Kühlcontainer-Lösung für Krankenhäuser in Afrika -
Kaskadenkälteanlage mit thermischem Eisspeicher

Oliver Schmid[1*], Elena Melito[1], Tobias Nitschke[1], Philipp Benz[1], Michael Kauffeld[1]

[1]Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland
michael.kauffeld@h-ka.de

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Laut Prognosen wird auf dem afrikanischen Kontinent voraussichtlich mehr als die Hälfte des weltweiten Bevölkerungswachstums zwischen 2015 und 2050 erwartetet. Dem entgegen stehen die schlechte elektrische Infrastruktur und die Unzuverlässigkeit der Netze in vielen afrikanischen Ländern. Von diesem Umstand sind insbesondere medizinische Einrichtungen wie Apotheken und Krankenhäuser betroffen. Jedoch sind eine zuverlässige Stromversorgung sowie eine saubere Trinkwasserversorgung für medizinische Einrichtungen Voraussetzungen für erfolgreiche Behandlungen.

Das Ziel des Forschungsprojektes „SophiA – Sustainable Off-grid solutions for Pharmacies and Hospitals in Africa“ bietet Lösungen für das o.g. Problem in Form von autarken und solarbetriebenen Container-Systemen. Das Projekt umfasst 13 europäische sowie afrikanische Projektpartner und wird im Rahmen des Förderprogramms Horizon 2020 von der europäischen Union gefördert (Grant Agreement No. 101036836).

Die skalierbaren, solarbetriebenen 40-Fuß Container stellen eine zuverlässige und nachhaltige Kühlung auf drei Temperaturniveaus sowie eine saubere Trinkwasserversorgung bereit. Die drei Temperaturniveaus werden durch nachhaltige Kälteanlagen mit umweltfreundlichen und natürlichen Kältemitteln erzeugt. Eine handelsübliche Tieftemperatur-Box mit Ethan ermöglicht eine Impfstoffkühlung bei -70 °C. Die Boxen sind in einem -30 °C kalten Container-Abschnitt aufgestellt, der von einer Kaskaden-Kälteanlage mit Propan und CO_2 gekühlt wird und für eine Lagerung von Blutplasma und proteinbasierten Medikamenten genutzt werden kann. Zudem kühlt die Kaskadenkälteanlage einen weiteren Abschnitt des Containers auf +5 °C für die Lagerung von Medikamenten und Lebensmitteln. Um die Energieeffizienz der Anlage zu erhöhen, ist die Kaskadenkälteanlage an einen Thermosiphon mit Eisspeicher gekoppelt. Die Kopplung ermöglich eine Verflüssigung des CO_2 im Nacht-Betrieb ohne Betrieb der oberen Kaskadenstufe mit Propan. Darüber hinaus wird die Anlage mit einer intelligenten Regelung ausgestattet, die über Wettervorhersage-Funktionen das Energiemanagement optimal regelt.

Die Pufferung von Energie in Lithium-Ionen-Batterien wird weltweit standardisiert eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Energie in einem thermischen Speicher zu puffern. Thermische Speicher, wie beispielsweise Eisspeicher, haben einige Vorteile gegenüber Lithium-Ionen-Batterien. Sie besitzen neben weiteren Vorteilen unbegrenzte Ladezyklen und sind weder brennbar noch giftig. Im ersten Schritt werden die Versuchsanlage der Kaskadenkälteanlage sowie erste Ergebnisse präsentiert. Am Beispiel der Kaskadenkälteanlage für die SophiA-Container wird darüber hinaus die Eisspeicher-Technologie der Batterie-Technologie in Bezug auf die Gesamteffizienz des Systems gegenübergestellt.

Stichwörter:
CO_2-Propan-Kaskade, Thermosiphon-Technologie, natürliche Kältemittel, Ethan-Tiefkühlung

1 Einleitung

Aufgrund einer steigenden Weltbevölkerung, eines höheren Lebensstandards und nicht zuletzt des Klimawandels wird die weltweite Nachfrage nach Kühlung und Klimatisierung in den kommenden Jahren weiter zunehmen. Insbesondere auf dem afrikanischen Kontinent wird sich die Nachfrage nach Klimageräten bis 2040 vervierfachen. [1] Darüber hinaus wird Prognosen zufolge mehr als die Hälfte des erwarteten globalen Bevölkerungswachstums zwischen 2015 und 2050 auf dem afrikanischen Kontinent stattfinden. Dem stehen jedoch eine schlechte elektrische Infrastruktur und eine unzuverlässige Netzstabilität in vielen afrikanischen Ländern, insbesondere in der Subsahara-Region, gegenüber.

Angesichts der in Afrika vorherrschenden hohen Temperaturen ist eine ununterbrochene Kühlkette für Lebensmittel und Medikamente unerlässlich. In Regionen Afrikas südlich der Sahara sind jedoch etwa 26 % der mehr als 100.000 Gesundheitseinrichtungen nicht elektrifiziert. [2] Darüber hinaus verfügen weitere 28 % nicht über eine zuverlässige Stromversorgung. Obwohl in diesen Regionen ein enormes Potenzial für erneuerbare Energien, insbesondere für Photovoltaik, herrscht, sind große Teile dieser Region nicht an das Stromnetz angeschlossen. Im Falle eines Stromausfalls springen in den meisten Fällen weiterhin Dieselgeneratoren ein.

Im Rahmen des EU-Projekts SophiA (Sustainable off-grid solution for Pharmacies and Hospitals in Africa) wird eine umweltfreundliche und autarke Alternative für die Lagerung und Konservierung von Medikamenten und Lebensmitteln auf unterschiedlichen Temperaturniveaus entwickelt. Zu diesem Zweck wird unter anderem ein solarbetriebener Kühlcontainer entwickelt, der in drei Räume, mit +5 °C für die Kühlung von Medikamenten und Lebensmitteln, mit -30 °C für die Konservierung von Blutplasma und proteinbasierten Medikamenten sowie mit -70 °C für die Lagerung von Impfstoffen, aufgeteilt ist. Die Anwendung wird in Krankenhäusern in vier verschiedenen Klimaregionen in Afrika aufgebaut und über ein Jahr lang von den Projektpartnern begleitet getestet. Als Pilotstandorte dienen abgelegene Krankenhäuser in Regionen Ländern Burkina Faso, Uganda, Kamerun und Malawi.

Zur Realisierung der Temperaturniveaus von +5 °C und -30 °C wird eine zweistufige Kältekaskade mit thermischer Energiespeicherung in dem 40-Fuß-Kühlcontainer installiert. Die obere Stufe verwendet Propan (R-290), während die untere Stufe CO2 (R-744) als Kältemittel verwendet. Der Phasenwechsel von Wasser zu Eis wird als thermischer Energiespeicher genutzt. Der Eisspeicher wird über einen Naturumlaufverdampfer, auch Thermosiphon genannt, geladen. Der Thermosiphon hat Einfluss auf die Anordnung der Komponenten und die Größe des gesamten Kältesystems, weshalb Simulationen durchgeführt werden. Die Lagertemperatur von -70 °C wird durch separate Gefrierschränke im -30 °C-Raum sichergestellt. Das vorliegende Manuskript fasst die Auslegung der Kälteanlage zusammen. Zudem werden die Ergebnisse der SEER-Berechnung sowie Simulationsergebnisse vorgestellt.

2 Auslegung des Kühlcontainers

Der Projektplan sieht vor, dass ein erster Kühlcontainer für den Pilotstandort in Burkina Faso ausgelegt und getestet wird. Basierend auf den Ergebnissen der ersten Tests wird die Auslegung und Konstruktion des Kühlcontainers anschließend auf die weiteren drei Pilotstandorte umgestellt. Das folgende Manuskript umfasst die Auslegung für den Pilotstandort in Burkina Faso. Das ausgewählte Krankenhaus in Burkina Faso ist das „Centre Médico-Chirurgical Clinique Dr. Sedogo“ in Léo. Im ersten Schritt werden die Umgebungsbedingungen inklusive vorherrschender Wetterbedingungen in Léo ermittelt und ausgewertet. Anschließend werden die Auslegungsbedingungen für die Kälteanlage definiert, der Aufbau des Kühlcontainers festgelegt, sowie die notwendige Kälteleistung der einzelnen Temperaturniveaus berechnet. In einem letzten Schritt wird anhand der Leistungs- und Auslegungsdaten Effizienzkennzahlen ermittelt sowie Randparameter für den thermischen Eisspeicher bestimmt.

2.1 Umgebungsbedingungen in Burkina Faso, Léo

Für die Auslegung der Kälteanlage sind wesentliche wetterspezifische Daten, wie die durchschnittlichen Temperaturen, Sonnenstunden sowie Luftfeuchtigkeit von großer Bedeutung. Die Kühlung des Containers muss ausreichend sein, um eine Kühlung der Medikamente auch an warmen Tagen zu gewährleisten. Darüber hinaus erhöht eine hohe Luftfeuchtigkeit die notwendige Kälteleistung, da eintretende Luftfeuchtigkeit aus der Luft auskondensiert und die freiwerdende Kondensationswärme zusätzlich abgeführt werden muss. Zuletzt sind die Sonnenstunden von großer Relevanz, da der Container ausschließlich über Solarenergie betrieben wird und die exakten Sonnenstunden ausschlaggebend für das Energiemanagement der Anlage sind.

In Burkina Faso gibt es zwei Jahreszeiten: Eine trockene Jahreszeit von November bis März sowie eine kurze regnerische Jahreszeit von Juli bis September. Die verbliebenen Monate bilden den Übergang von der einen extremen Jahreszeit in die andere Extreme. Die mittleren Temperaturen im März betragen 32 °C und im August 26 °C. Die wärmsten Monate sind März und April, in denen die Temperaturen bis zu 42 °C betragen können. Die durchschnittliche Dauer an Sonnenstunden in Burkina Faso beträgt in sonnigen Monaten 10,2 Stunden und in sonnenarmen Monaten 6 Stunden. Die relative Luftfeuchtigkeit am Pilotstandort beträgt 34,1 % im März und 87,2 % im August. Daraus resultieren absolute Luftfeuchtigkeitswerte von je 11,53 g/m³ und 21,24 g/m³.

Die folgende Abbildung fasst die für die Auslegung der Anlage relevanten Wetterdaten in Burkina Faso zusammen.

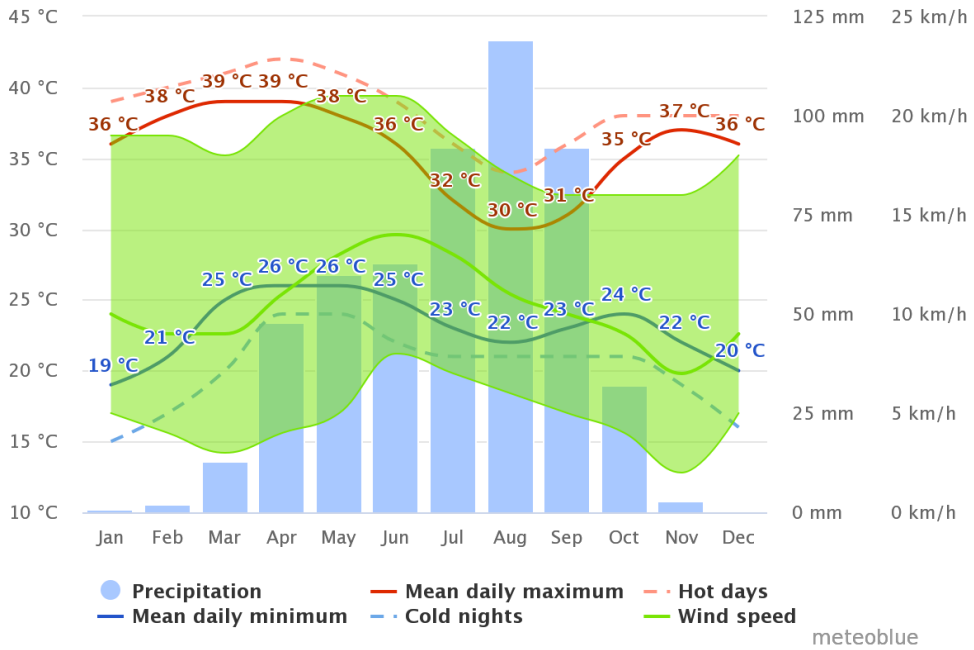

Abbildung 1: Meterological conditions in Léo, Burkina Faso [3]

2.2 Auslegungsparameter des Kühlcontainers

Das Kältesystem wird in einem konventionellen 40-Fuß Container installiert, der gleichzeitig als Kühlraum für Medikamente dient. Mit dem Kältesystem werden die drei folgenden Temperaturniveaus bereitgestellt: -70 °C für sensible Medikamente und Impfstoffe, -30 °C für protein-basierte Medizin und Blutplasma sowie +5 °C für Medikamente und Lebensmittel. Wie bereits angedeutet, wird der Container ausschließlich mit solarer Energie betrieben. Die Solarpaneele werden als Dach auf dem Container platziert und stehen soweit über, dass der gesamte Container durchgehend im Schatten ist.

Das Layout des Containers ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

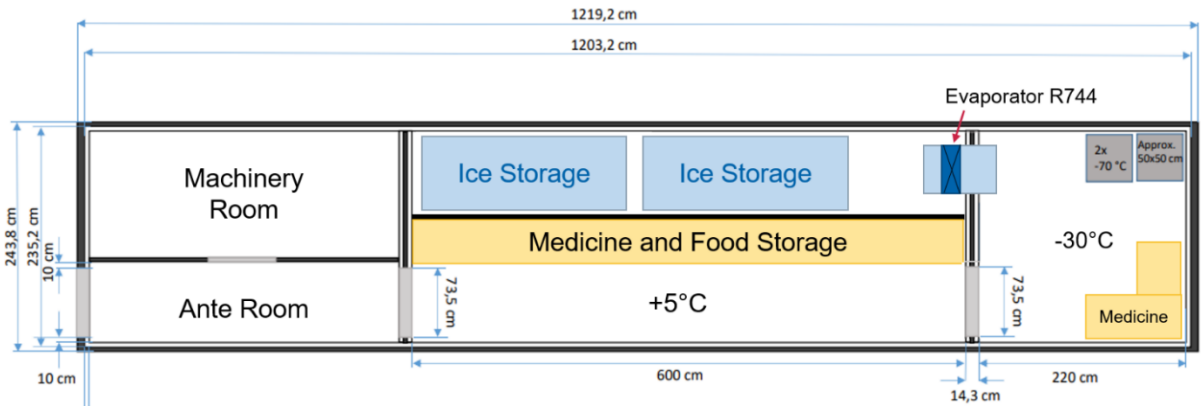

Figure 2 Layout SophiA Kühlcontainer

Der Kühlcontainer ist in drei Hauptbereiche unterteilt: einem Maschinenraum, einem -30 °C-Raum und einem +5 °C-Raum. Der +5 °C-Raum ist der größte Bereich des Containers. Er umfasst Lagerfläche für Medizin und Lebensmittel sowie zwei baugleiche Eisspeicher, die überschüssige Solarenergie puffern. Im -30 °C-Raum befinden sich neben Lagerfläche für Medizin zwei Tiefkühlboxen zur Realisierung von -70 °. Der Aufbau des Containers ist in folgender Abbildung in einem CAD-Modell skizziert.

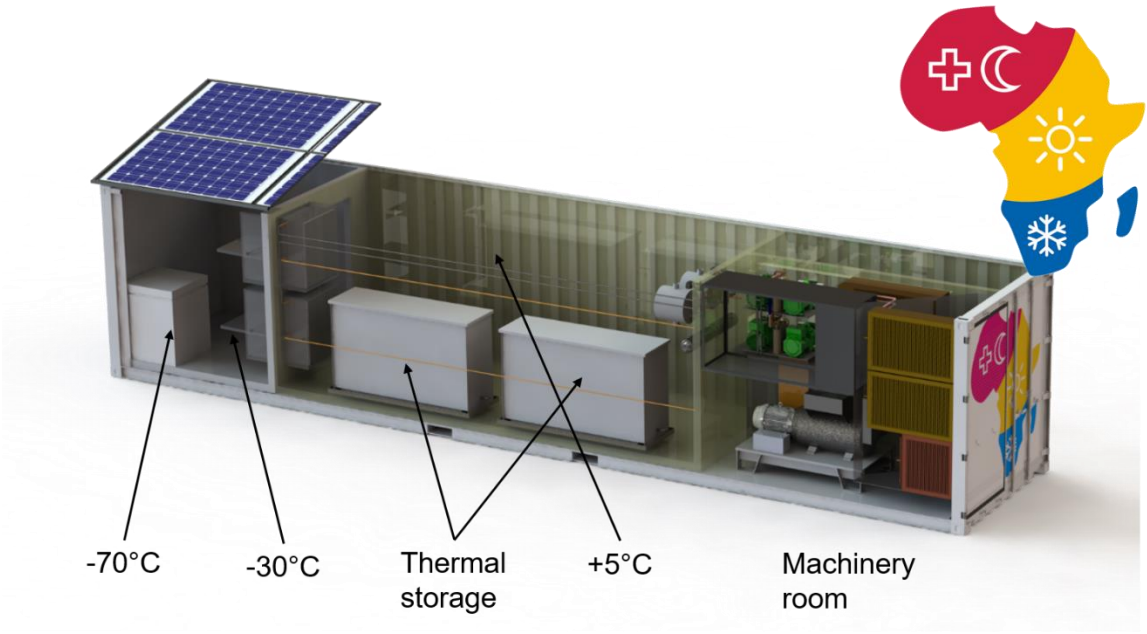

Abbildung 3: CAD Model des SOphiA Kühlcontainers

2.3 Ermittlung der Kälteleistung der einzelnen Temperaturniveaus

Die folgende Ermittlung der notwendigen Kälteleistungen der einzelnen Temperaturniveaus basiert auf Annahmen und Abschätzungen des zur Verfügung stehenden Platzes zur Lagerung der Medizin im Container und der daraus resultierenden Menge an lagerbarer Medizin. In Folge der Resultate der Analyse der Wetterdaten wird eine Auslegungstemperatur von 40 °C Umgebungstemperatur festgelegt. Da 42 °C in der Vergangenheit nur äußerst selten aufgezeichnet wurden, wird die notwendige Kälteleistung begrenzt, in dem die Temperatur auf 40 °C herabgesetzt wird.

Zuerst folgt die Beschreibung der Ermittlung der Kälteleistung der -70° C Tiefkühlboxen. Als Kühlgut wird das Volumen eines mRNA- Impffläschchens angenommen, das aus Datenblättern der Hersteller entnommen werden kann. Die Anzahl an Fläschchen berechnet sich anhand der Impfkapazität eines abgelegenen Krankenhauses in den Regionen und anhand des abgeschätzten verfügbaren Lagerplatzes innerhalb einer Tiefkühlbox. Als Liefertemperatur wird die maximal zulässige Temperatur nach Herstellerangaben verwendet, wobei von einer wöchentlichen Lieferung ausgegangen wird. Um die Druckdifferenz zwischen Nieder- und Hochdruck gering zu halten und um den Wärmeeintrag durch Wärmeleitung zu minimieren wird die Gefriertruhe im -30 °C Raum aufgestellt. Zuletzt wird eine Abkühlzeit von 12 Stunden für das Kühlgut angenommen.

Die Verflüssigungswärme der Tiefkühltruhe wird an den -30 °C-Raum abgegeben und als zusätzliche Wärmelast in diesem Raum betrachtet. Zusätzlich werden als Kühlgut im -30 °C-Raum Blutplasma und andere proteinbasierte Medikamente angenommen. Die Menge richtet sich ebenfalls nach den Kapazitäten eines abgelegenen Krankenhauses und nach dem verfügbaren Lagerplatz in dem Containerabschnitt. Für die Berechnung der erforderlichen Kälteleistung wird der Wärmeeintrag der Umgebung mit 40 °C und des +5 °C warmen Nachbarraums in den isolierten Raum berücksichtigt. Darüber hinaus müssen medizinische Fachangestellte die Medikamente einlagern und wieder rausholen, weshalb eine Inspektionszeit von 2 Stunden und eine Luftwechselzahl von 1 pro Stunde angenommen wird. Neben dem Wärmeeintrag wird zusätzlich die Wärmelast berücksichtigt, die anfällt, um die bei Türöffnung eintretende Luftfeuchtigkeit zu kondensieren und zu gefrieren. Dafür werden die Luftkonditionen des +5 °C warmen Nachbarraums angenommen. Der -30 °C-Raum ist dem +5 °C Raum nachgeschaltet, um die Leistungen in Folge der feuchten Luft zu reduzieren. Zudem wird hier von einer Abkühlzeit von 24 Stunden ausgegangen, um die notwendige Kälteleistung zu reduzieren. Zuletzt wird eine Personenwärme angenommen, die auf gängiger Literatur basiert und abhängig von der Raumtemperatur ist. [4]

Für den +5 °C-Raum wird gleich vorgegangen. Hier dient zur Berechnung der Kälteleistung feste und flüssige Medizin als Kühlgut. Die Menge wird anhand der vorhandenen Lagerfläche innerhalb des +5 °C-Bereiches im Container ermittelt. Neben der Wärmelast des Kühlguts werden für diesen Containerabschnitt die Wärmelast durch Wärmeeintrag aus der Umgebung und aus umliegenden Räumen sowie die Wärmelast in Folge auskondensierter Luftfeuchtigkeit ermittelt. Dabei wird eine Luftwechselrate von 2 pro Stunde und eine Begehungszeit von 6 Stunden angenommen. Darüber hinaus werden zur Ermittlung der Wärmelast in Folge auskondensierter Luftfeuchtigkeit die Luftkonditionen der Außenluft verwendet. Zuletzt wird auch hier eine Personenwärme angenommen, die auf gängiger Literatur basiert und von der Raumtemperatur abhängig ist. [4]

2.4 Kältesystem-Technologien der Temperaturniveaus

Als Kältemittel für die Tiefkühltruhe wird R170 Ethan mit einem GWP von 6 verwendet. Auf Grund der eingeschränkten Lieferketten in den abgelegenen Regionen wird eine haushaltsübliche und steckerfertige Tiefkühltruhe für den Einsatz von R170 umgerüstet, anstatt einen Raum im Container dafür vorzusehen. Da beim Transport des Kühlcontainers zum Krankenhaus von Temperaturen bis zu 50 °C ausgegangen werden muss, wird beim Umbau des Kreislaufes ein Ausdehngefäß vorgesehen. Nach der Modifikation des Kapillarrohres und der Installation des R170 Verdichters konnten an der Hochschule Karlsruhe erfolgreich Tests durchgeführt werden. Die voreingestellte Hochdruckabschaltung der Tiefkühltruhe führte zu einem Abschalten der Anlage bei Umgebungstemperaturen von -29 °C. Da die Tiefkühltruhe jedoch regelbar sein soll, wird dem Kältemittel circa 10 % R290 beigemischt. Tests zeigten, dass die Hochdruckabschaltung dann erst bei ca. -18°C anspricht.

Die Temperaturniveaus von -30 °C und +5 °C werden über ein zweistufiges Kaskadenkältesystem realisiert. In der oberen Stufe wird Propan R290 und in der unteren Stufe CO_2 R744 eingesetzt. Der grundlegende Aufbau der Systeme ist in folgender Abbildung dargestellt.

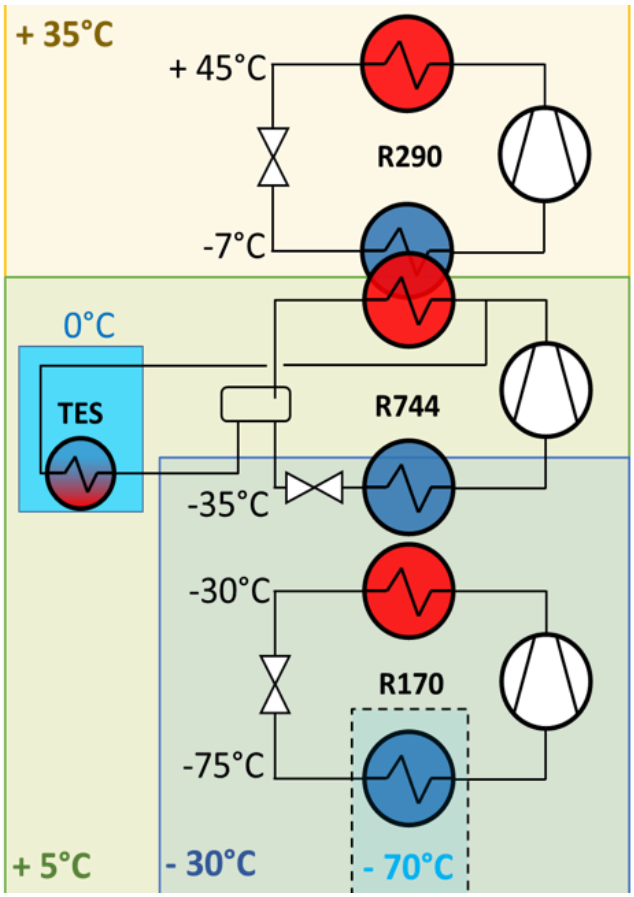

Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau der SophiA Kälteysteme

Im Allgemeinen verdampft das Ethan in der Tiefkühltruhe und kühlt das innere der Truhe auf -70 °C ab, wobei die aufgenommene Wärme an den -30 °C-Raum abgegeben wird. Hier verdampft CO_2 in einem Lamellenverdampfer und nimmt dabei Wärme aus den Tiefkühlboxen und den gelagerten Medikamenten auf. Anschließend wird die absorbierte Wärme in einem Kaskadenwärmeübertrager, der für das CO_2 als Verflüssiger und für Propan als Verdampfe dient, vom CO_2 auf das Propan übertragen. Schließlich gibt das Propan die gesamte Wärmemenge über einen weiteren Wärmeübertrager an die Außenluft ab.

Der Lamellenverdampfer des -30 °C-Raumes befinden sich in verschlossenen Luftkanälen an der Wand zwischen dem -30 °C- und dem +5 °C-Raum. Die Enden der Luftkanäle sind mit verstellbaren Klappen versehen, die im Kühlbetrieb zum -30°C Raum geöffnet sind. Um die gefrorene kondensierte Luftfeuchtigkeit auf den Lamellen mit einem geringen Energieaufwand abzutauen, schließt während des Abtauvorganges die Klappe zum -30 °C Raum. Gleichzeitig öffnet die Klappe zum +5°C Raum. Die benötigte Wärme zum Abtauen des Eises wird zur damit Kühlung des +5 °C-Raumes genutzt.

Die CO_2-Stufe der Kaskadenkälteanlage ist mit einem thermischen Energiespeicher verbunden. Der thermische Energiespeicher ist als Eisspeicher realisiert. Der Eisspeicher hat zwei Hauptfunktionen. Erstens soll er überschüssigen, von den PV-Modulen produzierten Strom in Form von thermischer Energie für Tage speichern, an denen die Sonne nicht scheint und Energie benötigt wird. Zweitens dient er als Kondensator des CO_2-Kreislaufs während der Nacht, um den gesamten Stromverbrauch zu reduzieren, da der Propankompressor dann während der Nacht abgeschaltet werden kann.

Der Eisspeicher ist im +5°C Raum installiert und besitzt keine Dämmung. Dadurch wird der Speicherverlust auf ein Minimum gesenkt, da er zur Kühlung des Raumes aktiv beiträgt. Das Kaltwasser wird am unteren Tank abgeführt und durch einen Wärmeübertrager drehzahlgeregelt gepumpt. Dabei nimmt es die Wärmelast des Raumes auf und ermöglicht eine Regelung zwischen 5 °C und höheren Temperaturen. Das Eis des Speichers wird nur dann gebildet, wenn genug Energie durch die Photovoltaik-Anlage zur Verfügung gestellt werden kann. Ist der Eisspeicher teilweise beladen, kann er als Wärmesenke für den R744 Kreislauf genutzt werden. Der Verdichter der oberen Kaskadenstufe ist dann abgeschaltet. Dieses innovative Konzept erlaubt eine Regelung mit einem Tag- Nacht Zyklus. Wenn tagsüber viel Energie durch die PV-Anlage vorhanden ist, laufen die Propan-Verdichter der ersten Stufe auf maximaler Drehzahl. Überschüssige Kälteleistung verflüssigt die zweite Stufe der Kaskade und es wird zusätzlich Eis erzeugt. Das Regelkonzept dieser Insellösung ist auch repräsentativ für die Herausforderungen bei der Umstellung auf erneuerbare Energien. Werden ausschließlich inkonstante Energiequellen genutzt, muss der Stromverbrauch an die Stromerzeugung angepasst werden.

Das anfallende Kondenswasser der Eisspeicher wird in einer Tropfwanne aufgefangen und aus dem Container geführt. Bei der Berechnung der Kälteleistung wird davon ausgegangen, dass dieser Raum öfters betreten wird als der -30°C Raum. Durch die feuchtwarmen Tage im Sommer wird ein großer Teil der Leistung für das Kondensieren der Luftfeuchtigkeit benötigt. Um den Luftwechsel zu minimieren wird ein Luftvorhang am Eingang vorgesehen. Neben der Nutzung für Medikamentenkühlung kann der Raum auch zur Lebensmittelkühlung verwendet werden.

Der Eisspeicher soll durch einen Naturumlaufverdampfer, auch Zweiphasen-Thermosiphon genannt, geladen werden. Dafür wird das Kältemittel im Kaskadenwärmeübertrager verflüssigt und fließt in den Hochdrucksammler, der am höchsten Punkt im Container angebracht ist, um einen statischen Druck durch die flüssige Kältemittelsäule zu erzeugen. Das Kältemittel fließt entweder direkt zum Verdampfer in den -30°C Raum oder in den Naturumlaufverdampfer. Der Naturumlaufverdampfer befindet sich direkt unterhalb des Sammlers und besteht aus mehreren Rohrschleifen, die in einem Wassertank liegen. Alles zusammen bildet den Eisspeicher. Bei einer Temperatur unterhalb der Gefriertemperatur des Wassers beginnt eine Eisschicht auf den Rohren zu wachsen. Die dafür benötigte Wärme lässt das Kältemittel verdampfen und es strömt ohne den Einsatz von Pumpen zurück zum Kaskadenwärmeübertrager. Die Umwälzung des Kältemittels erfolgt aufgrund des Dichteunterschieds zwischen dem zugeführten flüssigen Kältemittel und dem abgeführten gasförmigen Kältemittel. Die treibende Kraft des Thermosiphons ist der Höhenunterschied zum darüber liegenden Hochdrucksammler.

Im Nachtbetrieb wird der Kreislauf umgekehrt und das heiße Gas nach dem Verdichter wird direkt von oben in die Rohrschlangen innerhalb des Eisspeichers geleitet. Das Eis nimmt die Enthitzung- und Verflüssigungswärme des Kältemittels auf und schmilzt. Im Gegenzug wird das Kältemittel verflüssigt und fließt zurück in den Hochdrucksammler. Der Eisspeicher kann durch den Naturumlaufbetrieb damit nachts als Verflüssiger und tagsüber als Verdampfer des Kältemittels verwendet werden.

Beim Einsatz des Naturumlaufverdampfers ändert sich der Wärmedurchgangskoeffizient vom gefrierenden Wasser zum Kältemittel mit der Beladung des Eisspeichers. Für die korrekte Auslegung eines solchen Systems ist es wichtig, den Druckabfall und das Strömungsverhalten vorherzusagen. Um eine möglichst geringe Kältemittelfüllmenge zu erzielen, sollte der kleinste Rohrdurchmesser berechnet werden, bei dem der Thermosiphon auch bei der erforderlichen Eisdicke an der Außenseite betrieben werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Simulation durchgeführt, mit der das Strömungsverhalten, die benötigte Rohrlänge und der Druckabfall für verschiedene Rohrinnendurchmesser und zunehmende Eisdicke ermittelt werden. Dafür wird eine Rohrschlange mit variabler Länge simuliert.

Wie bereits erläutert, werden für die Stromversorgung Photovoltaik-Module auf dem Container installiert. Diese decken die Stromversorgung an 90 % der Tage vollständig. Die Abschätzung bezieht sich auf die Wetterdaten der letzten 20 Jahre am Standort Burkina Faso, Léo. Dem Kühlcontainer stehen neben der Photovoltaik-Anlage ein elektrischer Lithium-Eisenphosphat Speicher und der Eisspeicher zur Pufferung überschüssiger Energie zur Verfügung. Da die Kälteleistung des Containers bereits für einen „worst-credible“- Szenario ausgelegt ist, wird von einer Autarkie des Gesamtsystems über 90 % ausgegangen. Als Absicherung wird ein Dieselgenerator mitgeliefert, um die Kühlkette der sensiblen Medikamente zu gewährleisten. Zudem wird eine Redundanz des Gesamtsystems erreicht, in dem die Kälteanlage mit halber Leistung in zwei identischen Ausführungen realisiert wird.

Da das Ziel des Projektes ist, abgelegene Krankenhäuser in Afrika anzusprechen und zu versorgen, ist der Service nach einem Ausfall der Anlage mit hohem Zeitaufwand verbunden. Um einen Verderb der gelagerten Ware zu verhindern, muss die Anlage redundant ausgeführt sein. Folgende Tabelle fasst die Auslegungsparameter des Kühlcontainers zusammen.

Tabelle 1: Auslegungsparameter des SophiA-Kühlcontainers für Burkina Faso

SophiA-Kältesystem: Auslegungsparameter für Burkina Faso			
Umgebungsbedingungen			
Maximum ambient temperature			40 °C
Lufttemperatur und –feuchtigkeit im März		Temperatur	32 °C
		Feuchtigkeit	34,1 % / 11,53 g/m³
Lufttemperatur und –feuchtigkeit im August		Temperatur	26 °C
		Feuchtigkeit	87,2 % / 21,24 g/m³
Temperaturniveaus			
	+5 °C	**-30 °C**	**-70 °C**
Külgut	Medizin und Lebensmittel	Protein-basierte Medikamente	Sensible Medizin und Impfstoffe
Container part	Yes	Yes	No (konventionelle Tiefkühltruhe)
Masse Trockenmedizin	427 kg	-	-
Masse Flüssigmedizin	82 kg	43,1 kg	5,3 kg
Abkühlzeiten	24 h	12 h	12 h
Luftwechselrate	2/h	1/h	3/h
Begehungszeit	6/h	5/h	-
Kälte-Technologien	R290/R744 Kaskadenkältesystem mit Eisspeicher	R290/R744 Kaskadenkältesystem	R170 modifizierte Tiefkühltruhe
Kälteleistungen	2,5 kW	2,35 kW	120 W
Energieversorgung	PV modules: Solar power		
Auslegungsstandard	DIN EN 378 1-4		

3 SEER-Berechnung

Um die Effizienz der Gesamtkälteanlage abzuschätzen, wird die SEER-Berechnung nach DIN EN 14825 abgewandelt auf die Kältesysteme angewendet. Der SEER-Wert bezeichnet den „Seasonal Energy Efficiency Ratio“, eine Effizienzkennzahl, die den jährlichen Verlauf der tatsächlichen Leistungen berücksichtigt. Der SEER-Wert basiert auf dem EER-Wert, dem „Energy Efficiency Ratio“, der das Verhältnis der Nennleistung zum Stromverbrauch im Nennlastbetrieb angibt und so die Effizienz im Volllastbetrieb wiederspiegelt.

Die Norm DIN EN 14825 beschreibt unter anderem die Berechnung der SEER-Werte für Klimaanlagen in Europa. [5] Da die Leistung einer Klimaanlage von der Außentemperatur abhängig ist, wird die Klimaanlagen nur wenige Tage im Jahr unter Volllast betrieben. Einige Tage im Jahr, steht die Anlage still und weitere Tage im Jahr läuft die Anlage lediglich in Teillast. Aufgrund dieser Tatsache ist es unerlässlich, den EER-Wert einer Klimaanlage in Abhängigkeit der Außentemperatur und damit dem tatsächlichen Leistungsprofil über ein Jahr zu einem SEER-Wert zu korrigieren. Ziel dabei ist, eine Vergleichbarkeit der SEER-Werte, also der Effizienzkennzahlen einer Klimaanlage, zu erreichen.

Ähnlich wie bei Klimaanlagen sind Leistung und Stromverbrauch des Kühlcontainers des SophiA-Projektes stark abhängig von der Außentemperatur, da der Wärmeeintrag in den Container sowie die Entfeuchtung der Luft den auschlaggebenden Teil der Wärmelasten bilden. Somit ist eine reine Aufstellung des EER-Wertes unter Volllastbedingungen nicht ausreichend, um die Gesamteffizienz der Anlage über das Jahr abzuschätzen. Um einen realistischeren Wert der Effizienz zu erhalten, wird der SEER-Wert der Anlage nach dem Prinzip der Berechnung in der DIN EN 14825 ermittelt. Da die Anlage keine Klimaanlage ist und des Weiteren in Afrika und nicht in Europa aufgestellt wird, erfolgt die Berechnung lediglich nach dem Prinzip der Norm, basiert dabei jedoch auf neu ermittelten Temperaturbedingungen und Betriebsstunden. Die Anzahl an Stunden für die Temperaturstufen von 17 bis 40 °C sind in Anhang 1 zu finden.

Folgende Tabelle fasst die EER-Werte, die SEER-Werte und die $SEER_{on}$-Werte für die Propan- und die CO_2-Stufe des Kühlcontainers zusammen. Dabei werden jeweils die Werte berücksichtigt, welche den Stromverbrauch des Kompressors und den Gesamtstromverbrauch der Anlage einbeziehen. Die Propan-Anlage umfasst dabei die gesamte obere Stufe der Kaskadenkälteanlage inklusive Eisspeicher und Lüfter für den Eisspeicher. Die CO_2-Stufe umfasst die untere Stufe der Kaskadenkälteanlage. Hierbei ist zwingend zu beachten, dass die Werte auf Leistungen und Stromverbräuche basieren, die anhand eines Auslegungstools rechnerisch ermittelt oder abgeschätzt wurden. Die tatsächlichen Leistungen und Verbräuche können erst im Laufe des Projektes gemessen werden, wenn der Aufbau der Laboranlage abgeschlossen ist.

Table 2 EER-, SEER- und $SEER_{on}$-Werte des Propan- und CO_2-Systems der SophiA-Kühlcontainer

	Propane system	**CO_2 system**
$EER_{compressor}$	2,34	3,85
$SEER_{on,compressor}$	3,24	3,85
$SEER_{compressor}$	2,97	3,68
EER_{system}	1,98	2,06
$SEER_{on,system}$	2,54	2,02
$SEER_{system}$	2,37	1,98

Der $SEER_{on}$-Wert berücksichtigt lediglich die Korrektur des EER-Wertes anhand der Außentemperaturen und damit bezogen auf das tatsächliche Leistungs- und Lastprofil der Anlagen. Der SEER-Wert berücksichtigt zusätzlich die tatsächlichen Stunden im Aktiv-Modus und im Standby-Modus der Kälteanlage. Andere Betriebsmodi nach Norm kommen bei den Kältesystemen des Kühlcontainers nicht vor. Die Betriebsstunden im Aktiv-Modus und im Standby-Modus der Systems sind in Anhang 1 zu finden. Da hier der Verbrauch im Standby-Modus nur abgeschätzt werden konnte, stellt der Wert nur eine erste theoretische Abschätzung dar.

Insgesamt ist noch zu berücksichtigen, dass die Berechnung der SEER-Werte darauf basiert, dass täglich neue Medizin angeliefert und abgekühlt wird. In der Realität wird das jedoch nicht der Fall sein und Medizin wird aufgrund der mangelnden Lieferketten mindestens nur jede Woche oder sogar nur jeden Monat angeliefert. Damit werden sich die Effizienzkennwerte aus TabelleTable 2 in der Praxis voraussichtlich noch erhöhen.

4 Simulationsergebnisse des Eisspeichers

Die Simulationsergebnisse des Naturumlaufverdampfers sollen den Nachweis erbringen, dass der ausgelegte Wärmeübertrager auch bei einer wachsenden Eisschicht funktionsfähig ist. Die Funktionsweise eines Naturumlaufverdampfers, auch zweiphasiger Thermosiphon genannt, basiert auf dem Dichteunterschied zwischen flüssiger und gasförmiger Phase. In einem Fallrohr befindet sich eine reine flüssige Phase, welche einen hydrostatischen Druck auf das dahinter befindliche Rohrsystem des Wärmeübertragers ausübt. Beim Durchströmen des Rohrsystems verdampft die Flüssigkeit, wodurch der natürliche Umlauf entsteht. Der hydrostatische Druck muss dabei so groß sein, dass er den gesamten Druckverlust beim Durchströmen überwindet. Der Gesamtdruckverlust setzt sich aus dem Reibungsdruckverlust, dem statischen Druck im Wärmeübertrager und dem Beschleunigungsdruckverlust beim Phasenübergang zusammen. Auf die genauen Berechnungsformeln wird im Rahmen dieses Manuskripts nicht eingegangen. Diese werden im Paper “Self-sufficient Propane-CO2 cascade with two-phase

thermosiphon - Simulation of an evaporating two-phase flow with variable heat transfer coefficient" Oliver Schmid et al. aufgeführt [7].

Zunächst wird der aufgenommene Wärmestrom ermittelt. Dieser berechnet sich aus der Masse des Eises, welche für 36 Stunden als Wärmesenke der Kaskade benötigt wird, und der Zeit, die für die Eisproduktion zur Verfügung steht. Anschließend werden die Geometrie des Verdampfers sowie die Startparameter in die Simulation eingepflegt. Die thermodynamischen Größen werden mit Hilfe der Datenbank „CoolProp" ermittelt. Es wird bei der Simulation nicht nach einer festen Länge diskretisiert, sondern nach dem Dampfmassenanteil (siehe Abbildung 5). Grundlage für die folgenden Berechnungen ist die Strömungsform im betrachteten Rohrabschnitt. Die Berechnungen werden nach Kapitel H3.1 „Strömungsformen in Verdampferrohren", Kind des VDI Wärmeatlas 2016 entnommen [8]. Damit lassen sich die drei Druckverluste als Funktion der Länge des Rohrabschnittes berechnen. Die Länge eines Rohrabschnitts ermittelt sich aus dem Wärmedurchgang, welcher sich mit wachsender Eisdicke und Dampfmassenanteil ändert. Der Druckverlust wird in die Berechnung des nächsten Rohrabschnitts einbezogen, wodurch alle thermodynamischen Parameter neu berechnet werden müssen. Der Dampfmassenanteil wird mit einer festen Schrittweite erhöht und die Simulation wird erneut durchgeführt, bis der Dampfmassenanteil eine vollständige Verdampfung ergibt (siehe Abbildung 6). Die Länge und der Druckverlust des Naturumlaufverdampfers werden für eine feste Eisdicke berechnet. Die Eisdicke wird nach erfolgreicher Simulation ebenfalls um eine feste Schrittweite erhöht.

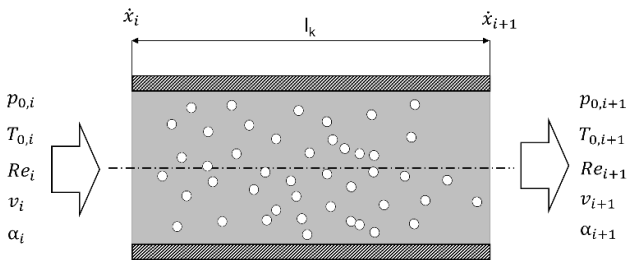

Abbildung 5: Ein- und ausgehende Parameter eines Inkrements

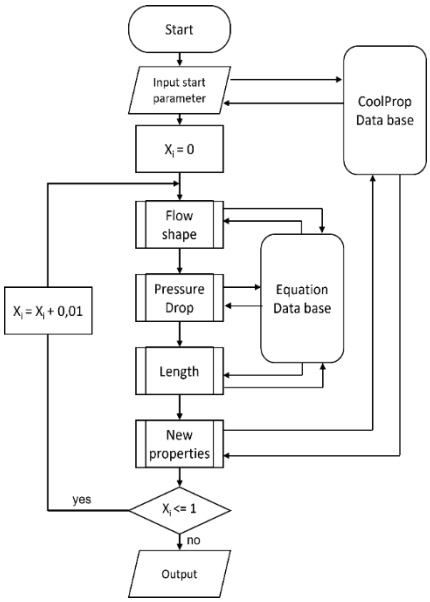

Abbildung 6: Simulationsablauf für eine Eisdicke

Die erforderliche Rohrlänge ermittelt sich aus der benötigten Eismasse und der Eisdicke auf dem Rohr. Diese bildet ein Schnittpunkt mit der durch die Simulation berechneten Mindestrohrlänge für die Wärmeübertragung bei einer homogenen Eisdicke. Aus der Länge des Rohres lässt sich die Höhe des Naturumlaufverdampfers mittels der Geometrie berechnen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Es wird eine Eisdicke von 34 mm benötigt. Um den erforderlichen Wärmestrom bei der Eisdicke aufzunehmen bedarf es einer Rohrlänge von 24,47 m, was bei der gegebenen Geometrie eine Wärmeübertragerhöhe von 1,29 m ergibt.

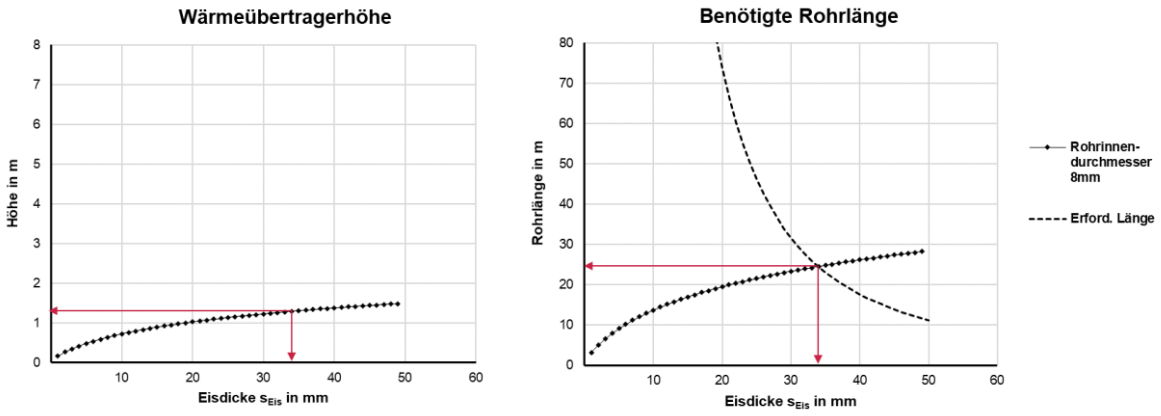

Abbildung 7: Simulationsergebnisse - Rohrlänge und Wärmeübertragerhöhe

Die ermittelten Werte des beeisten Naturumlaufverdampfer werden bezüglich des Druckverlustes weiter analysiert. Abbildung 8 zeigt stellt den Druckverlust über die Rohrlänge des 24,47 m langen Rohres bei einer Eisdicke von 34 mm. Zu- und Ablauf des Wärmeübertragers befinden sich beide auf einer Höhe von 1,29 m. Ab einer Rohrlänge von 13,69 m ist der treibende Druck durch die Flüssigkeitssäule genauso groß wie der Druckverlust. Damit der zweiphasige Thermosiphon dennoch funktioniert muss die Länge des Fallrohres vergrößert werden. Für den betrachteten Fall muss der Zulauf des flüssigen Kältemittels mindestens 0,92 m über dem Austritt liegen, wo das Kältemittel vollständig verdampft ist. Die Höhe des Wärmeübertragers und der zusätzlichen Höhe des Fallrohres ergeben eine Gesamthöhe von 2,21 m. Ein 40 Fuß ISO-Container hat im Innern eine Höhe von 2,35 m. Da im SophiA Projekt die Wände von Innen isoliert werden und Bauraum für den Hochdrucksammler benötigt wird, muss die Geometrie des Naturumlaufverdampfers geändert werden. Dies wird erreicht, wenn bei gleicher Rohroberfläche und Eisdicke die Austrittshöhe verringert wird. Eine Möglichkeit wäre, die Anzahl an Rohrwendeln im Eisspeicher zu erhöhen.

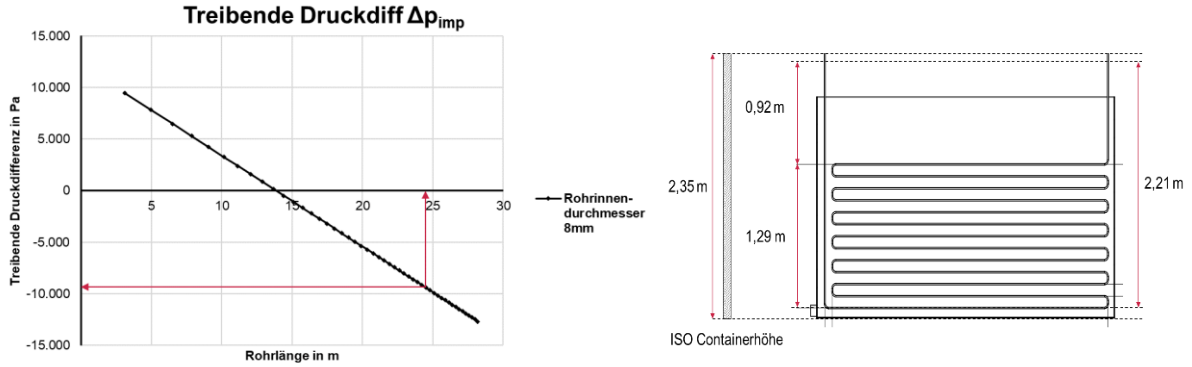

Abbildung 8: Simulationsergebnis Druckdifferenz und Maße des Naturumlaufverdampfers

5 Fazit

Das vorliegende Manuskript beschreibt die Auslegung und die Technologien der SophiA-Kältesysteme zur Realisierung von drei Temperaturniveaus bei +5 °C, -30 °C und -70 °C zur Lagerung von Medizin und Lebensmitteln. Die solarbetriebenen, redundanten und autarken SophiA-Kältesysteme werden in einem 40-Fuß Container installiert und an vier Pilotstandorten in afrikanischen Krankenhäusern getestet. Der Container wird in drei Bereiche unterteilt, die den Maschinenraum, einen -30 °C-Raum und einen +5 °C-Raum umfassen. Im -30 °C-Raum befinden sich zudem adaptierte Tiefkühltruhen zur Realisierung von -70 °C.

Die Auswertung der Wetterdaten hat eine Auslegungstemperatur von 40 °C sowie Luftfeuchtigkeitswerte von 11,53 und 21,24 g/m³ am ersten Pilotstandort in Burkina Faso ergeben. Bei der Auslegung der einzelnen Temperaturniveaus wurden Wärmelasten in Folge von Wärmeeintrag aus der Umgebung, Wärmelasten des Kühlguts, Wärmelasten in Folge der Entfeuchtung der Außenluft sowie zusätzliche Wärmelasten von Personen und Geräten berücksichtigt. Die Massen des Kühlguts wurden dabei anhand der verfügbaren Lagerfläche und des Bedarfs der Krankenhäuser abgeschätzt. Es resultierten notwendige Kälteleistungen von 2,5 kW, 2,35 kW und 120 W für die einzelnen Temperaturniveaus auf +5 °C, -30 °C und -70 °C.

Die Temperaturniveaus von +5 °C und -30 °C werden über eine Kaskadenkälteanlage mit Propan R290 in der oberen Stufe und CO_2 R744 in der unteren Stufe realisiert. Adaptierte konventionelle Tiefkühlboxen erzeugen -70 °C. Beide Kältesysteme werden ausschließlich mit solarer Energie betrieben. Darüber hinaus ist die CO_2-Stufe der Kaskadenkälteanlage an einen Eisspeicher gekoppelt, der überschüssige Energie puffert. Der Eisspeicher wird über einen Naturumlaufverdampfer geladen sowie entladen und dient tagsüber als Verdampfer und nachts als Verflüssiger für das Kältemittel CO_2.

Um eine Effizienz der CO_2- und Propan-Kältesysteme abzuschätzen, wurde die Vorgehensweise der Berechnung von EER-, $SEER_{on}$- und SEER-Werten nach DIN EN 14825 auf die Systeme angepasst übertragen. Die Anpassung umfasst die Ermittlung der Außentemperaturstunden in Afrika und der tatsächlichen Betriebsstunden im Aktiv- und Standby-Modus. Eine erste theoretische Abschätzung der Werte ergab EER Werte von 1,98 und 2,06, $SEER_{on}$-Werte von 2,54 und 2,02 sowie SEER-Werte von 2,37 und 1,98 für das gesamte Propan- bzw. CO_2-System. Darüber hinaus wurden die Werte für den Fall ermittelt, dass nur die Verbräuche der Kompressoren berücksichtigt wurden, da alle Verbräuche lediglich abgeschätzt bzw. rechnerisch ermittelt werden konnten. Eine Validierung der ermittelten Werte mit den in der Praxis ermittelten Werten steht noch aus. Für die Werte in Bezug auf die Kompressor-Antriebsleistung ergeben sich EER-Werte von 2,34 und 3,85, $SEER_{on}$-Werte von 3,24 und 3,85 sowie SEER-Werte von 3,68 und 2,97 für das Propan- bzw. das CO_2-System.

Da sich der Wärmeübertragungskoeffizient mit wachsender Eisschicht auf der Wasserseite im Eisspeicher verschlechtert, erfolgte eine Simulation der Eisschichtdicke für den ausgelegten Rohrdurchmesser. Die Simulation hat ergeben, dass die Flüssigkeitssäule im Zulauf des Naturumlaufverdampfers 0,92 m über dem Ablauf liegen muss, wo das Kältemittel vollständig verdampft austritt. Die Gesamthöhe des Eisspeichers mit zweiphasigem Thermosiphon würde theoretisch in einen ISO-Container passen. Unter Berücksichtigung der Höhe des Hochdrucksammlers und der vorgesehenen Isolierung sollte die Geometrie des Naturumlaufverdampfers jedoch angepasst werden.

Durch den Einsatz der nachhaltigen Technologie an afrikanischen Standorten kann zur Entwicklungshilfe direkt beigetragen werden. Zusätzlich werden Kapazitäten in der Bevölkerung aufgebaut, wobei das Ziel ist, Handwerker und Ingenieure an den Containern auszubilden. In Zukunft soll die Wartung und Reparatur der Anlage von den lokalen Firmen übernommen werden. Die Kälteanlage wird nach den neusten Erkenntnissen nachhaltiger Technologien aufgebaut und berücksichtigt gleichzeitig die eingeschränkten Lieferketten in den Ländern. Europäische Standards zur sicheren Verwendung von brennbaren Kältemitteln wurden ebenfalls eingehalten. Alle verwendeten Kältemittel und Speichermedien haben nur sehr geringe Auswirkungen auf Menschen und Umwelt. Im Laufe des Projektes steht noch der Abschluss des Aufbaus der Laboranlage sowie die Produktion der vier Container für die Pilotstandorte aus. Es folgen umfangreiche Tests zur Regelstabilität, Funktionsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Effizienz der Anlage.

6 Literaturverzeichnis

[1] International Energy Agency. 2019. Africa Energy Outlook 2019. Paris : IEA, 2019.

[2] R. W. 2019. A spatial database of health facilities managed by the public health sector in Sub saharan Africa. Science Data. 134, 2019, Bd. 9.

[3] Bohara, K. 2022. Solar Radiation Modelling and Expected Energy for the Four Trials Location. Schweiz : European Union's Horizon 2020 research and innovative program, 2022.

[4] Herr, H. 2011. Tabellenbuch Wärme Kälte Klima. Haan-Gruiten: VERLARG EUROPA-LEHRMITTEL, 2011. Auflage 11.

[5] DIN EN 14825. Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung - Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der jahreszeitbedingten Leistungszahl. Deutsche Fassung EN 14825:2018.

[6] Renewables.Ninja Solar PV (Point API). https://www.renewables.ninja/. Letzter Aufruf am 05.10.2022.

[7] Schmid, O. et al, 2022. Self-sufficient Propane-CO2 cascade with two-phase thermosiphon - Simulation of an evaporating two-phase flow with variable heat transfer coefficient, Trondheim, DOI: 10.18462/iir.gl2022.0036

[8] Kind, M., 2013. VDI-Wärmeatlas. H3 Strömungssieden. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. p.895 – p.1009

Anhang 1: Stunden für Außentemperaturen und Modi für SEER-Berechnung [5] [6]

Table 3 Stunden für Außentemperaturen in Afrika und Europa für die SEER-Berechnung [5][6]

DIN EN 14825			African hours for CO_2 system	African hours for propane system
j	Tj	hj	$hj_{africa,co2}$	$Hj_{africa,propane}$
1	17	205	229	2
2	18	227	142	27
3	19	225	151	37
4	20	225	152	42
5	21	216	176	53
6	22	215	250	100
7	23	218	579	201
8	24	197	839	251
9	25	178	823	238
10	26	158	708	227
11	27	137	602	196
12	28	109	556	193
13	29	88	615	214
14	30	63	549	219
15	31	39	465	170
16	32	31	430	156
17	33	24	367	131
18	34	17	265	102
19	35	13	198	89
20	36	9	156	60
21	37	4	156	38
22	38	3	116	37
23	39	1	90	28
24	40	0	146	53
Total		**2602**	**8760**	**2864**

Table 4 Stunden im Betriebsmodus Aktiv und Standby der SophiA-Kältesysteme

Modus	CO_2 system [h]	propane system [h]
Aktiv	7446	2920
Standby	1314	5840