-7.833.905 €	-8.300.420 €	-12.087.941 €	-16.452.168 €
	PVAC	-3.599.461 €		-3.633.412 €		-4.306.038 €		-6.271.873 €	
	REF	-3.656.022 €		-3.753.296 €		-4.856.027 €		-6.813.463 €	
LCCE (€/kWh _{el})	STAC	6,3	6,2	6,3	5,8	7,3	7,9	7,8	11,0
	PVAC	3,4		3,4		4,2		4,2	
	REF	3,7		3,8		5,0		4,6	
Primärenergie- Einsparung gegenüber Referenz pro Jahr	STAC (MWh/a)	4237,0	4251,7	4368,4	4696,8	4005,7	3122,4	4816,6	0,0
	PVAC (MWh/a)	4388,2		4520,8		3845,5		2013,6	
	STAC (%)	-58%	-59%	-60%	-65%	-55%	-43%	-38%	0%
	PVAC (%)	-61%		-62%		-53%		-16%	

Tabelle 22: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Wohnanlage, zentral, mit Kaltwassernetz – Tarif „Excedente“

Wohnanlage Zentrale mit Kaltwassernetz Tarif „Excedente“	Standort	Mexicali		Hermosillo		Monterrey		Cancun	
	Solarkollektoren	Parabolrinne (HiEff)	Vakuurröhre (LoEff)	Parabolrinne (HiEff)	Vakuurröhre (LoEff)	Parabolrinne (HiEff)	Vakuurröhre (LoEff)	Parabolrinne (HiEff)	Vakuurröhre (LoEff)
Auslegungs- parameter	Kühlbedarf Gebäude (kW _r)	2635 kW _r	2635 kW _r	2635 kW _r	2635 kW _r	2635 kW _r	2635 kW _r	1251 kW _r	1251 kW _r
	Leistung Kälteanlage (kW _r)	2908 kW _r	2910 kW _r	2908 kW _r	2910 kW _r	2908 kW _r	2910 kW _r	1454 kW _r	1450 kW _r
Solarer Deckungsgrad (%)	STAC	76%	88%	79%	93%	70%	75%	23%	25%
	PVAC	86%	61%	86%	62%	86%	53%	75%	16%
Investitionskosten inkl. Installation (€)	STAC	4.775.687 €	4.800.090 €	4.775.687 €	4.800.090 €	5.232.525 €	4.800.090 €	3.905.482 €	3.038.380 €
	PVAC	2.339.485 €		2.339.485 €		2.339.485 €		1.621.893 €	
	REF	1.318.137 €		1.318.137 €		1.318.137 €		1.112.468 €	
Betriebskosten in Jahr 1 (€/a)	STAC	143.270 €	141.138 €	140.772 €	125.465 €	189.504 €	239.365 €	442.563 €	709.600 €
	PVAC	115.568 €		112.981 €		215.522 €		204.434 €	653.072 €
	REF	290.680 €		292.948 €		457.988 €		789.926 €	790.450 €
Amortisationszeit (Jahre)	STAC	14	14	14	13	9	10	5	7
	PVAC	4	4	4	4	3	3	3	3
Kapitalwert (€)	STAC	-7.843.879 €	-7.859.801 €	-7.786.333 €	-7.540.676 €	-9.310.224 €	-9.882.045 €	-12.827.335 €	-17.255.458 €
	PVAC	-5.525.822 €		-5.438.605 €		-7.881.038 €		-17.373.440 €	
	REF	-8.548.782 €		-8.561.920 €		-12.484.426 €		-19.935.231 €	
LCCE (€/kWh _{el})	STAC	7,4	7,5	7,4	7,1	8,9	9,6	8,4	11,5
	PVAC	5,5		5,4		8,0		11,9	
	REF	8,9		8,9		13,2		13,7	
Primärenergie- Einsparung gegenüber Referenz pro Jahr	STAC (MWh/a)	4237,0	4251,7	4368,4	4696,8	4005,6	3122,4	4816,5	0,0
	PVAC (MWh/a)	4388,2		4520,8		3845,5		2013,6	
	STAC (%)	-58%	-59%	-60%	-65%	-55%	-43%	-38%	0%
	PVAC (%)	-61%		-62%		-53%		-16%	

Tabelle 23: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Wohnanlage, zentral, ohne Kaltwassernetz – Tarif „Base“

Wohnanlage Zentrale Versorgung <u>ohne</u> Kaltwassernetz Tarif „Base“	Standort	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
Auslegungs- parameter	Kühllast Gebäude (kW _r)	2635	2635	2635	1251
	Kühllast Summe Einzelgeräte (kW _r)	2855	2855	2855	1750
Solarer Deckungsgrad (%)	PVAC	69%	71%	61%	25%
Investitions-kosten inkl. Installation (€)	PVAC	2.068.363 €	2.068.363 €	2.068.363 €	1.311.315 €
	REF	1.063.175 €	1.063.175 €	1.063.175 €	695.175 €
Betriebskosten in Jahr 1 (€/a)	PVAC	21.711 €	19.988 €	43.220 €	123.378 €
	REF	69.357 €	68.371 €	109.031 €	164.891 €
Amortisationszeit (Jahre)	PVAC	14,2	14,0	10,3	10,0
Kapitalwert (€)	PVAC	-2.894.525 €	-2.853.642 €	-3.404.887 €	-4.440.637 €
	REF	-2.920.627 €	-2.897.225 €	-3.862.005 €	-4.748.673 €
LCCE (€/kWh _{el})	PVAC	2,7	2,7	3,2	2,9
	REF	2,9	2,9	3,9	3,2
Primärenergie- Einsparung gegenüber Referenz pro Jahr	PVAC (MWh/a)	4308,0	4438,0	3776,0	2424,0
	PVAC (%)	-69%	-71%	-61%	-25%

Tabelle 24: Kosten und Parameter der Wirtschaftlichkeit für: Wohnanlage, zentral, ohne Kaltwassernetz – Tarif „Excedente“⁸

Wohnanlage Zentrale Versorgung ohne Kaltwassernetz Tarif „Excedente“	Standort	Mexicali	Hermosillo	Monterrey	Cancun
Auslegungs- parameter	Kühllast Gebäude (kW _r)	2635	2635	2635	1251
	Kühllast Summe Einzelgeräte (kW _r)	2855	2855	2855	1750
Solarer Deckungsgrad (%)	PVAC	69%	71%	61%	25%
Investitions-kosten inkl. Installation (€)	PVAC	2.068.363 €	2.068.363 €	2.068.363 €	1.311.315 €
	REF	1.063.175 €	1.063.175 €	1.063.175 €	695.175 €
Betriebskosten in Jahr 1 (€/a)	PVAC	76.313 €	70.009 €	152.005 €	434.680 €
	REF	246.610 €	242.576 €	385.400 €	581.361 €
Amortisations-zeit (Jahre)	PVAC	4,0	3,9	2,9	2,8
Kapitalwert (€)	PVAC	-4.190.132 €	-4.040.537 €	-5.986.149 €	-11.827.253 €
	REF	-7.126.515 €	-7.030.781 €	-10.419.744 €	-14.630.749 €
LCCE (€/kWh _{el})	PVAC	4,1	3,9	6,0	8,1
	REF	7,4	7,3	11,0	10,1
Primärenergie- Einsparung gegenüber Referenz pro Jahr	PVAC (MWh/a)	6226,2	6226,2	6226,2	6226,2
	PVAC (%)	86%	86%	86%	86%

⁸ Änderungen zu Ergebnissen im Tarif „Base“ sind **fett und kursiv** markiert.

5.5.5 Zusammenfassung

Der Vergleich der Kältegestehungskosten beider Varianten der solaren Kühlung mit dem Szenario Referenz ist in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Übersicht der Kältegestehungskosten: Alle Gebäudetypologien und Standorte. (B: Tarif „Base“, E: Tarif „Excedente“)

Legende:

: Referenz-Variante wirtschaftlicher

: Solar-Variante wirtschaftlicher

NA: Nicht anwendbare Variante

		Einfamilienhaus		Reihenhaus		Mehrfamilienhaus		Wohnanlage mit Kaltwassernetz		Wohnanlage ohne Kaltwassernetz	
		B	E	B	E	B	E	B	E	B	E
Solarthermisches Kühlen $LCCE_{STAC} < LCCE_{REF}$	Standort/Tarif										
	Mexicali									NA	NA
	Hermosillo									NA	NA
	Monterrey									NA	NA
	Cancun									NA	NA
Photovoltaisches Kühlen $LCCE_{PVAC} < LCCE_{REF}$	Mexicali										
	Hermosillo										
	Monterrey										
	Cancun										

Die Amortisationszeiten der Standorte und Gebäudetypen für die photovoltaische Option sind in Abbildung 50 für den Tarif „Base“ dargestellt, für den Tarif „Excedente“ in Abbildung 51.

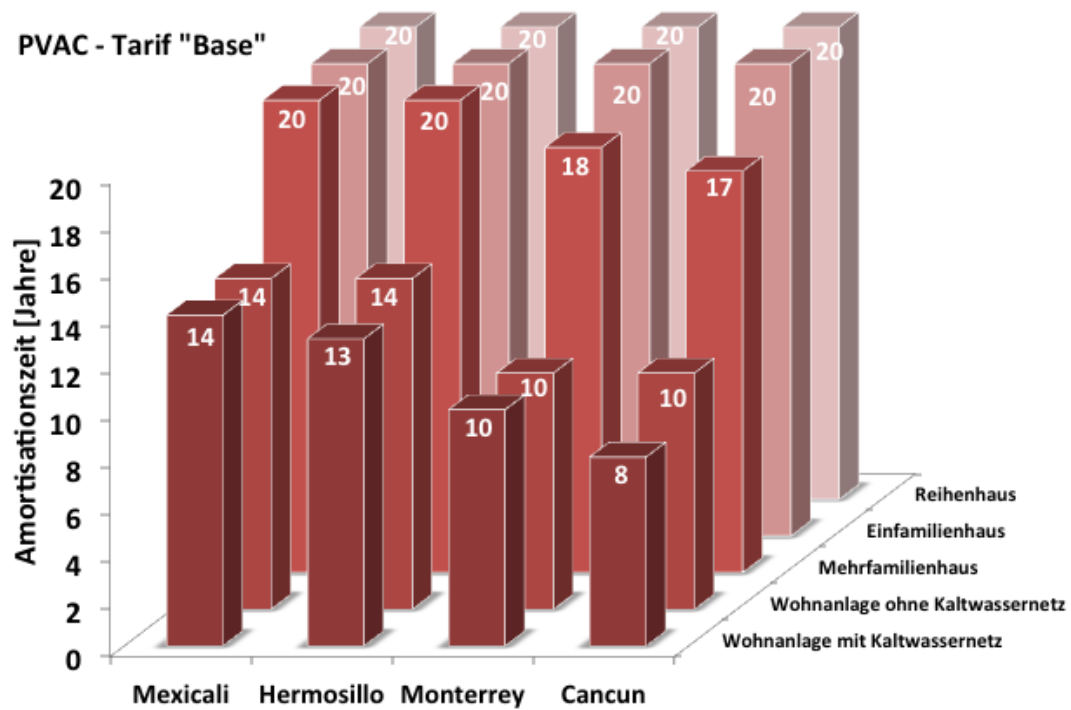


Abbildung 50: Amortisationszeit photovoltaischer Kühlung – Tarif „Base“

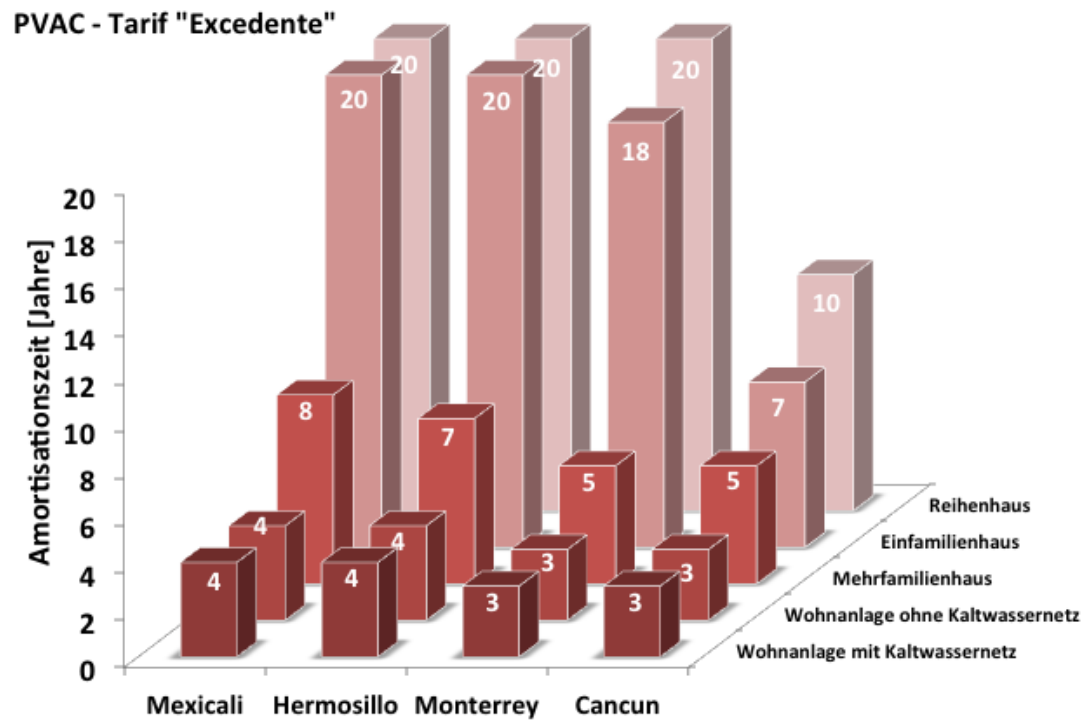


Abbildung 51: Amortisationszeit photovoltaischer Kühlung – Tarif „Excedente“

Die Amortisationszeiten der Standorte und Gebäudetypen für die solarthermische Option ist in Abbildung 52 für den Tarif „Excedente“ dargestellt. Für den Tarif „Base“ sind die Amortisationszeiten in allen Varianten > 20 Jahren, auf eine separate Darstellung wurde daher verzichtet.

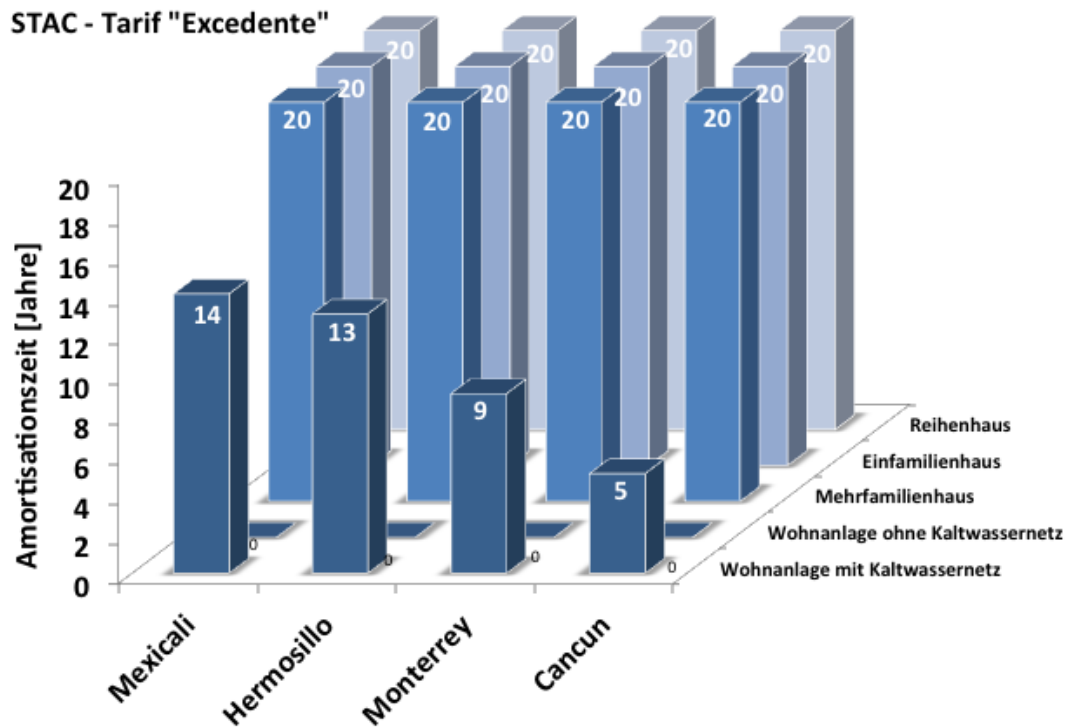


Abbildung 52: Amortisationszeit solarthermischer Kühlung – Tarif „Excedente“

6 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

6.1 Wohngebäude weltweit allgemein

Folgende Schlussfolgerungen für die Nutzung solarer Kühlung in Wohngebäuden und -siedlungen im Allgemeinen lassen sich aus den gesammelten und bewerteten Informationen der Kapitel 3 bis 5 ziehen:

Die Verbreitung von solarer Kühlung, sowohl solarthermische und photovoltaische Kühlungssysteme, ist bisher weltweit im Verhältnis zu konventionellen Klimatisierungstechnologien gering. So gibt es zwar solarthermische Kühlungssysteme seit rund 140 Jahren bzw. photovoltaische Kühlungssysteme als Kombination aus Kompressionskälte- und PV-Anlage seit gut 5-10 Jahren, aber beide Systeme haben sich bisher nicht am Markt etablieren können.

Die Anwendung in Wohngebäuden ist bisher im Verhältnis zur Anwendung in den Bereichen Handel/Gewerbe/Dienstleistungen/Industrie mit einem Anteil von 10-20 % bezogen auf alle derzeit dokumentierten Installationen eher gering. Zwar gab es Mitte der 2000er Jahre in Spanien einen ersten Boom zur Verbreitung und Installation von solarthermischen Kühlungssystemen in Wohngebäuden, welcher aber 2007 durch das Platzen der Immobilienblase gestoppt wurde.

Ausblick „solarthermische Kühleysteme“: Diese Systeme können als große Anlagen (> 1 MW_r Kälteleistung) für Wohnsiedlungen, wo auch gleichzeitig ein Wärmebedarf für Warmwasser bzw. ggf. Heizung besteht, projektiert werden. Ansonsten spielen Sie im Wohnungsbau eher eine untergeordnete Rolle. Sollte es politisch gewollt sein, dass Kältemaschinen kein GWP und ODP haben (siehe F-Gas Verordnung) oder erneuerbare Energien zum Einsatz kommen, dann können AB- oder ADSorptionskältemaschinen mit ihren natürlichen Kältemitteln einen wichtigen Beitrag zum weltweit steigenden Klimatisierungsbedarf leisten.

Ausblick „photovoltaische Kühleysteme“: Mit weiter sinkenden PV-Modulpreisen wird die Kombination aus PV-Anlage und existierenden oder neu installierten Split-Geräten für Wohngebäude mit kleiner und mittlerer Kältelast bis 100 kW_r technisch wie wirtschaftlich immer interessanter. Unter der Annahme, dass 10 % der im Jahr 2016 weltweit installierten PV-Leistung für solarelektrische Kühleysteme verwendet würden, besteht ein globales Anwendungspotential für 12 Millionen photovoltaische Kühleysteme (Split-Gerät mit je 5 kW_r) je Jahr. Dies entspricht ca. 6 Millionen Haushalten, legt man zwei Klimageräte je Haushalt zugrunde.

Die Autoren gehen davon aus, dass solare Kühlung in Wohngebäuden in der Zukunft verstärkt im Kälte-/Klimatechnik-Markt vertreten sein wird, da der Klimatisierungsbedarf weltweit stetig wächst und die CO₂-Einsparung bzw. Energieeffizienz und der Einsatz von Erneuerbaren Energien im politischen Fokus steht. Sollte die F-Gas-Verordnung noch strikter werden, ist auch das klimaneutrale Kältemittel Wasser in AB- und ADSorptionskälteanlage ein weiteres Argument für solare Kühlung.

6.2 Sozialer Wohnungsbau in Mexiko

Folgende Schlussfolgerungen für die Nutzung solarer Kühlung in mexikanischen Sozialwohnungen und –siedlungen (Wohnanlagen) lassen sich aus den Ergebnissen der Studie ziehen:

Unter derzeitigen Bedingungen (Stromtarif „Base“) lohnt sich keine der solaren Optionen für Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhäuser. Für Mehrfamilienhäuser werden in Monterrey und Cancún mit der photovoltaischen Variante zwar Amortisationszeiten knapp unter 20 Jahren erzielt, es ist allerdings fragwürdig, ob dies den Einsatz der kostenintensiveren und somit mit höherem finanziellen Risiko behafteten solaren Variante für einen Betreiber/Investor rechtfertigt. Bei der Wohnanlage bringt der Einsatz der photovoltaisch betriebenen solaren Kühlung einen deutlichen wirtschaftlichen Vorteil, wobei der Unterschied zwischen einer zentral mit Kaltwasser versorgten Anlage und einer zentral mit Strom versorgten Anlage bez. der Amortisationszeiten unerheblich ist.

Unter zukünftigen Bedingungen (Stromtarif „Excedente“) ist der Einsatz einer photovoltaisch betriebenen Anlage zur solaren Kühlung im Einfamilien- und Reihenhauser nur am Standort Cancún wirtschaftlich. Im Mehrfamilienhaus lohnt sich die photovoltaische Variante an allen Standorten. Bei der Wohnanlage bringt der Einsatz der photovoltaisch betriebenen solaren Kühlung einen überzeugenden wirtschaftlichen Vorteil, wobei der Unterschied zwischen einer zentral mit Kaltwasser versorgten Anlage und einer zentral mit Strom versorgten Anlage bez. der Amortisationszeiten auch hier unerheblich ist.

Die solarthermisch betriebene solare Kühlung hat im Vergleich mit der photovoltaisch betriebenen Variante in allen Fällen und an allen Standorten eine höhere Amortisationszeit sowie höhere Kältegestehungskosten.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich die in Tabelle 25 aufgeführten Handlungsempfehlungen formulieren:

Tabelle 26: Handlungsempfehlungen für alle Standorte, Tarife und Gebäudetypologien

	Standort	Tarif „Consumo Base“		Tarif „Consumo Excedente“	
		Handlungsempfehlung: Einzusetzender Anlagentyp	Amortisationszeit der solaren Variante	Handlungsempfehlung: Einzusetzender Anlagentyp	Amortisationszeit der solaren Variante
Einfamilienhaus	Mexicali	Splitgerät mit 100% Netzbezug	-	Splitgerät mit 100% Netzbezug	-
	Hermosillo		-		-
	Monterrey		-	Splitgerät mit PV-Anlage	18 Jahre
	Cancun		-		7 Jahre
Reihenhaus	Mexicali	Splitgerät mit 100% Netzbezug	-	Splitgerät mit 100% Netzbezug	-
	Hermosillo		-		-
	Monterrey		-		-
	Cancun		-	Splitgerät mit PV-Anlage	10 Jahre
Mehrfamilienhaus	Mexicali	VRF-Gerät mit 100% Netzbezug	-	VRF-Gerät mit PV-Anlage	8 Jahre
	Hermosillo		-		7 Jahre
	Monterrey	VRF-Gerät mit PV-Anlage	18 Jahre		5 Jahre
	Cancun		17 Jahre		5 Jahre
Wohnanlage mit Kaltwassernetz	Mexicali	Kaltwassersatz mit PV-Anlage	14 Jahre	Kaltwassersatz mit PV-Anlage	4 Jahre
	Hermosillo		13 Jahre		4 Jahre
	Monterrey		10 Jahre		3 Jahre
	Cancun		8 Jahre		3 Jahre
Wohnanlage ohne Kaltwassernetz	Mexicali	Split- und VRF-Geräte mit PV-Anlage	14 Jahre	Split- und VRF-Geräte mit PV-Anlage	4 Jahre
	Hermosillo		14 Jahre		4 Jahre
	Monterrey		10 Jahre		3 Jahre
	Cancun		10 Jahre		3 Jahre

Die in allen Fällen geringeren Kosten und Amortisationszeiten der jeweiligen photovoltaischen Option gegenüber der solarthermischen Option sind zunächst bemerkenswert. Jedoch sind die Ergebnisse durch die Annahmen und Randbedingungen dieser Studie beeinflusst.

6.3 Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden konkrete Handlungsempfehlungen für die Förderung der Anwendung von solaren Kühlsystemen (1) in Wohngebäuden allgemein und (2) für soziale Wohngebäude in Mexiko formuliert. Es wird unterschieden zwischen technischen Empfehlungen und Empfehlungen auf der politischen Ebene. Dazu werden im Stil einer Frequently-asked-questions-Liste (FAQ) Fragen und Antworten formuliert.

6.3.1 Technische Handlungsempfehlungen

Was sind die Vor- und Nachteile solarer Kühlung?

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile von Anlagen zur solaren Kühlung zusammengefasst.

Vorteile

- Finanzielle Einsparung für den Endkunden gegenüber konventioneller Klimaanlage
- Klimaneutralität bezüglich CO₂ im Wohnungsbau kann erreicht werden
- Kein Konflikt mit F-Gas Verordnung (gilt nur bei solarthermischer Kühlung, da Kältemittel Wasser)
- Politisches Argument: Einsatz Erneuerbarer Energien, Verdrängung von „schmutzigem“ Netzstrom
- Versorgungssicherheit bei Stromausfall erhöht, da PV-Anlage Eigenbedarf decken kann

Nachteile

- PV: Problematik der F-Gas Verordnung, da R-Kältemittel mit GWP > 1
- PV: Netzeinspeisung/-stabilität bei großen oder vielen Anlagen kann problematisch sein
- Nutzbare Dachfläche auf Hausdach wird kleiner
- Investitionskosten sind höher als bei konventionellen Anlagen, finanzielles Risiko dadurch höher
- Stromnetz braucht gegebenenfalls flexible Speicher, wenn viele photovoltaische Anlagen zum solaren Kühlen gebaut werden, da die Fluktuation der Einspeisung steigt.

Wo lässt sich solare Kühlung sinnvoll einsetzen?

Generell lässt sich dazu keine fundierte Aussage für alle Länder dieser Erde treffen, da die Wirtschaftlichkeit von sehr vielen Parametern abhängt. Es ist jedoch möglich, mittels einer Kombination aus klimatischen, baukulturellen und wirtschaftlichen Parametern eine Vorauswahl jener Länder zu ermitteln, in denen solare Kühlung interessant ist. Diese Parameter lauten wie folgt [1]:

- Solare Globalstrahlung auf die Horizontale > 1.600 kWh/(m²*a)
- niedriger jährlicher Bewölkungsgrad < 50%
- hoher jährlicher Wärme- und Kältebedarf im betrachteten Gebäude
- hohe spezifische Strom- und Gaspreise am Standort
- Gleichzeitigkeit von solarer Einstrahlung und Gebäudelast (Wärme und Kälte)

Damit ergibt sich eine Rangliste jener Länder, in denen solare Kühlung wirtschaftlich attraktiv sein kann⁹. Eine Einzelfallprüfung ist aber dennoch für jede Kombination aus Standort, Klima und Gebäude notwendig.

In Bezug auf Mexiko hängt die Wirtschaftlichkeit solarer Kühlung ebenfalls von Gebäudetyp, Standort und Stromtarif ab. Im günstigeren Tarif „Consumo Base“ ist photovoltaische Kühlung für Wohnanlagen an jedem Standort interessant, lohnt sich jedoch für Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhäuser nicht. Im teureren Tarif „Consumo Excedente“ lohnt sich photovoltaische Kühlung immer für Mehrfamilienhäuser und Wohnanlagen. Für Einfamilien- und Reihenhäuser ist photovoltaische Kühlung nur am Standort Cancún wirtschaftlich, an allen anderen untersuchten nicht. Die solarthermisch betriebene solare Kühlung hat im Vergleich mit der photovoltaisch betriebenen Variante in allen Fällen und an allen Standorten eine höhere Amortisationszeit sowie höhere Kältegestehungskosten und ist daher nicht zu empfehlen.

Welche Veränderungen von Parametern, die den Analysen der vorliegenden Studie zu Grunde liegen, können dieses Ergebnis maßgeblich positiv (oder negativ) beeinflussen?

1. Es wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass nicht für Klimatisierung verbrauchter Überschussstrom aus den Photovoltaik-Anlagen zu jeder Zeit ins Netz eingespeist werden kann. Im Falle der Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhäuser handelt es sich dabei nur um kleine Leistungen (wenige Kilowatt). Im Falle der Wohnanlage kann es jedoch zeitweise vorkommen, dass Überschussstrom mit großer Leistung (Megawatt) ins Stromnetz eingespeist werden muss. Sollte ein mexikanischer Netzbetreiber diese schlecht vorhersehbare und fluktuierende Leistung nicht akzeptieren können oder wollen, so würde dies den Betrieb der PV-Anlagen mit der vorgesehenen Leistung verhindern. Als Abhilfe kann man entweder die PV-Anlage in ihrer nominalen Leistung verringern oder einen Zwischenspeicher für elektrische Energie zusätzlich einbauen. Die erste Abhilfevariante verringert den solaren Deckungsgrad und erhöht somit die Kältegestehungskosten. Die zweite Variante erhöht den solaren Deckungsgrad, erhöht jedoch die Investitionskosten signifikant, was ebenfalls eine Erhöhung der Kältegestehungskosten zur Folge hat. In beiden Fällen könnte sich die Wirtschaftlichkeit hin zur solarthermischen Option verändern.
2. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass Solarenergie nur zum Zwecke der Klimakältebereitstellung verwendet wird. Die Verwendung zur Raumheizung und für Warmwasserbereitung wurde nicht untersucht. Insbesondere im Falle der solarthermischen Anlagen kann jedoch die Doppelnutzung der solaren Wärme (im Sommer indirekt für Kühlung, im Winter direkt zur Raumheizung, ganzjährig zur Warmwasserbereitung) signifikant zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit beitragen. Dabei ist auch die Verwendung des Warmwasserspeichers in der solarthermischen Variante entscheidend, welcher bereits in den angesetzten Kosten dieser Studie enthalten ist. In der photovoltaischen Option würde ein Batteriespeicher die Kosten deutlich erhöhen und könnte ebenfalls die Wirtschaftlichkeit hin zur solarthermischen Option verändern.

⁹ Im Jahre 2014 lauteten die TOP-5 dieser Rangliste wie folgt: 1. Chile, 2. Brasilien, 3. Australien, 4. Japan, 5. Mexiko

3. In dieser Studie wurden nur zwei verschiedene Stromtarife untersucht. Der Strompreis beeinflusst die Wirtschaftlichkeit solarer Kühlung jedoch wesentlich. Steigende Stromtarife können dafür sorgen, dass auch solarthermische Varianten wirtschaftlich werden können. Sinkende Stromtarife würden zugunsten der Referenz-Variante (reiner Netzbetrieb) wirken.
4. Die Stromkosten werden in zwei Bundesländern für einen Teil des Jahres bezuschusst (Baja California und Sonora). Damit ergibt sich ein Vorteil für die photovoltaische Option, da diese mehr Strom verbraucht als sie solarthermische. Sollte die lokale Förderung der Stromkosten wegfallen, werden sich auch diese Ergebnisse ändern.

Wie anfällig sind Anlagen zur solaren Kühlung für Störungen, die externe Unterstützung erfordern?

Die meisten Anlagen zur solarthermischen Kühlung können vom jeweiligen Hersteller fernüberwacht werden, auch im kleinen Leistungsbereich (bis 8 kW_r). Dies funktioniert allerdings nur, sofern ein Internetanschluss oder mindestens eine Mobilfunkverbindung vorhanden ist. Durch die Fernüberwachung kann der Hersteller Störfälle schnell erkennen und bei Bedarf einen lokalen Wartungs- oder Reparaturdienst informieren. Die Störanfälligkeit solarthermischer Anlagen zur solaren Kühlung beschränkt sich zumeist auf das benötigte Vakuum in der Kälteanlage. Steigt der Druck in einer solchen Anlage, verringert sich die Leistungsfähigkeit bis zum Stillstand. Abhilfe schafft dann der Kälte-Techniker mit einer handelsüblichen Vakuumpumpe. Solarthermische Kollektoren sind relativ störungsempfindlich, besonders in heißen Ländern, wo kein Frostschutz benötigt wird. Dann kann mit Hauswasser aus der Leitung nachgefüllt werden. Grundsätzlich sind solarthermische Anlagen zum solaren Kühlen nicht anfälliger für Störungen als konventionelle Klimageräte. Alle bewegten Teile (Pumpen, Ventile etc.) sind Standardkomponenten und können leicht getauscht werden (wenn sie verfügbar sind).

Anlagen zur photovoltaischen Kühlung haben in der Regel keine Möglichkeit zur Fernüberwachung, insbesondere kleinere Anlagen im Kilowattbereich. Nur Großanlagen werden - allein schon aus Kostengründen im Falle eines Ausfalls – meist fernüberwacht. Störfälle in der Kälteanlage werden durch den Support der Anlagenfirma bzw. eines Fremdanbieters sichergestellt. Auch hier reicht ein Kälte-Techniker aus. Sollte die PV-Anlage selbst einen Schaden haben, kann ein lokaler Elektriker oder – falls im Land vorhanden – der Hersteller einspringen. Auch photovoltaische Anlagen zum solaren Kühlen sind nicht anfälliger für Störungen als konventionelle Klimageräte.

Wichtig ist bei beiden Anlagentypen eine fachgerechte Installation und Inbetriebnahme durch geschultes Personal. Dadurch wird die Störfallanfälligkeit im späteren Betrieb minimiert.

Welche Risiken bestehen und sollten im Einzelfall noch genauer beleuchtet werden?

Technische Risiken wie Stromschlag, Wasserschaden, Verbrennung etc. bestehen wie bei jeder technischen Anlage, können jedoch durch sachgemäße Installation, Inbetriebnahme und korrekten Betrieb der Anlage weitestgehend minimiert werden. Hier besteht in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern noch Bedarf an ausreichend geschultem Personal.

→ Handlungsempfehlung:

- Weiterbildung von Fachpersonal, welches zur Installation/Wartung der Systeme benötigt wird, gemeinsam mit IHK/AHK's, (Transferierung von Wissen aus Europa)

Finanzielle Risiken entstehen bei solarer Kühlung (sowohl solarthermisch als auch solarelektrisch) durch die im Vergleich zum Referenzszenario höheren Investitionskosten. Der Eigentümer muss mehr vorfinanzieren und möglicherweise sogar Fremdkapital aufnehmen. Viele Investoren scheuen dieses Risiko, insbesondere bei großen Anlagen (Wohnanlagen). Diese jedoch haben nach den Ergebnissen dieser Studie die besten Aussichten auf Wirtschaftlichkeit. Es besteht also Potential, den verschiedenen Stakeholder-Gruppen die Technologie „Solares Kühlen“ soweit näher zu bringen, dass das Risiko abgebaut und in mehr Projekte investiert wird.

→ Handlungsempfehlung:

- Erstellung von Best Practice Broschüre(n) zur Veranschaulichung der Technologie bzw. deren Vorteilen für verschiedene Stakeholder-Gruppen (z.B. Planer/Architekt, Projektentwickler, Endkunde)
- Organisation von weltweiten Workshops zur Wissensvermittlung bzgl. solarer Kühlung für verschiedene Stakeholder-Gruppen (z.B. Planer/Architekt, Projektentwickler, Finanziers/Banken, Endkunde)
- Länder-/Regionen-spezifische Roadmaps/Potentialanalysen für solare Kühlung erstellen lassen, um Schwellen- und Entwicklungsländern (z.B. Brasilien, Mexico, Indien, Südafrika) Argumente für die Technologie an die Hand zu geben, dabei z.B. Ableitung von vorhandenen Potentialen aus Ländern mit großem PV- und Klimamarkt, wie z.B. China, für andere Schwellenländer
- Transferierung von Know-how/Marktkenntnissen von Ländern, wo solare Kühlung schon eingesetzt wird in Länder ohne diese Technologie (u.a. Technologietransfer von USA nach Mexiko)

Ein weiteres Hemmnis ist der im Vergleich zu konventionellen Klimaanlage höhere Aufwand bei der Vorplanung, Auslegung und Umsetzung, insbesondere bei Anlagen kleiner Leistung (wenige Kilowatt). Derzeit werden auch diese Anlagen fast immer manuell konfiguriert (Ausnahmen siehe Kap. 2.4). Eine höhere Anzahl an standardisierten plug-and-play-Anlagen (sog. cooling kits) würde dazu beitragen, diese Technologie weiter zu verbreiten. Aufgrund länderspezifischer und lokaler Eigenheiten empfiehlt sich die Entwicklung eines oder mehrerer solcher „kits“ für jeweils ein Land/eine Region.

→ Handlungsempfehlung:

- Entwicklung eines Online-Tools, in welchem interessierte Endkunden nach Eingabe von Standort und Strompreis sofort eine Wirtschaftlichkeitsberechnung und Anlagenempfehlung bekommen (analog den Solarrechnern in der PV-Branche)
- Produktentwicklung eines oder mehrerer standardisierter PV-cooling kits für Mexico, zugeschnitten auf die verschiedenen Gebäudetypen im sozialen Wohnungsbau, inkl. Einbauanleitung und Technikerschulung

6.3.2 Politische Handlungsempfehlungen

Die folgende Handlungsempfehlung auf politischer Ebene ergibt sich aus den in der Studie aufgelisteten Schlussfolgerungen zur weiteren Verbreitung von solarer Kühlung in Wohngebäuden oder auch anderen Anwendungen.

Wie kann solare Kühlung in Schwellen- und Entwicklungsländern gefördert werden?

Durch politische Beratung der jeweiligen Regierung und gleichzeitiger Initiierung von Fördermechanismen, z.B. analog der deutschen BAFA-Förderung für solare Kühlung, kann solare Kühlung in Schwellen- und Entwicklungsländern zur Unterstützung der Technologieverbreitung gefördert werden. Eine Abschaffung vorhandener regionaler Stromsubventionen sorgt für gleiche Bedingungen im ganzen Land. Politische Maßnahmen können für einen Technologie-Wettbewerb sorgen.

→ Handlungsempfehlung:

- Politische Arbeit mit dem Ziel, solare Kühlung mit PV-Anlagen in Mexico zu promoten/fördern – aktuell für die im Tarif „Base“ lohnenswerten Varianten/Gebäude und Standorte.
- Politische Arbeit mit dem Ziel, Batteriespeicher für PV-Anlagen zu fördern. Diese sind derzeit noch zu teuer. Ein Batteriespeicher erhöht den solaren Deckungsgrad, verringert damit die Kältegestehungskosten und auch die Amortisationszeit. Insgesamt wird das Produkt „olare Kühlung“ damit attraktiver für den Endkunden.

7 Literaturverzeichnis

1. Kohlenbach, P. und Jakob, U. (2014). Solar Cooling: The Earthscan Expert Guide to Solar Cooling Systems. Taylor & Francis. ISBN 978-0415639750
2. SEMARNAT/CONAVI (2012). Supported NAMA for Sustainable Housing in Mexico – Mitigation Actions and Financing Packages. Mexico City 2012.
3. Internes Dokument GIZ “2017-06-21 Presentacion San Marcos NAMA Facilities.pdf”
4. <https://library.e.abb.com/public/885ca21b9ce11ab5c1257be8005534fc/Mexico.pdf>. Zuletzt abgerufen am 07.08.2017
5. Gruner, Andreas (2017), GIZ Mexiko. Persönliche Kommunikation 02.08.2017.
6. <http://www.photovoltaik.org/betrieb/photovoltaik-kosten>. Zuletzt abgerufen am 23.08.2017
7. <https://www.photovoltaik.eu/photovoltaik-2015-11/Was-darf-Wartung-kosten,QUIEPTY4MTE3MyZNSUQ9MTEwNDUz.html>. Zuletzt abgerufen am 23.08.2017
8. <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/pv-welt/index.php>). Zuletzt abgerufen am 23.08.2017
9. <http://demographia.com/db-intlhouse.htm>. Zuletzt abgerufen am 07.08.2017
10. <http://www.solarnext.eu/ger/ref/referenzen.shtml> . Zuletzt abgerufen am 01.08.2017
11. http://www.solair-project.eu/uploads/media/ES03_Residential-Derio_Bizkaia.pdf. Zuletzt abgerufen am 01.08.2017
12. http://www.solair-project.eu/uploads/media/IT02_Milano.pdf. Zuletzt abgerufen am 01.08.2017
13. http://www.solair-project.eu/uploads/media/AT04_Thening.pdf. Zuletzt abgerufen am 01.08.2017
14. <http://www.csbe.org/assets/e-publications/AREE-Specification-final-versionTE.pdf>. Zuletzt abgerufen am 01.08.2017
15. http://www.med-enec.com/sites/default/files/user_files/archive/brochure_English-small.pdf. Zuletzt abgerufen am 01.08.2017
16. IEA Statistics (2010). Natural gas information
17. https://www.pv-magazine.com/2015/09/21/global-pv-module-sales-to-reach-record-levels-in-2016_100021177/. Zuletzt abgerufen am 27.07.2017
18. Schubert, M. und Putz, S. (2014). IEA SHC Task 48 Final Deliverable C6: Contracting models for solar thermally driven cooling and heating systems
19. Jakob, U. (2015). IEA SHC Task 48 Final Deliverable D2: Best practice brochure
20. Neyer, D., Neyer, J., Thür, A., Fedrizzi, R., Vittoriosi, A., White, S. und Focke, H. (2015). IEA SHC Task 48 Final Deliverable B7: Collection of criteria to quantify the quality and cost competitiveness for solar cooling systems

21. Fedrizzi, R., Vittoriosi, A., Romeli, D., D'Antoni, M., Fugmann, H., Nienborg, B., Nagidi, K. und Sheldon, M. (2014). IEA SHC Task 48 Final Deliverable A3: Heat rejection systems for solar cooling
22. Kohlenbach, P. (2016). Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für photovoltaik-basierte solare Kühlsysteme. Jahrestagung Deutscher Kälte- und klimatechnischer Verein DKV, Kassel, 16.11.2016.
23. Greenaway T., Kohlenbach P. (2016). Assessment of potential energy and greenhouse gas savings in the commercial building sector by using solar energy for airconditioning purposes. Procedia Engineering 180 (2017) 715 – 724
24. <http://www.green-cooling-initiative.org/country-data/#!unit-sales/unitary-air-conditioning/absolute>. Zuletzt abgerufen am 27.07.2017
25. <http://www.green-cooling-initiative.org/country-data/#!appliances-in-use/unitary-air-conditioning/absolute>. Zuletzt abgerufen am 23.08.2017
26. http://www.solair-project.eu/uploads/media/FR03_Maclas.pdf. Zuletzt abgerufen am 01.08.2017
27. Preisler, A. (2008). IEA SHC Task 38 Final Deliverable A5 Appendix 1: List of existing small scale solar heating and cooling plants
28. Werner, W., Spörk-Dür, M., Mauthner, F. (2017). Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends in 2016.
29. IEA (2012). Technology Roadmap: Solar Cooling and Heating.
30. REN21 (2017). Renewables 2017 Global Status Report.
31. Mouchot, A. (1987). Die Sonnenwärme und ihre industriellen Anwendungen. Olythus Verlag.
32. Schubert K. und Dreyer J. (1977). Kühlen mit Sonnenenergie. Dornier Post, Nr. 1.
33. Grossman G. (2002). Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning. Solar Energy, Vol. 72, No. 1, pp. 53-62.
34. <https://www.pv-magazine.com/2017/04/25/global-installed-pv-capacity-exceeds-300-gw-iea-pvps/>. Zuletzt abgerufen am 22.08.2017
35. <https://www.ejarn.com/news.aspx?ID=43277>. Zuletzt abgerufen am 10.07.2017
36. <http://www.estif.org/solarkeymarknew/images/downloads/QAiST/qaist%20d5.3%20tr5.3.2%20durability%20issues%20maintenance%20and%20costs%20of%20solar%20cooling%20systems.pdf>. Zuletzt abgerufen am 04.09.2017
37. https://www.chillventa.de/filestore.aspx/f05_p1_danfoss_turbocor_schoeninger.pdf?fair=chillventa&type=file&key=d94bfef4-6fba-471d-beb7-5f11a61d7bf6&language=none&filegroup. Zuletzt abgerufen am 04.09.2017
38. <https://de.ensolar.com>. Zuletzt abgerufen am 03.08.2017
39. <http://www.solaranlage-ratgeber.de/solarthermie/solarthermie-wartung/solarthermie-wartungsintervalle>. Zuletzt abgerufen am 23.08.2017

40. <https://www.slideshare.net/Vitess/presentation-hft-stuttgart-april-2008-per-olofsson-climatewellschreibgeschuetztkompatibilitaetsmodus>. Zuletzt abgerufen am 23.08.2017
41. http://www.solarcombiplus.eu/docs/091210_Thermics_SingleFamily_Sassari.pdf. Zuletzt abgerufen am 23.08.2017
42. <http://www.pvxchange.com>. Zuletzt abgerufen am 09.08.2017

8 Anhang

8.1 Anbieterübersicht

8.1.1 Anbieter solarthermisch betriebener Gesamtsysteme zum solaren Kühlen

Tabelle 27: Anbieter von solarthermisch betriebenen Gesamtsystemen (keine Garantie für Vollständigkeit)

Land	Hersteller	Produktname	Nominale Kälteleistung [kW _r]	Technologie	Sorbent	Gebäude-typologie ¹⁰
China	Jiangsu Huineng	Solar central air conditioning	11-350	ABsorption	LiBr/H ₂ O	EFH, RH, MFH Siedlung
China	Shandong Lucy New Energy Technology	Solar air-conditioning system	11,5-350	ABsorption	LiBr/H ₂ O	EFH, RH, MFH, Siedlung
China	VICOT	Solar air-conditioning system	17,5-2.330	ABsorption	LiBr/H ₂ O	MFH, Siedlung
Deutschland	SolarNext	chillii® cooling kits	15-175	ABsorption	LiBr/H ₂ O	MFH, Siedlung
			19-100	ABsorption	H ₂ O/NH ₃	MFH, Siedlung
			10	ADsorption	Silicagel/H ₂ O	EFH, RH
			10-30	ABsorption	Zeolithe/H ₂ O	EFH, RH, MFH
Frankreich	EDF Optimal solutions	Package system	17,5-210	ABsorption	LiBr/H ₂ O	MFH, Siedlung
Italien	Kloben	SOLARTIK	17,5-105	ABsorption	LiBr/H ₂ O	MFH, Siedlung
Österreich	Gasokol	coolySun	15-200	ABsorption	LiBr/H ₂ O	MFH, Siedlung
			8-15	ADsorption	Silicagel/H ₂ O	EFH, RH

¹⁰ Einfamilienhaus (EFH), Reihenhaus (RH), Mehrfamilienhaus (MFH), Siedlung

8.1.2 Anbieter von AB- und Adsorptionskälteanlagen zum solaren Kühlen

Tabelle 28: Hersteller von Ab- und Adsorptionskältemaschinen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Land	Hersteller	Nominale Kühlleistung [kW]	Technologie	Sorbent	Kosten pro Einheit [€]	Gebäudetypologie ¹¹
China	BROAD	233 – 11.630	ABsorption	LiBr/H ₂ O	130,000 (233 kW)	Siedlung
China	Jiangsu Huineng	11 – 2.900	ABsorption	LiBr/H ₂ O	N.A.	EFH, RH, MFH Siedlung
China	Vicot	21/42	ABsorption	NH ₃ /H ₂ O	N.A.	EFH, RH, MFH
Dänemark	Purix	2,5	ABsorption	LiBr/H ₂ O	3,192	EFH, RH
Deutschland	AGO	50-1.000	ABsorption	H ₂ O/NH ₃	105,000	Siedlung
Deutschland	Baelz	50 - 160	ABsorption	LiBr/H ₂ O	50,000 - 80,000	MFH, Siedlung
Deutschland	EAW	15- 200	ABsorption	LiBr/H ₂ O	29,000 - 70,000	MFH, Siedlung
Deutschland	En-save	25- 40	ABsorption	H ₂ O/NH ₃	95,000	MFH Siedlung
Deutschland	Fahrenheit	16	ADsorption	Silicagel/H ₂ O	25,000 - 45,000	MFH
		13	ADsorption	Zeolithe/H ₂ O	N.A.	EFH, RH
Deutschland	Fischer Solutions Eco	15	ABsorption	LiBr/H ₂ O	N.A.	MFH
Deutschland	Invensor	4-35	ADsorption	Zeolithe/H ₂ O	30,000 - 47,000	EFH, RH, MFH
Indien	Thermax	17.5- 175	ABsorption	LiBr/H ₂ O	55,000 - 93,000	MFH, Siedlung
Italien	Robur	17	ABsorption	NH ₃ /H ₂ O	N.A.	MFH
Japan	Mayekawa	105- 215	ADsorption	Silicagel/H ₂ O	190,000- 265,000	Siedlung
Japan	Mitsubishi Plastics	10	ADsorption	Zeolithe/H ₂ O	N.A.	EFH, RH
Japan	Sakura	10.5- 17.5	ADsorption	LiBr/H ₂ O	N.A.	EFH, RH, MFH
Japan	Yazaki Energy	17.5- 175	ABsorption	LiBr/H ₂ O	22,000 - 155,000	MFH, Siedlung
Niederlande	SolabCool	5	ADsorption	Silicagel/H ₂ O	N.A.	EFH, RH
Österreich	Ecoplus Energy Systems	18.4	ABsorption	NH ₃ /H ₂ O	N.A.	MFH
Österreich	Pink	19	ABsorption	H ₂ O/NH ₃	40,000	MFH
		12	ADsorption	Silicagel/H ₂ O		EFH, RH

¹¹ Einfamilienhaus (EFH), Reihenhaus (RH), Mehrfamilienhaus (MFH), Siedlung

Land	Hersteller	Nominale Kühlleistung [kW]	Technologie	Sorbent	Kosten pro Einheit [€]	Gebäudetypologie ¹¹
Schweden	SaltX Technology	4-9	ABsorption	H ₂ O/LiCl	N.A.	EFH, RH
USA	Energy Concepts LLC	87- 175	ABsorption	H ₂ O/NH ₃	54,000 - 75,000	MFH, Siedlung
USA	HIJC	69- 200	ADsorption	Silicagel/H ₂ O	N.A.	MFH, Siedlung

8.1.3 Anbieter photovoltaisch betriebener Gesamtsysteme zum solaren Kühlen

Tabelle 29: Anbieter von photovoltaisch betriebenen Gesamtsystemen (keine Garantie für Vollständigkeit)

(Quelle: <http://task53.iea-shc.org/data/sites/1/publications/IEA-SHC-Task53-Highlights-2016.pdf>)

Land	Hersteller	Produktstatus	Nominale Kälteleistung [kW _v]	Back up	Gebäudetypologie ¹²
Frankreich	ATISYS	R&D	4	Netz	EFH, RH,
Frankreich	FREECOLD	kommerziell	2,5	Netz	EFH
China	GREE	R&D	33,5	Netz	MFH
Spanien	KAYSUN	kommerziell	3,5	Netz	EFH
Frankreich	SENR	kommerziell	3,6 (split); 45 (VRF)	Netz	EFH; RH; MFH

¹² Einfamilienhaus (EFH), Reihenhaus (RH), Mehrfamilienhaus (MFH), Siedlung

8.1.4 Anzahl Hersteller photovoltaischer Module nach Ländern

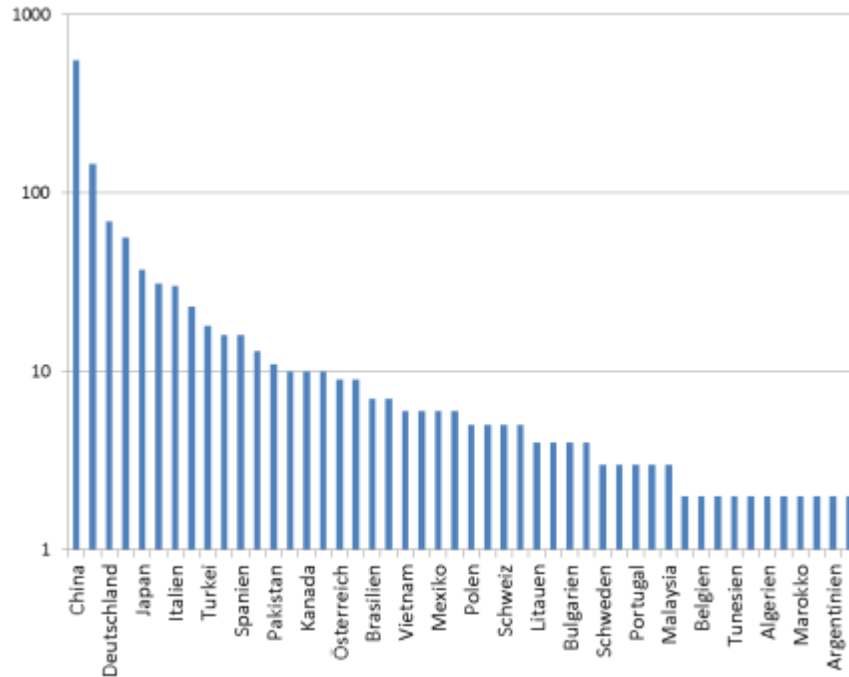


Abbildung 53: Anzahl Hersteller monokristalliner PV-Modulen (eigene Darstellung, Datenquelle: [38])

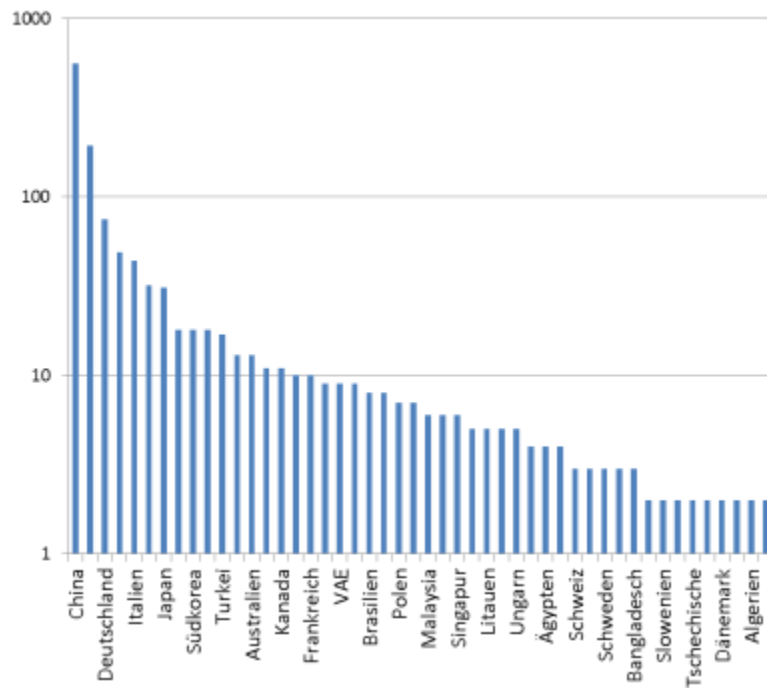


Abbildung 54: Anzahl Hersteller polykristalliner PV-Modulen (eigene Darstellung, Datenquelle: [38])

8.2 Allgemeine Kostenübersicht

8.2.1 Spezifische Kosten für solarthermische Kollektoren in Europa

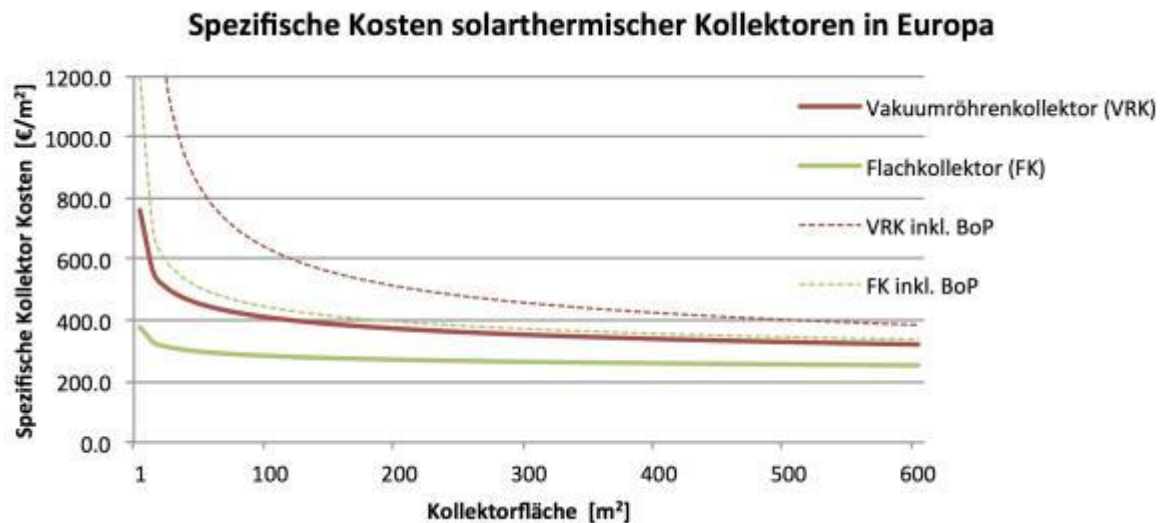


Abbildung 55: Spezifische Kosten für Flach- und Vakuurröhrenkollektoren in Europa [20]

8.2.2 Spezifische Kosten für AD-/ Absorptionskältemaschinen

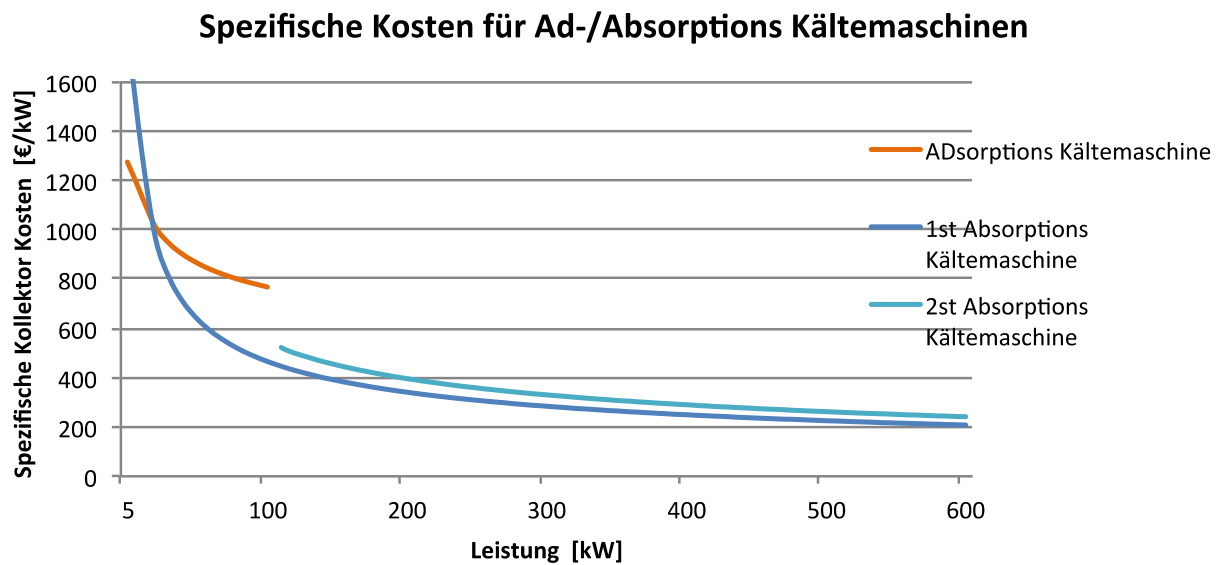


Abbildung 56: Spezifische Kosten für AD-/ Absorptionskältemaschinen [20]

8.2.3 Kosten für Rückkühler

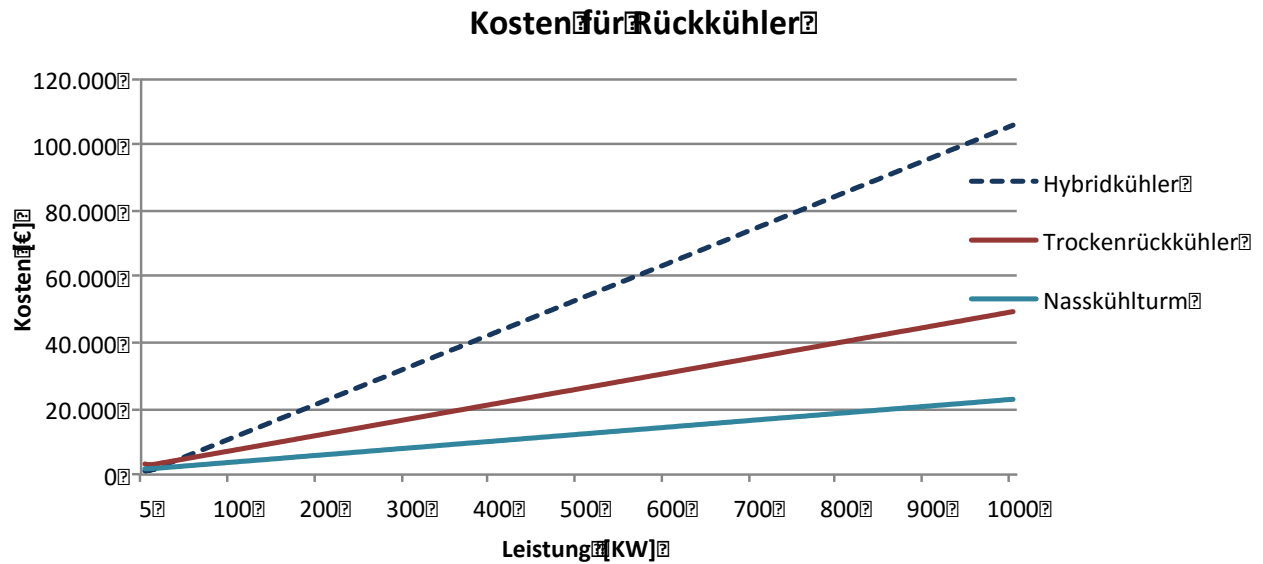


Abbildung 57: Kosten für verschiedene Arten von Rückkühlern [20]

8.2.4 Spezifische Kosten für Warm- und Kaltwasserspeicher

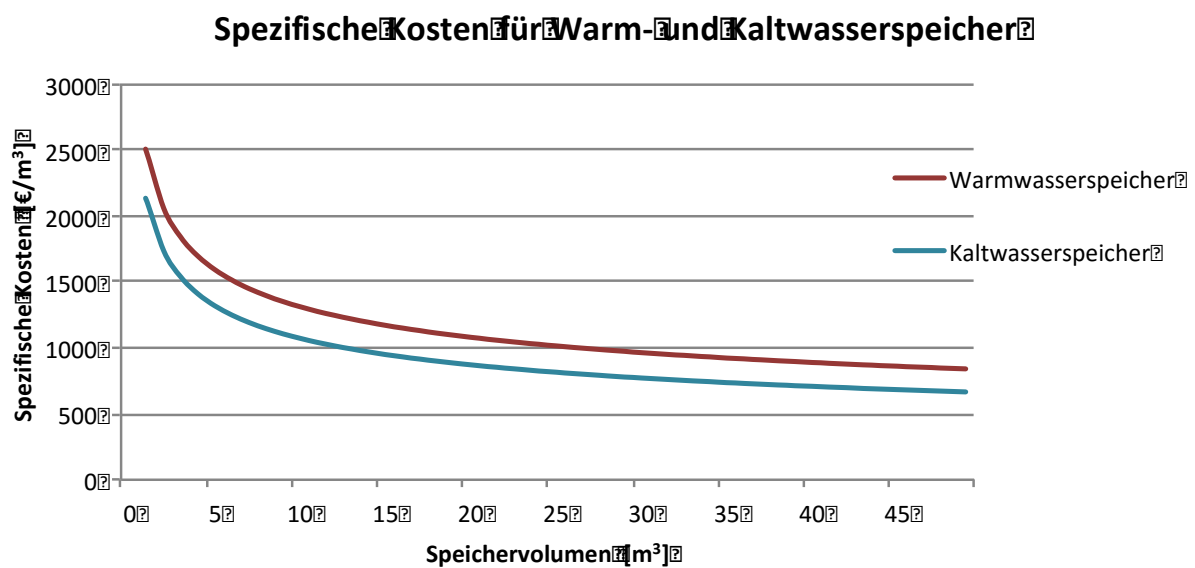


Abbildung 58: Spezifische Kosten für Warm- und Kaltwasserspeicher [20]

8.2.5 Spezifische Kosten für Kompressionskältemaschinen

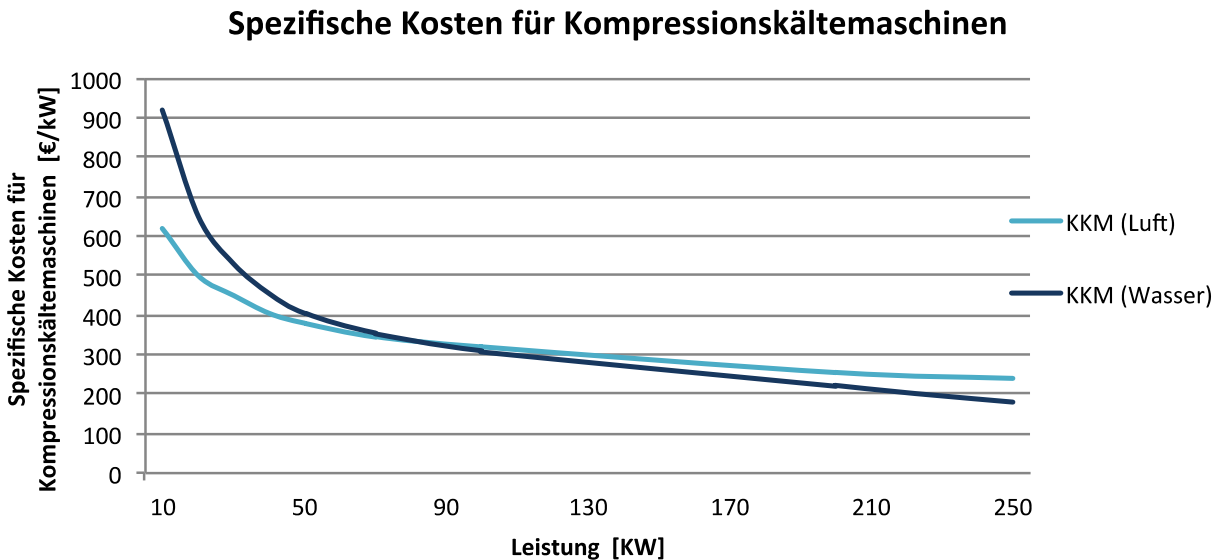


Abbildung 59: Spezifische Kosten für Kompressionskältemaschinen [20]

8.2.6 Spezifische Kosten für Photovoltaikmodule

Tabelle 30: PV-Modul Preise im April 2017 – durchschnittliche Angebotspreise für verzollte Ware auf dem europäischen Markt

Quelle: http://www.pvxchange.com/knowledge/Default.aspx?id=1782&template_id=1&langTag=de-DE

Modulklasse	Preis (€/W _p)	Beschreibung
High Efficiency	0,52	Kristalline Module ab 280 W _p , mit Cello-, PERC-, HIT-, N-TYPE- oder Rückseitenkontakt-Zellen oder Kombinationen daraus
All Black	0,52	Modultypen mit schwarzer Rückseitenfolie, schwarzem Rahmen und einer Nennleistung zwischen 200 W _p und 275 W _p
Mainstream	0,42	Module mit üblicherweise 60 Zellen, Standard-Alurahmen, weißer Rückseitenfolie und 250 bis 275 W _p , repräsentieren den Großteil der Module im Markt
Low Cost	0,27	Minderleistungsmodule, B-Ware, Insolvenzware, Gebrauchtmodule (kristallin), Produkte mit eingeschränkter oder ohne Garantie

Tabelle 31: Wirkungsgrade PV-Module (Monokristallin, Polykristallin, Dünnschicht und CIGS) im Vergleich

Quelle: <https://www.solaranlagen-portal.com/solarmodule/systeme/vergleich>

	Monokristallin	Polykristallin	Dünnschicht	CIGS
Wirkungsgrad	14 - 20 %	12 - 16 %	6 - 10 %	13 - 15 %
Kosten	Teurer als Polykristallin und Dünnschicht	Günstiger als Monokristallin und CIGS	Günstiger als Monokristallin, Polykristallin, CIGS	Bislang am teuersten

8.3 Investitionskostenübersicht Mexiko

8.3.1 Einfamilienhaus - Investitionskosten

8.3.1.1 Solarthermische Kühlung – EFH - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey - EFH	SOLAR THERMAL COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Solar field and hot water circuit	Collectors	m ²	Vakuurröhre	24	300 €	7.200 €	
	BoP	m ²	pauschal	24	815 €		19.560 €
Thermal chiller and chiller circuits	Absorption chiller	kW _r	LTC10eplus	9,5	2.421 €	23.000 €	
	Cooling tower	kW _{th}	trocken	29	47 €	1.340 €	
	BoP	kW _r	pauschal	9,5	2.300 €		21.850 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Radiation/Pressure	10	100 €		1.000 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	500 €		500 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	31.540 €	42.910 €
	Percentage (Main Component/BoP)					42%	58%
	Total Cost System					74.450 €	
	Installation cost SAC system	% of I ₀	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	26.760 €	15%	4.014 €	
	Installation cost chiller system	% of I ₀	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	24.340 €	15%	3.651 €	
	Total Cost System incl. installation					82.114 €	
	specific cost incl. installation	\$/kW _r				3.421 €	

Cancún

Cancun - EFH	SOLAR THERMAL COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Solar field and hot water circuit	Collectors	m ²	Flachkollektor	24	300 €	7.200 €	
	BoP	m ²	pauschal	24	815 €		19.560 €
Thermal chiller and chiller circuits	Absorption chiller	kW _r	LTC10eplus	5	4.600 €	23.000 €	
	Cooling tower	kW _{th}	trocken	15	47 €	705 €	
	BoP	kW _r	pauschal	5	2.300 €		11.500 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Radiation/Pressure	10	100 €		1.000 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	500 €		500 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	30.905 €	32.560 €
	Percentage (Main Component/BoP)					49%	51%
	Total Cost System					63.465 €	
	Installation cost SAC system	% of I ₀	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	26.760 €	15%	4.014 €	
	Installation cost chiller system	% of I ₀	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	23.705 €	15%	3.556 €	
	Total Cost System incl. installation					71.035 €	
	specific cost incl. installation	\$/kW _r				2.960 €	

8.3.1.2 Photovoltaische Kühlung – EFH - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey - EFH	PV COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
PV system	PV field + structure	kWp	5,4	5,4	1.300 €	7.020 €
	inverter SMA Sunny Island 3M	kVA	5	5	230 €	1.118 €
	Batteriesystem Tesvolt TS 10	kWh	0,0	0,0	1.453 €	- €
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgerät	kWr	9,5	1	2.890 €	2.890 €
	Cooling tower	kWth	NA-Splitgerät	0	- €	
	Cooling water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Chilled water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Expansion tank and safety relief valve	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	NA-Splitgerät	0	- €	
	Controller/System PLC	-	NA-Splitgerät	0	- €	
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	11.028 €
	Percentage (Main Component/BoP)					
	Total Cost System excl. installation					11.028 €
	Installation cost PV system	\$/kWp		5,4	- €	- €
	Installation cost chiller system	-	pauschal	1,0	400 €	400 €
	Total Cost System incl. installation					11.428 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				1.203 €

Cancún

Cancun - EFH	PV COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
PV system	PV field + structure	kWp	5,4	5,4	1.300 €	7.020 €
	inverter SMA Sunny Island 3M	kVA	5	5	230 €	1.118 €
	Batteriesystem Tesvolt TS 10	kWh	0,0	0,0	1.453 €	- €
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgerät	kWr	5	1	1.390 €	1.390 €
	Cooling tower	kWth	NA-Splitgerät	0	- €	
	Cooling water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Chilled water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Expansion tank and safety relief valve	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	NA-Splitgerät	0	- €	
	Controller/System PLC	-	NA-Splitgerät	0	- €	
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	9.528 €
	Percentage (Main Component/BoP)					
	Total Cost System excl. installation					9.528 €
	Installation cost PV system	\$/kWp		5,4	- €	- €
	Installation cost chiller system	-	pauschal	1,0	400 €	400 €
	Total Cost System incl. installation					9.928 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				1.986 €

8.3.1.3 Referenzsystem – EFH - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey - EFH	REFERENCE SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgerät	kWr	9,5	1	2.890 €	\$2.890
	Cooling tower	kWth	NA	0		
	Cooling water pump	m3/hr	NA -Splitgerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Piping	m	DN 60	0		
	Pipe Lagging	m	DN 60	0		
	Chilled water pump	m3/hr	NA -Splitgerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Expansion tank and safety relief valve	-		0		
	Piping	m	DN 60	0		
	Pipe Lagging	m	DN 60	0		
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	0		
	Controller/System PLC	-	PLC	0		
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	\$2.890
	Percentage (Main Component/BoP)					100%
	Total Cost System					\$2.890
	Installation cost chiller system	-	pauschal	1,0	400 €	400 €
	Total Cost System incl. installation					3.290 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				346 €

Cancún

Cancun - EFH	REFERENCE SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgerät	kWr	5	1	1.390 €	\$1.390
	Cooling tower	kWth	NA	0		
	Cooling water pump	m3/hr	NA -Splitgerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Piping	m	DN 60	0		
	Pipe Lagging	m	DN 60	0		
	Chilled water pump	m3/hr	NA -Splitgerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Expansion tank and safety relief valve	-		0		
	Piping	m	DN 60	0		
	Pipe Lagging	m	DN 60	0		
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	0		
	Controller/System PLC	-	PLC	0		
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	\$1.390
	Percentage (Main Component/BoP)					100%
	Total Cost System					\$1.390
	Installation cost chiller system	-	pauschal	1,0	400 €	400 €
	Total Cost System incl. installation					1.790 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				358 €

8.3.2 Reihenhuis - Investitionskosten

8.3.2.1 Solarthermische Kühlung – RH - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey - RH	SOLAR THERMAL COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Solar field and hot water circuit	Collectors	m2	Vakuurröhre	32	300 €	9.600 €	
	BoP	m2	pauschal	32	815 €		26.080 €
Thermal chiller and chiller circuits	Absorption chiller	kWr	LTC10eplus	11	2.091 €	23.000 €	
	Cooling tower	kWth	trocken	33	47 €	1.551 €	
	BoP	kWr	pauschal	11	2.300 €		25.300 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Radiation/Pressure	10	100 €		1.000 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	500 €		500 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	34.151 €	52.880 €
	Percentage (Main Component/BoP)					39%	61%
	Total Cost System					87.031 €	
	Installation cost SAC system	% of I ₀	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	35.680 €	15%	5.352 €	
	Installation cost chiller system	% of I ₀	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	24.551 €	15%	3.683 €	
	Total Cost System incl. installation					96.066 €	
	specific cost incl. installation	\$/kWr				8.733 €	

Cancún

Cancun - RH	SOLAR THERMAL COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Solar field and hot water circuit	Collectors	m2	Flachkollektor	32	300 €	9.600 €	
	BoP	m2	pauschal	32	815 €		26.080 €
Thermal chiller and chiller circuits	Absorption chiller	kWr	HTC18	5	7.000 €	35.000 €	
	Cooling tower	kWth	trocken	15	47 €	705 €	
	BoP	kWr	pauschal	5	2.300 €		11.500 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Radiation/Pressure	10	100 €		1.000 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	500 €		500 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	45.305 €	39.080 €
	Percentage (Main Component/BoP)					54%	46%
	Total Cost System					84.385 €	
	Installation cost SAC system	% of I ₀	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	35.680 €	15%	5.352 €	
	Installation cost chiller system	% of I ₀	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	35.705 €	15%	5.356 €	
	Total Cost System incl. installation					95.093 €	
	specific cost incl. installation	\$/kWr				19.019 €	

8.3.2.2 Photovoltaische Kühlung – RH - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey - RH	PV COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
PV system	PV field + structure	kWp	10,2	10,2	1.300 €	13.260 €
	inverter SMA Sunny Island 3M	kVA	9	9	230 €	2.111 €
	Batteriesystem Tesvolt TS 10	kWh	0,0	0,0	1.453 €	- €
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgerät	kWr	11	1	3.290 €	3.290 €
	Cooling tower	kWth	NA-Splitgerät	0	- €	
	Cooling water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Chilled water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Expansion tank and safety relief valve	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Instruments and control	Sensors/Gauges	-	NA-Splitgerät	0	- €
Controller/System PLC		-	NA-Splitgerät	0	- €	
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	18.661 €
	Percentage (Main Component/BoP)					100%
	Total Cost System excl. installation					18.661 €
	Installation cost PV system	\$/kWp		10,2	- €	- €
	Installation cost chiller system	-	pauschal	1,0	400 €	400 €
	Total Cost System incl. installation					19.061 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				1.733 €

Cancún

Cancun - RH	PV COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
PV system	PV field + structure	kWp	10,2	10,2	1.300 €	13.260 €
	inverter SMA Sunny Island 3M	kVA	9	9	230 €	2.111 €
	Batteriesystem Tesvolt TS 10	kWh	0,0	0,0	1.453 €	- €
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgerät	kWr	5	1	2.190 €	2.190 €
	Cooling tower	kWth	NA-Splitgerät	0	- €	
	Cooling water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Chilled water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Expansion tank and safety relief valve	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Instruments and control	Sensors/Gauges	-	NA-Splitgerät	0	- €
Controller/System PLC		-	NA-Splitgerät	0	- €	
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	17.561 €
	Percentage (Main Component/BoP)					100%
	Total Cost System excl. installation					17.561 €
	Installation cost PV system	\$/kWp		10,2	- €	- €
	Installation cost chiller system	-	pauschal	1,0	400 €	400 €
	Total Cost System incl. installation					17.961 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				3.592 €

8.3.2.3 Referenzsystem – RH - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey - RH	REFERENCE SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgerät	kWr	11	1	3.290 €	\$3.290
	Cooling tower	kWth	NA	0		
	Cooling water pump	m3/hr	NA -Splitgerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Piping	m	DN 60	0		
	Pipe Lagging	m	DN 60	0		
	Chilled water pump	m3/hr	NA -Splitgerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Expansion tank and safety relief valve	-		0		
	Piping	m	DN 60	0		
	Pipe Lagging	m	DN 60	0		
	Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	0	
Controller/System PLC		-	PLC	0		
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	\$3.290
	Percentage (Main Component/BoP)					100%
	Total Cost System					\$3.290
	Installation cost chiller system	-	pauschal	1,0	400 €	400 €
	Total Cost System incl. installation					3.690 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				335 €

Cancún

Cancun - RH	REFERENCE SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgerät	kWr	5	1	2.190 €	\$2.190
	Cooling tower	kWth	NA	0		
	Cooling water pump	m3/hr	NA -Splitgerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Piping	m	DN 60	0		
	Pipe Lagging	m	DN 60	0		
	Chilled water pump	m3/hr	NA -Splitgerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Expansion tank and safety relief valve	-		0		
	Piping	m	DN 60	0		
	Pipe Lagging	m	DN 60	0		
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	0		
	Controller/System PLC	-	PLC	0		
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	\$2.190
	Percentage (Main Component/BoP)					100%
	Total Cost System					\$2.190
	Installation cost chiller system	-	pauschal	1,0	400 €	400 €
	Total Cost System incl. installation					2.590 €
	specific cost incl. installation	\$/kWp				518 €

8.3.3 Mehrfamilienhaus - Investitionskosten

8.3.3.1 Solarthermische Kühlung – MFH - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey - MFH	SOLAR THERMAL COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Solar field and hot water circuit	Collectors	m2	Vakuurröhre	85	300 €	25.500 €	
	BoP	m2	pauschal	85	815 €		69.275 €
Thermal chiller and chiller circuits	Absorption chiller	kWr	Wegracal SE50	45	1.333 €	60.000 €	
	Cooling tower	kWth	trocken	109	47 €	5.136 €	
	BoP	kWr	pauschal	45	2.300 €		103.500 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Radiation/Pressure	10	100 €		1.000 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	500 €		500 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	90.636 €	174.275 €
	Percentage (Main Component/BoP)					34%	66%
	Total Cost System					264.911 €	
	Installation cost SAC system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	94.775 €	15%	14.216 €	
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	65.136 €	15%	9.770 €	
	Total Cost System incl. installation					288.898 €	
	specific cost incl. installation	\$/kWr				6.420 €	

Cancún

Cancun - MFH	SOLAR THERMAL COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Solar field and hot water circuit	Collectors	m2	Vakuumröhre	85	300 €	25.500 €	
	BoP	m2	pauschal	85	815 €		69.275 €
Thermal chiller and chiller circuits	Absorption chiller	kWr	Wegracal SE30	20	1.850 €	37.000 €	
	Cooling tower	kWth	trocken	49	47 €	2.283 €	
	BoP	kWr	pauschal	20	2.300 €		46.000 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Radiation/Pressure	10	100 €		1.000 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	500 €		500 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	64.783 €	116.775 €
	Percentage (Main Component/BoP)					36%	64%
	Total Cost System					181.558 €	
	Installation cost SAC system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	94.775 €	15%	14.216 €	
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	39.283 €	15%	5.892 €	
	Total Cost System incl. installation					201.667 €	
	specific cost incl. installation	\$/kWr				10.083 €	

8.3.3.2 Photovoltaische Kühlung – MFH - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey - MFH	PV COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
PV system	PV field + structure	kWp	11,5	11,5	1.300 €	14.950 €
	inverter SMA Sunny Island 3M	kVA	10	10	230 €	2.381 €
	Batteriesystem Tesvolt TS 10	kWh	0,0	0	1.453 €	- €
Conventional chiller and chiller circuits	VRF-Gerät	kWr	45	1	15.200 €	15.200 €
	Inneneinheiten	-	DX Verdampfer	16	200 €	3.200 €
	Cooling water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Chilled water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Expansion tank and safety relief valve	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	NA-Splitgerät	0	- €	
	Controller/System PLC	-	NA-Splitgerät	0	- €	
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	35.731 €
	Percentage (Main Component/BoP)					
	Total Cost System excl. installation					35.731 €
	Installation cost PV system	\$/kWp		11,5	- €	- €
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	18.400 €	20%	3.680 €
	Total Cost System incl. installation					39.411 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				876 €

Cancún

Cancun - MFH	PV COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
PV system	PV field + structure	kWp	11,5	11,5	1.300 €	14.950 €
	inverter SMA Sunny Island 3M	kVA	10	10	230 €	2.381 €
	Batteriesystem Tesvolt TS 10	kWh	0,0	0	1.453 €	- €
Conventional chiller and chiller circuits	VRF-Gerät	kWr	20	1	9.900 €	9.900 €
	Inneneinheiten	-	DX Verdampfer	16	200 €	3.200 €
	Cooling water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Chilled water pump	m3/hr	NA-Splitgerät	0	- €	
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Expansion tank and safety relief valve	-		0	- €	
	Piping	m	NA-Splitgerät	0	- €	
	Pipe Lagging	m	NA-Splitgerät	0	- €	
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	NA-Splitgerät	0	- €	
	Controller/System PLC	-	NA-Splitgerät	0	- €	
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	30.431 €
	Percentage (Main Component/BoP)					
	Total Cost System excl. installation					30.431 €
	Installation cost PV system	\$/kWp		11,5	- €	- €
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	13.100 €	20%	2.620 €
	Total Cost System incl. installation					33.051 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				1.653 €

8.3.3.3 Referenzsystem – MFH - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey - MFH	REFERENCE SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
Conventional chiller and chiller circuits	VRF-Gerät	kWr	45	1	15.200 €	15.200 €
	Inneneinheiten	-	DX Verdampfer	16	200 €	3.200 €
	Cooling water pump	m3/hr	NA-VRF-Gerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Piping	m		0		
	Pipe Lagging	m		0		
	Chilled water pump	m3/hr	NA-VRF-Gerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Expansion tank and safety relief valve	-		0		
	Piping	m		0		
	Pipe Lagging	m		0		
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	0		
	Controller/System PLC	-	PLC	0		
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	\$18.400
	Percentage (Main Component/BoP)					100%
	Total Cost System					\$18.400
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	18.400 €	20%	3.680 €
	Total Cost System incl. installation					22.080 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				491 €

Cancún

Cancun - MFH	REFERENCE SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
Conventional chiller and chiller circuits	VRF-Gerät	kWr	20	1	9.900 €	9.900 €
	Inneneinheiten	-	DX Verdampfer	16	200 €	3.200 €
	Cooling water pump	m3/hr	NA-VRF-Gerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Piping	m		0		
	Pipe Lagging	m		0		
	Chilled water pump	m3/hr	NA-VRF-Gerät	0		
	Valves miscellaneous	-		0		
	Expansion tank and safety relief valve	-		0		
	Piping	m		0		
	Pipe Lagging	m		0		
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	0		
	Controller/System PLC	-	PLC	0		
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	\$13.100
	Percentage (Main Component/BoP)					100%
	Total Cost System					\$13.100
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	13.100 €	20%	2.620 €
	Total Cost System incl. installation					15.720 €
	specific cost incl. installation	\$/kWr				786 €

8.3.4 Wohnanlage mit Kaltwassernetz – Investitionskosten

8.3.4.1 Solarthermische Kühlung – WA mit KW-Netz - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey (HiEff)

Mexicali, Hermosillo, Monterrey – WA mit KW-Netz (HiEff)	SOLAR THERMAL COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Solar field and hot oil circuit	Collectors	m2	Concentrating parabolic	5650	350 €	1.977.500 €	
	Total pipe length field border to plant room	m	DN 200	470	300 €		141.000 €
	Total connector pipe length ALL rows	m	DN 20	32	32 €		1.024 €
	Total flex hose length ALL rows	m	DN 20	90	32 €		2.880 €
	Pipe Lagging	m	DN 200	470	100 €		47.000 €
	Pipe Lagging	m	DN 20	122	64 €		7.808 €
	Solar circuit pump	m3/hr	128	1	20.000 €		20.000 €
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		3.000 €
	Heat exchanger	-	Plate	1	15.000 €		15.000 €
	Expansion tank and safety relief valve	-		1	1.000 €		1.000 €
	Valves miscellaneous	-	NA	0	400 €		- €
	Expansion tank	-	NA	0	300 €		- €
	Hot oil storage tank incl. Insulation	m3	124	124	2.500 €	310.000 €	
	Piping	m	DN 200	50	300 €		15.000 €
	Pipe Lagging	m	DN 200	50	100 €		5.000 €
Thermal chiller and chiller circuits	Absorption chiller	kWr	2908	2908	250 €	727.000 €	
	Cooling tower	kWth	5000	5000	20 €	100.000 €	
	Cooling water pump	m3/hr	613	1	30.000 €		30.000 €
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		3.000 €
	Chilled water network	-	pauschal, s.u.	1	888.800 €		888.800 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Radiation/Pressure	70	50 €		3.500 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	10.000 €		10.000 €
	Total cost (BoP)				SUM	3.114.500 €	1.194.012 €
	Percentage (Main Component/BoP)					72%	28%
	Total Cost System					4.308.512 €	
	Installation cost SAC system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	2.287.500 €	15%	343.125 €	
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	827.000 €	15%	124.050 €	
	Total Cost System incl. installation					4.775.687 €	
	specific cost incl. installation	\$/kW _r				1.642 €	

Mexicali, Hermosillo, Monterrey (LoEff)

Mexicali, Hermosillo, Monterrey – WA mit KW-Netz (LoEff)	SOLAR THERMAL COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Solar field and hot water circuit	Collectors	m2	Evacuated tube	7332	300 €	2.199.600 €	
	Total pipe length incl field border to plant room	m	DN 125	343	250 €		85.750 €
	Total connector pipe length ALL rows	m	DN 20	19	32 €		608 €
	Total flex hose length ALL rows	m	DN 20	19	32 €		608 €
	Pipe Lagging	m	DN 125	343	83 €		28.583 €
	Pipe Lagging	m	DN 20	38	64 €		2.432 €
	Solar circuit pump	m3/hr	47	1	20.000 €		20.000 €
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		3.000 €
	Heat exchanger	-	Plate	1	15.000 €		15.000 €
	Expansion tank and safety relief valve	-		1	1.000 €		1.000 €
	Hot water circuit pump	m3/hr	47	1	10.000 €		10.000 €
	Valves miscellaneous	-		1	2.000 €		2.000 €
	Expansion tank and safety relief valve	-		1	1.000 €		1.000 €
	Hot water storage tank incl. Insulation	m3	1	55	2.500 €	137.500 €	
	Piping	m	DN 125	50	250 €		12.500 €
	Pipe Lagging	m	DN 125	50	83 €		4.167 €
Thermal chiller and chiller circuits	Absorption chiller	kWr	2910	2910	250 €	727.500 €	
	Cooling tower	kWth	6689	6689	20 €	133.784 €	
	Cooling water pump	m3/hr	613	1	30.000 €		30.000 €
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		3.000 €
	Chilled water network	-	pauschal	1	888.800 €		888.800 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Radiation/Pressure	70	50 €		3.500 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	10.000 €		10.000 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	3.198.384 €	1.121.948 €
	Percentage (Main Component/BoP)					74%	26%
	Total Cost System					4.320.332 €	
	Installation cost SAC system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	2.337.100 €	15%	350.565 €	
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	861.284 €	15%	129.193 €	
	Total Cost System incl. installation					4.800.090 €	
	specific cost incl. installation	\$/kW _r				1.650 €	

Cancún (HiEff)

Cancun – WA mit KW-Netz (HiEff)	SOLAR THERMAL COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Solar field and hot oil circuit	Collectors	m2	Concentrating parabolic	3488	350 €	1.220.800 €	
	Total pipe length incl field border to plant room	m	DN 200	470	300 €		141.000 €
	Total connector pipe length ALL rows	m	DN 20	32	32 €		1.024 €
	Total flex hose length ALL rows	m	DN 20	90	32 €		2.880 €
	Pipe Lagging	m	DN 200	470	100 €		47.000 €
	Pipe Lagging	m	DN 20	122	64 €		7.808 €
	Solar circuit pump	m3/hr	128	1	20.000 €		20.000 €
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		3.000 €
	Heat exchanger	-	Plate	1	15.000 €		15.000 €
	Expansion tank and safety relief valve	-		1	1.000 €		1.000 €
	Hot water circuit pump	m3/hr	NA	0	- €		- €
	Valves miscellaneous	-	NA	0	400 €		- €
	Expansion tank and safety relief valve	-	NA	0	300 €		- €
	Hot oil storage tank incl. Insulation	m3	124	124	2.500 €	310.000 €	
	Piping	m	DN 200	50	300 €		15.000 €
	Pipe Lagging	m	DN 200	50	100 €		5.000 €
Thermal chiller and chiller circuits	Absorption chiller	kWr	1454	2908	250 €	727.000 €	
	Cooling tower	kWth	2500	5000	20 €	100.000 €	
	Cooling water pump	m3/hr	613	1	30.000 €		30.000 €
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		3.000 €
	Chilled water network	-	pauschal, s.u.	1	888.800 €		888.800 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Radiation/Pressure	70	50 €		3.500 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	10.000 €		10.000 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	2.357.800 €	1.194.012 €
	Percentage (Main Component/BoP)					66%	34%
	Total Cost System					3.551.812 €	
	Installation cost SAC system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	1.530.800 €	15%	229.620 €	
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	827.000 €	15%	124.050 €	
	Total Cost System incl. installation					3.905.482 €	
	specific cost incl. installation	\$/kW _r				2.686 €	

Cancún (LoEff)

Cancun – WA mit KW-Netz (LoEff)	SOLAR THERMAL COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Solar field and hot water circuit	Collectors	m2	Evacuated tube	3666	300 €	1.099.800 €	
	Total pipe length incl field border to plant room	m	DN 125	343	250 €		85.750 €
	Total connector pipe length ALL rows	m	DN 20	19	32 €		608 €
	Total flex hose length ALL rows	m	DN 20	19	32 €		608 €
	Pipe Lagging	m	DN 125	343	83 €		28.583 €
	Pipe Lagging	m	DN 20	38	64 €		2.432 €
	Solar circuit pump	m3/hr	47	1	20.000 €		20.000 €
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		3.000 €
	Heat exchanger	-	Plate	1	15.000 €		15.000 €
	Expansion tank and safety relief valve	-		1	1.000 €		1.000 €
	Hot water circuit pump	m3/hr	47	1	10.000 €		10.000 €
	Valves miscellaneous	-		1	2.000 €		2.000 €
	Expansion tank and safety relief valve	-		1	1.000 €		1.000 €
	Hot water storage tank incl. Insulation	m3	1	55	2.500 €	137.500 €	
	Piping	m	DN 125	50	250 €		12.500 €
Pipe Lagging	m	DN 125	50	83 €		4.167 €	
Thermal chiller and chiller circuits	Absorption chiller	kWr	1450	1450	250 €	362.500 €	
	Cooling tower	kWth	3333	3333	20 €	66.662 €	
	Cooling water pump	m3/hr	613	1	30.000 €		30.000 €
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		3.000 €
	Chilled water network	-	pauschal	1	888.800 €		888.800 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Radiation/Pressure	70	50 €		3.500 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	10.000 €		10.000 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	1.666.462 €	1.121.948 €
	Percentage (Main Component/BoP)					60%	40%
	Total Cost System					2.788.410 €	
	Installation cost SAC system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	1.237.300 €	15%	185.595 €	
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	429.162 €	15%	64.374 €	
	Total Cost System incl. installation					3.038.380 €	
	specific cost incl. installation	\$/kW _r				2.095 €	

8.3.4.2 Photovoltaische Kühlung – WA mit KW-Netz - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey – WA mit KW-Netz	PV-COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
PV system	PV field + structure	kWp	1163,2	1163,2	550 €	639.760 €	
	Inverter	kVA	1047	1047	78 €	81.657 €	
	Balance of Plant	kWp	1163	1163	260 €		302.432 €
Conventional chiller and chiller circuits	Reversible Vapour compression chiller, screw type	kWr	2908	2908	95 €	276.260 €	
	Cooling tower	kWth	4071	4071	20 €	81.424 €	
	Cooling water pump	m3/hr	0	0	- €		\$0
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		\$3.000
	Chilled water network	-	pauschal	1	888.800 €		\$888.800
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	50	50 €		\$2.500
	Controller/System PLC	-	PLC	1	10.000 €		\$10.000
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	1.079.101 €	1.206.732 €
	Percentage (Main Component/BoP)					47%	53%
	Total Cost System excl. installation					2.285.833 €	
	Installation cost PV system	\$/kWp		1163,2	- €	- €	
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	357.684 €	15%	53.653 €	
	Total Cost System incl. installation					2.339.485 €	
	specific cost incl. installation	\$/kWr				804 €	

Cancún

Cancun – WA mit KW-Netz	PV-COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
PV system	PV field + structure	kWp	581,6	581,6	550 €	319.880 €	
	Inverter	kVA	523	523	78 €	40.828 €	
	Balance of Plant	kWp	582	582	260 €		151.216 €
Conventional chiller and chiller circuits	Reversible Vapour compression chiller, screw type	kWr	1454	1454	95 €	138.130 €	
	Cooling tower	kWth	2036	2036	20 €	40.712 €	
	Cooling water pump	m3/hr	0	0	- €		\$0
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		\$3.000
	Chilled water network	-	pauschal	1	888.800 €		\$888.800
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	50	50 €		\$2.500
	Controller/System PLC	-	PLC	1	10.000 €		\$10.000
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	539.550 €	1.055.516 €
	Percentage (Main Component/BoP)					34%	66%
	Total Cost System excl. installation					1.595.066 €	
	Installation cost PV system	\$/kWp		581,6	- €	- €	
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	178.842 €	15%	26.826 €	
	Total Cost System incl. installation					1.621.893 €	
	specific cost incl. installation	\$/kWr				1.115 €	

8.3.4.3 Referenzsystem – WA mit KW-Netz - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey – WA mit KW-Netz	REFERENCE SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Conventional chiller and chiller circuits	Reversible Vapour compression chiller, screw type	kWr	2908	2908	95 €	276.260 €	
	Cooling tower	kWth	4071	4071	20 €	81.424 €	
	Cooling water pump	m3/hr	0	1	2.500 €		2.500 €
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		3.000 €
	Chilled water network cost	-	pauschal	1	888.800 €		888.800 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	50	50 €		2.500 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	10.000 €		10.000 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	357.684 €	906.800 €
	Percentage (Main Component/BoP)					28%	72%
	Total Cost System excl. installation					1.264.484 €	
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	357.684 €	15%	53.653 €	
	Total Cost System incl. installation					1.318.137 €	
	specific cost incl. installation	\$/kWr				453 €	

Cancún

Cancun – WA mit KW-Netz	REFERENCE SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
Conventional chiller and chiller circuits	Reversible Vapour compression chiller, screw type	kWr	1454	1454	95 €	138.130 €	
	Cooling tower	kWth	2036	2036	20 €	40.712 €	
	Cooling water pump	m3/hr	0	1	2.500 €		2.500 €
	Valves miscellaneous	-		1	3.000 €		3.000 €
	Chilled water network cost	-	pauschal	1	888.800 €		888.800 €
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	50	50 €		2.500 €
	Controller/System PLC	-	PLC	1	10.000 €		10.000 €
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	178.842 €	906.800 €
	Percentage (Main Component/BoP)					16%	84%
	Total Cost System excl. installation					1.085.642 €	
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	178.842 €	15%	26.826 €	
	Total Cost System incl. installation					1.112.468 €	
	specific cost incl. installation	\$/kWr				765 €	

8.3.4.4 Kaltwassernetz – Investitionskosten

Bezeichnung	Kosten Kaltwassernetzwerk (alle Kosten netto, installiert)				
	Einheit	Spezifikation	Anzahl	Stückpreis	Kosten Gesamt
1m RAUTHERM Wärmeleitung	m	DN 250	2000	320 €	640.000 €
1m RAUTHERM Wärmeleitung	m	DN 40	2000	64 €	128.000 €
Reduziermuffe	-	DN 40/250	100	40 €	4.000 €
T-Muffe	-	DN 40/250	100	96 €	9.600 €
Anschlussfitting für PE Leitung	-	DN 40	100	40 €	4.000 €
Hausdurchführung einfach	-	60-80 mm Durchführung	100	112 €	11.200 €
Hausanschlussstation	-		100	160 €	16.000 €
Membranausdehnungsgefäß	-	1000 Liter	1	1.600 €	1.600 €
Netzumwälzpumpe	-	DN 250; 138 l/s, 2bar	1	24.000 €	24.000 €
1m Verlegung im offenen Grund	m		2100	24 €	50.400 €
SUMME GESAMT					888.800 €

8.3.5 Wohnanlage ohne Kaltwassernetz – Investitionskosten

Anmerkung: Eine Anlage zum solarthermischen Kühlen benötigt zwingend ein Kaltwassernetz. Daher ist diese Variante nicht ohne Kaltwassernetz möglich und wird hier auch nicht aufgeführt.

8.3.5.1 Photovoltaische Kühlung – WA ohne KW-Netz - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey – WA ohne KW-Netz	PV-COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
PV system	PV field + structure	kWp	1142	1142,0	550 €	628.100 €	
	Inverter	kVA	1028	1028	78 €	80.168 €	
	Balance of Plant	kWp	1142	1142	260 €		296.920 €
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgeräte, ausgelegt für Reihenhaus	-	50	50	3.290 €	164.500 €	
	VRF-Geräte, ausgelegt für Mehrfamilienhaus	-	50	50	15.200 €	760.000 €	
	Gesamtkühlleistung installiert	kWr	2855				
	Cooling tower	kWth	0	0	- €	- €	
	Cooling water pump	m3/hr	0	0	- €		\$0
	Valves miscellaneous	-		0	- €		\$0
	Chilled water network	-	pauschal	0	- €		\$0
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	0	- €		\$0
	Controller/System PLC	-	PLC	0	- €		\$0
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	1.632.768 €	296.920 €
	Percentage (Main Component/BoP)					85%	15%
	Total Cost System excl. installation					1.929.688 €	
	Installation cost PV system	€/kWp	In Invest enthalten	-	- €	-	
	Installation cost AC-units	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	924.500 €	15%	138.675 €	
	Total Cost System incl. installation					2.068.363 €	
	specific cost total system incl. installation	\$/kWp				724 €	

Cancún

Cancun – WA ohne KW-Netz	PV-COOLING SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST	BALANCE OF PLANT COST
PV system	PV field + structure	kWp	700	700,0	550 €	385.000 €	
	Inverter	kVA	630	630	78 €	49.140 €	
	Balance of Plant	kWp	700	700	260 €		182.000 €
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgeräte, ausgelegt für Reihenhaushaus	-	50	50	2.190 €	109.500 €	
	VRF-Geräte, ausgelegt für Mehrfamilienhaus	-	50	50	9.900 €	495.000 €	
	Gesamtkühlleistung installiert	kWr	1750				
	Cooling tower	kWth	0	0	- €	- €	
	Cooling water pump	m3/hr	0	0	- €		\$0
	Valves miscellaneous	-		0	- €		\$0
	Chilled water network	-	pauschal	0	- €		\$0
Instruments and control	Sensors/Gauges	-	Temp/Pressure	0	- €		\$0
	Controller/System PLC	-	PLC	0	- €		\$0
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	1.038.640 €	182.000 €
	Percentage (Main Component/BoP)					85%	15%
	Total Cost System excl. installation					1.220.640 €	
	Installation cost PV system	€/kWp	In Invest enthalten	-	- €	-	
	Installation cost AC-units	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	604.500 €	15%	90.675 €	
	Total Cost System incl. installation					1.311.315 €	
	specific cost total system incl. installation	\$/kWp				749 €	

8.3.5.2 Referenzsystem – WA ohne KW-Netz - Investitionskosten

Mexicali, Hermosillo, Monterrey

Mexicali, Hermosillo, Monterrey – WA ohne KW-Netz	REFERENCE SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (\$/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
Conventional chiller and chiller circuits	Splittergeräte, ausgelegt für Reihenhaus	-	50	50	3.290 €	164.500 €
	VRF-Geräte, ausgelegt für Mehrfamilienhaus	-	50	50	15.200 €	760.000 €
	Gesamtkühlleistung installiert	kWr	2855			
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Chilled water network cost	-		0	- €	
Instruments and control	Sensors/Gauges	-		0	- €	
	Controller/System PLC	-		0	- €	
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	924.500 €
	Percentage (Main Component/BoP)					100%
	Total Cost System excl. installation					924.500 €
	Installation cost chiller system	% of IO	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	924.500 €	15%	138.675 €
	Total Cost System incl. installation					1.063.175 €
	specific cost incl. installation	\$/kWp				372 €

Cancún

Cancun – WA ohne KW-Netz	REFERENCE SYSTEM	UNIT	TYPE/SIZE	QUANTITY	SPECIFIC COST (€/UNIT)	MAIN COMPONENT COST
Conventional chiller and chiller circuits	Splitgeräte, ausgelegt für Reihenhaushaus	-	50	50	2.190 €	109.500 €
	VRF-Geräte, ausgelegt für Mehrfamilienhaus	-	50	50	9.900 €	495.000 €
	Gesamtkühleistung installiert	kWr	1750			
	Valves miscellaneous	-		0	- €	
	Chilled water network cost	-		0	- €	
Instruments and control	Sensors/Gauges	-		0	- €	
	Controller/System PLC	-		0	- €	
	Total cost (Main Component/BoP)				SUM	604.500 €
	Percentage (Main Component/BoP)					100%
	Total Cost System excl. installation					604.500 €
	Installation cost chiller system	% of 10	anteilig von Investsumme Hauptkomponenten	604.500 €	15%	90.675 €
	Total Cost System incl. installation					695.175 €
	specific cost incl. installation	\$/kWp				397 €