

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

IBP-Bericht PGE-002/2023

EcoCab

Entwicklung einer digitalen Entwicklungsplattform für eine autarke und nachhaltige Niedrigenergieka- bine

Gefördert durch
das BMWI
FKZ 03SX475B

Der Bericht umfasst
47 Seiten Text
4 Tabellen
14 Abbildungen

Tobias Schöner
Katrín Lenz
Christina Matheis

Holzkirchen / Stuttgart, März 2023

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Abteilungsleitung

Bearbeiter

Thomas Kirmayr

Tobias Schöner

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-00
Telefax +49 711 970-3395
www.ibp.fraunhofer.de

Standort Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-0
Telefax +49 8024 643-366

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Kurzdarstellung	4
1.1 Aufgabenstellung	4
1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben	4
1.3 Planung und Ablauf	5
1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Klimatisierung	5
1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2 Eingehende Darstellung	7
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	7
2.1.1 Nachhaltigkeitsbewertung: Zielsetzung und Vorgehen	7
2.1.2 Definition einer nachhaltigen Schiffskabine	8
2.1.3 Bewertungskriterien und Methodik	9
2.1.4 Spezifikation von Anforderungen und Potentialabschätzung eingesetzter Technologien	13
2.1.5 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	16
Beschreibung des Klimasystem in der EcoCab	16
2.1.6 Multikriterielle Qualitätsbewertung	39
2.2 Positionen zum zahlenmäßigen Nachweis	46
2.3 Verwendbarkeit der Ergebnisse	46
2.4 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	47
2.5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	47
Literaturverzeichnis	48

Abkürzungsverzeichnis

LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
EPD	Environmental Product Declaration
C2C	Cradle to Cradle
EPC	EMS PreCab
MW	MEYER WERFT
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Institut für vernetzte Energiesysteme
Uni Lü	Leuphana Universität Lüneburg
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik
MAC	MAC Hamburg
ATU	Air Treatment Unit
EPC	EMS PreCab
FCU	Fan Coil Unit
FMU	Functional Mockup Unit
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik
IESS	Indoor Environmental Simulation Suite
MAC	MAC Hamburg
MW	MEYER WERFT & GmbH & Co.KG
PMV	Predicted mean vote (persönliches Wohlbefinden)
PPD	Projected percentage of dissatisfied (Unzufriedenheitsprozentsatz)

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Den Kabinen an Bord eines Kreuzfahrtschiffes kommt eine besondere Bedeutung zu. Zum einen sind sie das Aushängeschild für die Reederei und die Werft und zum anderen stellen sie den Rückzugsort für die Passagiere und die Crew an Bord dar, wodurch sie einen großen Einfluss auf das Wohlbefinden der Personen an Bord nehmen. Hinzu kommt, dass die Kabinen innerhalb eines Kreuzfahrtschiffes aufgrund ihrer Vielzahl und dem daraus resultierenden großen Anteil der Materialien des gesamten Schiffes einen entscheidenden Baustein für die Nachhaltigkeit des gesamten Schiffes darstellen. Des Weiteren verursacht die Bereitstellung des gewünschten Komforts und der Behaglichkeit für die Menschen an Bord einen maßgeblichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch des Schiffes.

Vor diesem Hintergrund hat sich das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP im Rahmen des Forschungsprojektes EcoCab das Ziel gesetzt gemeinsam mit Partnern aus der Industrie und Wissenschaft eine nachhaltige und dezentral versorgte Niedrig-Energiekabine zu entwickeln, die trotz minimierter Umweltwirkungen und reduziertem Energieverbrauch einen positiven Einfluss auf die Behaglichkeit und das Wohlbefinden der Nutzer an Bord nimmt.

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Die Aufgaben des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP konzentrieren sich auf Forschung, Entwicklung, Prüfung, Demonstration und Beratung auf den Gebieten der Bauphysik. Dazu zählen z. B. der Schutz gegen Lärm und Schallschutzmaßnahmen in Gebäuden, die Optimierung der Akustik in Auditorien, Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und Optimierung der Lichttechnik, Fragen des Raumklimas, der Hygiene, des Gesundheitsschutzes und der Baustoffemissionen sowie die Aspekte des Wärme-, Feuchte- und Witterungsschutzes, der Bausubstanzerhaltung und der Denkmalpflege. Durch einschlägige Materialdatenbanken u.a. in den IBP eigenen Software Tools WUFI® und Generis ist der Zugriff auf detaillierte materialspezifische Informationen zur Nachhaltigkeitsbewertung und den Materialeigenschaften möglich. Des Weiteren konnten die Erfahrungen aus dem Hochbau aus Projekten wie »Bauen mit Weitblick« und »VASE« als Grundlage für eine Übertragung auf den maritimen Bereich genutzt werden.

Das Fraunhofer IBP arbeitet zusammen mit Industriepartnern an der Markteinführung neuer und umweltverträglicher Baustoffe, Bauteile und Bausysteme. Zu den Kunden zählen vor allem Unternehmen der Bauindustrie, dem Maschinen- und Anlagenbau, Bauträger und Architekten, Planer und Behörden sowie öffentliche und private Bauforschungsträger. Ein Teil der hierfür verwendeten Versuchsfächen und Anlagentechnik-komponenten war für die empirische Validierung der Simulationsmodelle durch einen Mock-Up der EcoCab notwendig.

In den letzten Jahren wurden zudem konsequent neue dynamische Simulationsumgebungen für wichtige Fragestellungen der Bauphysik entwickelt. Dies ermöglicht neben dem klassischen Entwicklungsprozess anhand von physischen Prototypen ein »Virtuelles Engineering«, welches anhand von digitalen Zwillingen die Entwicklungsprozesse deutlich beschleunigen kann. Dieses Know-how bildete die Voraussetzung für die Erstellung der hygrothermischen-, energetischen- und thermischen Behaglichkeitsmodelle sowie der virtuellen Entwicklungsplattform.

1.3 Planung und Ablauf

Die Arbeitsfelder im EcoCab Projekt wurden entsprechend der unten abgebildeten Struktur (Abbildung 1) in insgesamt 7 Arbeitspakete unterteilt. Das Fraunhofer IBP war für die Arbeitspakete 1 und 6 verantwortlich. Die Darstellung der Ergebnisse konzentriert sich daher auf diese beiden Arbeitspakete.

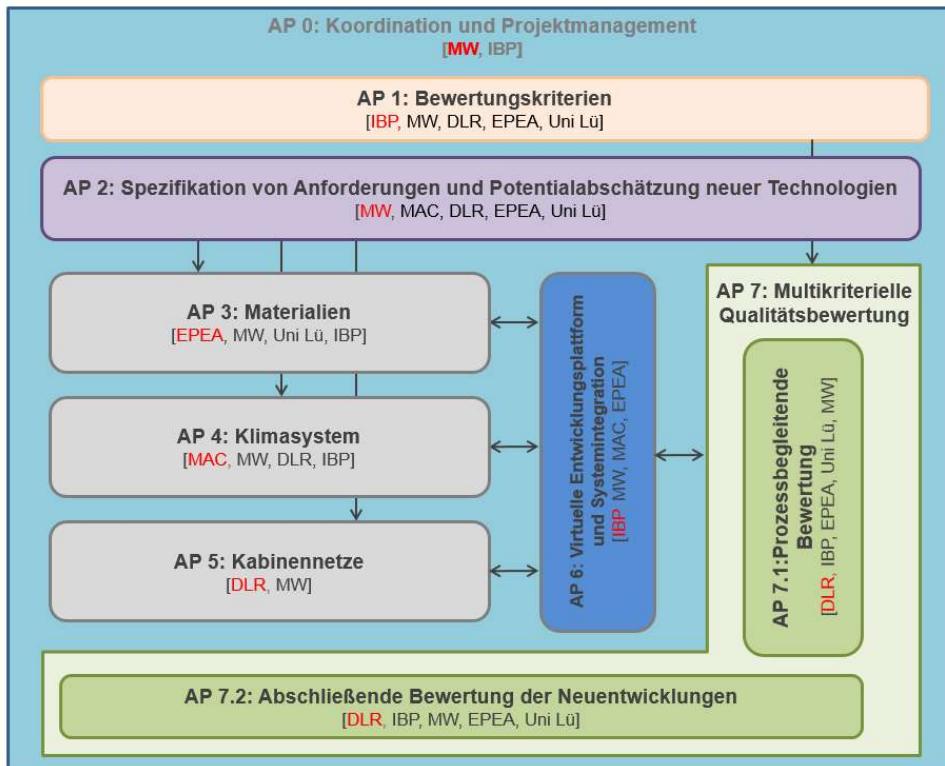


Abbildung 1: Projektstruktur im EcoCab

Das Arbeitspaket 1 befasst sich mit der Bestimmung von Bewertungskriterien. Hierbei galt es unterschiedliche Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung zu sichten und maritime Bewertungskriterien abzuleiten und auszugestalten, so dass eine ganzheitliche Bewertung der Kabine im Projekt möglich wurde. Im Rahmen des Arbeitspaketes 6 wurde eine virtuelle Entwicklungsumgebung erstellt. Sie ermöglicht es im Rahmen von Parameter Simulationen Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit, der Schadensfreiheit und des Energiebedarfs zu betrachten. Diese wurde anhand empirischer Untersuchungen eines realen Mock-Up der Kabine zuvor validiert.

1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Klimatisierung

Die Klimatisierung auf Passagierschiffen basiert auf einem zentralen Konzept, wobei die Klimageräte von sogenannten Klimazentralen oder AC-Räumen aus, die unterschiedlichen Schiffsbereich über ein verzweigtes Netz von Lüftungskanälen versorgen. Vor Allem bei Kreuzfahrtschiffen mit vielen Kabinen, kommen dadurch viele Kilometer Kanäle mit tonnenschwerem Gewicht zusammen. Hinzu kommt, dass über die teilweise sehr langen Distanzen, oft über mehrere Decks, große Druckverluste entstehen, die von den Lüftungskomponenten überwunden werden müssen. Weitere Nachteile des zentralen Systems sind, dass Ausfälle einzelner Systeme aufgrund der seriellen Verschaltung größere

Bereiche beeinflussen können und dass größere Bereiche lufttechnische gekoppelt sind, was im Falle von Krankheitserregern im System eine weitreichende Kontamination begünstigt.

Der bei EcoCab verfolgte Ansatz, die Klimatisierung der Kabinen durch dezentrale, möglichst autark funktionierende Klimageräte zu realisieren, zählt im Landbau, maßgeblich in der Gebäudetechnik schon seit langem zum Stand der Technik und findet vor allem bei einzelnen Wohn- oder Büroeinheiten Verwendung. Für den Schiffbau kommt dieses Prinzip bislang nicht zur Anwendung. Die größten Hindernisse Herausforderungen liegen in der erhöhten Anzahl an Einzelkomponenten, mit verbundem Aufwand für Installation, Inbetriebnahme, Regelung und Wartung sowie dem damit verbundenen Kostenaufwand. Daher ist neben den technischen Anforderungen auch eine wirtschaftliche Lösungsvariante im Fokus bei EcoCab.

Durch den Einsatz der ATU, die Frisch- und Abluft über eigene Anschlüsse im Balkonbereich transportieren, werden die Haupt- und Verteilkanäle von den zentralen Klimazentralen in die Kabinenbereiche eingespart.

1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Beauftragung Dritter fand während des EcoCab-Projektes durch das Fraunhofer IPB nicht statt. Sämtliche in dem Projekt erarbeiteten Ergebnisse sind durch eigenes Know-how, mit Hilfe der Projektpartner und der assoziierten Partner entstanden.

Die am EcoCab Projekt beteiligten Partner, mit denen das Fraunhofer IPB zusammen gearbeitet hat, sind:

- DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme (DLR)
- EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer (EPEA)
- Leuphana Universität Lüneburg (Leuphana)
- MAC Hamburg GmbH (MAC)
- MEYER WERFT (MW)

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

2.1.1 Nachhaltigkeitsbewertung: Zielsetzung und Vorgehen

Die Bewertung und Analyse von Aspekten der Nachhaltigkeit im Schiffbau im Projekt Eco-Cab (insb. mit Fokus auf die Entwicklung von Technologien und Materialien für Schiffsinnen) erforderte zu Beginn die Etablierung einer Definition für den Themenkomplex »Nachhaltigkeit«. Weiterhin mussten geeignete Kriterien (Bewertungskriterien) abgeleitet, festgelegt und entwickelt werden, die durch die Auswahl geeigneter Methoden zur Ermittlung und Bestimmung gestützt werden. Ziel war hierbei, die im Projekt erarbeiteten Lösungen zur Weiterentwicklung der Schiffsinnen sowohl in den Dimensionen Ökologie, Ökonomie, Sozialem als auch Technik analysieren und einordnen zu können. Ein umfassender Beurteilungsrahmen im maritimen Bereich, der die Analyse unterschiedlicher Dimensionen der Nachhaltigkeit adressiert, war zu Projektbeginn noch nicht verfügbar. Aufbauend auf internen Vorarbeiten des Projektpartners MEYER WERFT zum Übertrag der Ansätze zur Nachhaltigkeitszertifizierung aus dem Hochbau in den maritimen Bereich, vorhandenen Ansätzen, Marktinstrumenten und Labels zur Nachhaltigkeitsbewertung sowie der jeweiligen Expertise der Verbundprojektpartner, war es das Projektziel, solch einen Beurteilungsrahmen im Arbeitspaket AP 1 zu entwickeln.

Der Beurteilungsrahmen bildete die Grundlage für die ersten Potenzialabschätzungen (AP 2) und greift Aspekte der Detailanalyse in den nachgelagerten technischen Arbeitspaketen (AP 3 bis AP 5) auf. Er diente ebenfalls als Basis um Ergebnisse und Daten für die multikriterielle Bewertung (AP 7) bereit zu stellen.

Die im Beurteilungsrahmen berücksichtigten Kriterien der Nachhaltigkeitsbewertung können nun einerseits bei der Entscheidungsfindung und Produktoptimierung im Hinblick auf die neu zu entwickelnden Systemlösungen für die zukünftige, nachhaltige und dezentral versorgte Niedrigenergiekabine unterstützen. Zum anderen sind sie ebenfalls auch in der Kommunikation mit Passagieren von Kreuzfahrtschiffen und/oder späteren Kabinen- bzw. Schiffseignern in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte dienlich.

Folgende Schritte wurden zur Ableitung des Beurteilungsrahmens im Projektkontext durch das Projektkonsortium unter der Leitung und wissenschaftlichen Mitarbeit des Fraunhofer IBP iterativ durchgeführt:

- Schritt 1: Festlegung einer einheitlichen Definition von Nachhaltigkeit;
- Schritt 2: Identifikation und Ableitung relevanter Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit (ökonomisch, ökologisch und sozial) von Technologie-/Materialentwicklungen im Projekt;
- Schritt 3: Prüfung der Übertragbarkeit von bestehenden Kriterien auf den maritimen Bereich;
- Schritt 4: Ergänzung der entwickelten Kriterien um maritim-spezifische Bewertungskriterien, z. B., weil diese nicht durch bestehende Methoden abgedeckt werden;

- Schritt 5: Entwicklung von Methoden zur Bewertung der abgeleiteten Kriterien und Prüfung der Übertragbarkeit von bestehenden Methoden zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Technologien/Materialien auf den maritimen Bereich;
- Schritt 6: Abschließende Überprüfung und Festlegung eines Bewertungsrahmens im Sinne einer multikriteriellen Qualitätsbewertung.

2.1.2 Definition einer nachhaltigen Schiffskabine

Der Begriff »Nachhaltigkeit« hat in den letzten Jahren zunehmend Verbreitung gefunden. Doch was genau versteht man unter Nachhaltigkeit? Was ist eine nachhaltige Schiffskabine?

Das erste Arbeitspaket des Projektes EcoCab (AP 1) zielte darauf ab eine einheitliche Definition von Nachhaltigkeit für den Schiffs(kabinen)bau zu erarbeiten.

In verschiedenen Arbeitstreffen zwischen Juni 2019 und März 2020 hat das Fraunhofer IBP gemeinsam mit den Verbundprojektpartner den Begriff der »Nachhaltigen Schiffskabine«, und damit die Grundlage des zukünftigen Entwicklungsziels, für das Projekt diskutiert und definiert. Ebenfalls wurden generelle Anforderungen an den Beurteilungsrahmen, Herausforderungen bei der Festlegung und Übertragbarkeit sowie ein möglicher Workflow erörtert.

Die Nachhaltigkeitsdefinition sollte sich an denen für den Landbau orientieren, wobei vor allem gängige Nachhaltigkeitsdefinitionen (1); (2); (3) berücksichtigt wurden. Außerdem hatte das Cradle-to-Cradle-Prinzip (C2C) einen maßgeblichen Einfluss auf die vom Konsortium erarbeitete Definition.

Unter »Nachhaltigkeit« versteht das **Projekt EcoCab** ein umfassendes, nutzenstiftendes und auf den langfristigen Erhalt von Systemen ausgelegtes Qualitätsverständnis. Dabei werden die drei gängigen Dimensionen der Nachhaltigkeitsbewertung und damit ökologische, ökonomische und soziale Aspekte gleichermaßen eingeschlossen sowie entsprechende Anforderungen formuliert. Das Qualitätsverständnis fördert soziale Gleichheit/Gerechtigkeit zwischen den Generationen (intergenerationell) und innerhalb jeder Generation (intragenerationell). Der Begriff der »Nachhaltigkeit im Schiffbau« konkretisiert dieses Qualitätsverständnis (ökologisch, ökonomisch, sozial) für den maritimen Bereich am Beispiel einer Schiffskabine (als Teil des maritimen Systems).

Für die spezifische Konkretisierung des Qualitätsverständnisses einer »Nachhaltigen Schiffskabine« im Projekt wurden zusätzlich Festlegungen und Aspekte für die Nachhaltigkeitsbewertung und Zertifizierung aus dem Gebäudebereich (z. B. (4) (5) (6) (7) und projektspezifische Qualitätsanforderungen aus vorhandenen Marktinstrumenten (z. B. (8)) berücksichtigt.

Das nachfolgende **Qualitätsverständnis einer »Nachhaltigen Schiffskabine«** ist im Projekt EcoCab abgeleitet und auf Basis der Diskussionen innerhalb des Projektkonsortiums zu Grunde gelegt:

Modular, vernetzt, autark, flexibel, kreislauffähig, gesund und energiepositiv: nachhaltige Schiffskabinen sind umfassend nutzenstiftend und entsprechen dem C2C-Designprinzip. Damit bieten sie den aktuellen und nachfolgenden Generationen einen Mehrwert.

Eine ökonomisch nachhaltige Schiffskabine zeichnet sich durch Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebensweg aus. Es werden insbesondere langfristig positive betriebs- und volkswirtschaftliche Effekte erzielt und dies auch weit über den Einsatz als Schiffskabine hinaus.

Eine sozial nachhaltige Schiffskabine besticht durch Materialgesundheit für Mensch und Umwelt und ein gutes Raumklima. Positive soziale Auswirkungen innerhalb von Lieferketten sowie während Bau, Nutzung und Demontage werden gefördert, weshalb die nachhaltige Kabine auch über die Lebensdauer hinaus zum menschlichen Wohlergehen beiträgt.

Eine ökologisch nachhaltige Schiffskabine definiert sich durch regenerative Kreisläufe bezogen auf Energie und Materialien. Energie für Herstellung und Betrieb der Kabine stammt aus erneuerbaren Quellen. Kabinenkomponenten sind sortenrein auf trennbar, um die verwendeten Materialien in biologische oder technische Nährstoffkreisläufe zurückzuführen, wodurch stoffabhängig eine Folgenutzung oder ein Recycling ohne Qualitätsverlust ermöglicht wird. Das Design und die Materialauswahl für die nachhaltige Kabine ermöglichen positive Wirkungen auf Mensch und Umwelt, von der Produktion über die Nutzung und das Recycling bis hin zur Wiedernutzung der Materialien oder Komponenten.

Damit werden Schiffskabinen sozial gerecht und zu langlebigen und werthaltigen Rohstoffdepots, welche die Ressourcen nach dem Ende der Nutzungszeit wieder freigeben und somit zum Werterhalt des ganzen Schifffes beitragen.

2.1.3 Bewertungskriterien und Methodik

Aufbauend auf der im Projekt erarbeiteten Nachhaltigkeitsdefinition wurden nachfolgend Kriterien bzw. Indikatoren identifiziert und entwickelt, welche die formulierten Nachhaltigkeitsziele messbar machen. Das Fraunhofer IPB erarbeitete die Kriterien/Indikatoren für die ökonomische Bewertung und das DLR diejenigen für die soziale und die ökologische Bewertung. EPEA verfügte schon vor Projektbeginn Zugang zum Kriterienkatalog, der für Zertifizierungen nach dem C2C-Prinzip verwendet wird, der ebenfalls für die Bewertungskriterien Berücksichtigung gefunden hat.

Vorgehen

Zur Ableitung der Bewertungskriterien im Projekt EcoCab wurde in Schritt 2 bis Schritt 6 das »Qualitätsverständnis« einer nachhaltigen Schiffskabine (ökologisch, ökonomisch, sozial) in Bezug auf den maritimen Anwendungsbereich weiter konkretisiert. Insbesondere die Bedürfnisse und Ansprüche von Reederei und Passagier: innen sollten Eingang in die Entwicklung der Kriterien erhalten. Ebenfalls wurden generelle Anforderungen an den Beurteilungsrahmen, Herausforderungen bei der Festlegung und Übertragbarkeit sowie ein

möglicher Workflow (u.a. zur Datenerhebung) sowie ein notwendiger Datenbedarf erörtert.

Es wurden hierzu relevante Kriterien zur Bewertung von Nachhaltigkeit sowohl:

- Identifiziert;
- In unterschiedliche Bereiche zugeordnet;
- Auf ihre wesentliche Bewertungsmethodik und Übertragbarkeit geprüft;
- Für die Analyse und Bewertung weiter ausgestaltet;
- Für die Potenzialabschätzung (AP 2) priorisiert sowie
- Abschließend im Rahmen der multikriteriellen Bewertung (AP 7) angewendet.

Ausgangspunkt für die Identifikation der Bewertungskriterien sowie die Prüfung der zu Grunde liegenden Bewertungsmethodik und Übertragbarkeit in den maritimen Sektor bildeten im Wesentlichen:

- die Kriterien der DGNB für das Nutzungsprofil »Innenräume« (5) und »Hotel, Neubau« (4),
- die BREEAM-Kriterien »In-Use International« (6),
- die LEED-Kriterien für »Interior Design and Construction« (7) sowie,
- die C2C®-Kriterien für den Goldstandard (8).

Die identifizierten Bewertungskriterien wurden in zwölf Bereiche zugeordnet und Verantwortlichkeiten - ausgehend von der Expertise der Projektpartner - festgelegt:

- Allgemeine Kriterien: abgeleitet aus C2C®Kriterien – verantwortlicher Projektpartner EPEA;
- Sonstige Kriterien: abgeleitet aus C2C®Kriterien – verantwortlicher Projektpartner EPEA;
- Kriterien zur Materialgesundheit: abgeleitet aus C2C®Kriterien – verantwortlicher Projektpartner EPEA;
- Kriterien zum Materialkreislauf beziehungsweise zur Produktzirkularität: abgeleitet aus C2C®Kriterien – verantwortlicher Projektpartner EPEA;
- Kriterien zum Einsatz Erneuerbarer Energie und Klima: abgeleitet aus C2C®Kriterien – verantwortlicher Projektpartner EPEA;
- Kriterien zum Wassermanagement: abgeleitet aus C2C®Kriterien – verantwortlicher Projektpartner EPEA;
- Kriterien zur sozialen Verantwortung: abgeleitet aus C2C®Kriterien – verantwortlicher Projektpartner EPEA;
- Kriterien zur Ökobilanz (Midpoint und Endpoint): abgeleitet aus ISO 14040/14044 – verantwortlicher Projektpartner DLR;
- Soziale Kriterien: abgeleitet aus Literaturanalyse, SLCA-Guidelines und wissenschaftlichem Know-how – verantwortlicher Partner DLR;
- Ökonomische Kriterien: abgeleitet aus DGNB/LEED/BREEAM-Kriterien und wissenschaftlichem Know-how – verantwortlicher Partner Fraunhofer IBP sowie
- Maritim-spezifische Kriterien: abgeleitet aus technischem Knowhow, gesetzlichen Vorgaben etc. – verantwortlicher Projektpartner MEYER WERFT;

- Technische Kriterien: abgeleitet aus DGNB/LEED/BREEAM-Kriterien sowie wissenschaftlichem Know-how – verantwortlicher Partner Fraunhofer IPB.

Für die **Prüfung auf Übertragbarkeit vorhandener Kriterien (Schritt 3)** und hierfür angewandter Methoden (Schritt 5) wurden die öffentlich verfügbaren Informationen der Nachhaltigkeitszertifizierung im Landbau (Hochbau) priorisiert. Es wurden Kriterien aus dem Bereich der Gebäudebewertung Hotelbau sowie aus dem Bereich der Nachhaltigkeitszertifizierung für Innenausbau und Innenräume für den Abgleich gewählt und im Anschluss durch die Projektpartner in ausgewählten Teilbereichen gesichtet. Als Ergebnis wurden u. a. qualitative Vorschläge zum Umgang und zur Integration der Kriterien (Abschluss aufgrund fehlender Passgenauigkeit für den maritimen Bereich, Erprobung und Übernahme etc.) im Rahmen des Projektes EcoCab abgeleitet. Aus Gründen des übergeordneten Projektziels, eine Schiffskabine zu entwickeln, die geeignet ist die C2C-Kriterien in gewissem Umfang widerzuspiegeln, wurde u. a. entschieden, die vorhandenen C2C-Kriterien im Goldstandard vollumfänglich in den Bewertungsrahmen zu integrieren.

Maritim spezifische Aspekte und Ergänzungen (Schritt 4) finden sich im Bewertungsrahmen in Form eigener Bewertungskriterien oder in der spezifischen Ausgestaltung von angepassten Bewertungskriterien (abgeleitet aus dem Landbau (Hochbau)) wieder. Maritim spezifische Bewertungskriterien sind mit technischer und ökologischer Ausrichtung im Bewertungsrahmen ergänzt. Technisch ausgerichtete, maritim-spezifische Kriterien sind z. B. Brandschutz, Schall und Vibrationen, Versorgungssicherheit (Safe Return to Port, SRtP), Luftqualität, Gewicht, Pflegeleichtigkeit und Raumausnutzung/-wirkung. Technisch ausgerichtete, maritim spezifische Bewertungskriterien stellten im weitere Projektverlauf für die Entwicklung der EcoCab-Kabine sogenannte »harte« Faktoren dar, da sie insbesondere gesetzliche Vorgaben adressieren und z. T. zwingend eingehalten werden müssen. Sie wurden daher u. a. dazu genutzt, eine Priorisierung und Vorauswahl für realistische Szenarien der Weiterentwicklung der Schiffskabine zu treffen, die im Rahmen der Potenzialabschätzung oder der prozessbegleitenden multikriteriellen Bewertung analysiert werden.

Ökologisch ausgerichtete, maritim-spezifische Bewertungskriterien, die im Bewertungsrahmen integriert wurden, sind z. B. die Zerstörung des Meeresgrunds, Überfischung, invasive Spezies und Plastikmüll im Meer. Aus Sicht der Arbeiten zur ökologischen Potenzialabschätzung (Arbeiten des Projektpartners DLR) und der prozessbegleitenden Bewertung (Arbeiten des Projektpartners DLR) hat sich im weiteren Projektverlauf ergeben, dass methodisch und wissenschaftliche Lücken zur Integration dieser Aspekte im Rahmen des Projektes nicht geschlossen werden können und weiterer Forschungsbedarf besteht.

Die **Prüfung auf Übertragbarkeit der den gewählten Bewertungskriterien zu Grunde gelegten wissenschaftlichen Methoden (Schritt 5)** hat gezeigt, dass auf bereits etablierte Methoden zurückgegriffen werden kann. Es wurde auf gängige Methoden wie der Ökobilanz (9) sowie der Lebenszykluskostenrechnung (10) zurückgegriffen. Es wurden aber auch Vorgaben der C2C-Zertifizierung genutzt. Im sozialwissenschaftlichen Bereich konnte auf Grundlagen der Sozialbilanz (11) aufgebaut werden. Ergänzt wurde die Ableitung von sozialen Bewertungskriterien über Literaturanalysen sowie die Durchführung explorativer Experteninterviews. Weiterführende Informationen zur Auswahl, Übertragbarkeit und Anpassung von Bewertungskriterien finden sich in den partnerspezifischen Berichten des Projektes EcoCab.

Die **Bewertungskriterien und der Beurteilungsrahmen** wurden im Projektverlauf und auf Basis der Ergebnisse der entwicklungsbegleitenden Analyse weiter präzisiert, z. T.

vereinfacht oder zusammengefasst und **abschließend dokumentiert (Schritt 6)**. Potenzielle Lücken wurden, sofern möglich, geschlossen. Die finale Zusammenführung der Bewertungskriterien im Sinne einer Gewichtung wurde im Rahmen der multikriteriellen Bewertung und unter Berücksichtigung anwenderbezogener Präferenzen der MEYER WERFT erprobt.

Das Ergebnis im Projekt stellt nun ein Beurteilungsrahmen dar, der knapp 170 relevante Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit (ökologisch, ökonomisch, sozial) umfasst. Er stellt damit ein umfassendes und komplexes Instrument dar, das sowohl Aspekte der Materialbewertung als auch der Bewertung der Schiffskabine in qualitativer und quantitativer Weise adressiert. Die Priorisierung und spezifische Ausgestaltung ausgewählter Kriterien sowie die Ergebnisse der entwicklungsbegleitenden Analyse mit Hilfe dieser Kriterien können den nachfolgenden Kapiteln entnommen werden.

Ökonomische Dimension

Lebenszyklusbasierte Analysen mit Hilfe der Methode der Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Costing, LCC) unterstützten im Projekt EcoCab, um entwicklungsbegleitend die mit den innovativen Systemlösungen für die zukünftige, nachhaltige und dezentral versorgte Niedrigenergiekabine verbundenen ökonomischen Potenziale über den Lebenszyklus ermitteln zu können.

Grundsätzlich können hierbei sowohl statische als auch dynamische Verfahren in Abhängigkeit der Anwenderperspektive (Abbildung 2) zur Anwendung kommen. Das Projekt EcoCab adressiert im Wesentlichen die Produzenten/Herstellersicht. Über die Weiterentwicklung der Kabine sind aber auch Teile der Betreiberperspektive inkludiert, z. B. über die Energieversorgung im Kabinenbetrieb oder den Austausch/Ersatz von Kabinenkomponenten im Rahmen der Nutzungsphase.

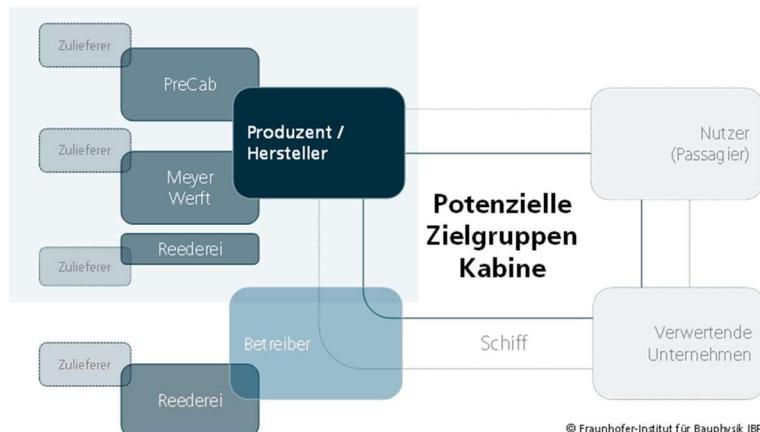


Abbildung 2: Potenzielle Zielgruppen (Stakeholder) für LCC im Projekt EcoCab

Die ökonomische Analyse im Projekt EcoCab wurde in Anlehnung an die internationale Normung zur Lebenszykluskostenrechnung im Bauwesen durchgeführt. Zunächst wurden hierfür Zielstellung (Warum soll analysiert werden?) und Untersuchungsrahmen (Was soll analysiert werden?) festgelegt. In Analogie zum Vorgehen bei der ökologischen Analyse im Rahmen der Ökobilanz (9) wurden im Rahmen der Sachbilanz anschließend spezifische Kosten entlang der Wertschöpfungskette erfasst, die u. a. im Zusammenhang mit denen für die Schiffskabine aufzuwendenden Material- und Energieflüssen stehen. Unter

Berücksichtigung von ökonomisch relevanten Einflussfaktoren wie zukünftiger Kostensteigerung, Verzinsung etc. wurden die ökonomischen Potenziale abschließend über das Instrument der Barwertmethode im Sinne der sogenannten Net Present Cost (NPV) (10) quantifiziert. Durch Diskontierung zukünftiger Kostenströme beziehungsweise Zahlungsströme (Cash-Flows) auf einen festgelegten zeitlichen Bezugspunkt werden verschiedene Designalternativen der Kabine vergleichbar – insbesondere, wenn der Betrachtungszeitraum oder auch die Höhe und der Zeitpunkt der zukünftigen Zahlungsströme in diesen Varianten variieren.

Im Gegensatz zum Begriff der Whole life cost (WLC) schließen die Life Cycle Cost (LCC) beispielsweise die Berücksichtigung externer Kosten oder nicht konstruktionsbezogener Kosten (z. B. Finanzierungs- und Entwicklungskosten) aus (siehe Abbildung 3).

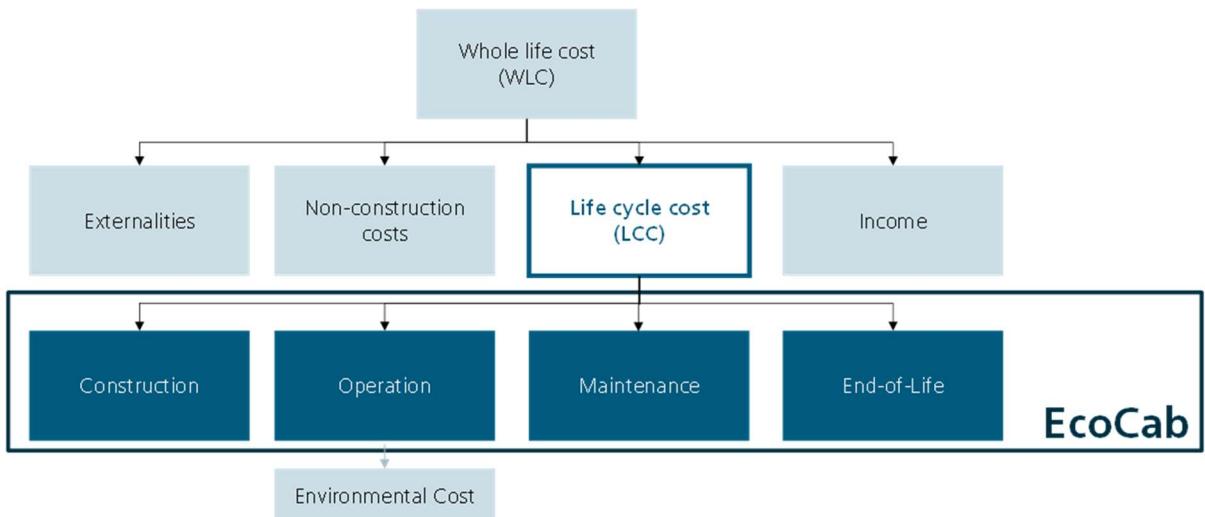


Abbildung 3: Lebenszykluskosten (LCC) im Projekt EcoCab - in Anlehnung an ISO 15686-5 (10)

2.1.4 Spezifikation von Anforderungen und Potentialabschätzung eingesetzter Technologien

Im Rahmen des AP 2 wurden bestehende Kabinentechnologien unter sozialen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten bewertet werden. Diese Erstbewertung diente als Referenz für die Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Material- und Technologiekonfigurationen bei der Weiterentwicklung der Schiffskabine zur Niedrigenergie-Kabine (EcoCab-Kabine).

Die Arbeiten des Fraunhofer IBP erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern DLR, Uni Lüneburg und MW. Ziel war hierbei eine gemeinsame Datengrundlage und konsistente Ansätze zum Aufbau notwendiger ökonomischer und ökologischer Lebenszyklusmodelle für die nachgelagerte multikriterielle Analyse (im AP 7) zu schaffen.

Im Rahmen der Potentialabschätzung beschäftigte sich das Fraunhofer IBP mit der ökonomischen Potentialabschätzung. Wesentliche Grundlagen und Ergebnisse der Analyse werden nachfolgend vorgestellt. Weiterführende Information zur ökologischen und sozialen Bewertung können dem Partnerbericht des DLR entnommen werden.

Ökonomische Potenzialabschätzung

Nachfolgend werden die wichtigsten Randbedingungen bzw. Festlegungen zur Ermittlung der ökonomischen Potenziale verschiedener Varianten der Weiterentwicklung der Schiffskabine aufgeführt. Ausgehend von einer gängigen, repräsentativen Schiffskabine (Referenzkabine) wurden hierbei verschiedene Varianten in unterschiedlicher Abstufung - bis hin zur Entwicklung der innovativen EcoCab-Kabine - analysiert.

Zielstellung

Zielstellung der ökonomischen Potenzialabschätzung durch das Fraunhofer IPB war es, die existierenden Schiffskabinen-Technologien und -Materialien ökonomisch zu bewerten. Hierbei wurde die Ausgangssituation im Sinne eines Screenings anhand einer Referenzkabine erfasst (AP 2.2), Optimierungspotenziale abgeleitet (AP 2.6) und die Anwendbarkeit der definierten ökonomischen Kriterien (AP 2.7) geprüft. Die Ergebnisse der ökonomischen Potenzialabschätzung sind zur Kommunikation nach intern (Projektpartner, MeyerWerft) und extern (Fördergeber, Forschung, interessierte Öffentlichkeit) bestimmt. Eine kritische (externe) Prüfung wurde nicht durchgeführt.

Untersuchungsrahmen

Als Referenzkabine (und damit als Ausgangspunkt für die Analyse) wurde eine repräsentative Schiffskabine, mit folgenden Eigenschaften zu Grunde gelegt:

- 2-Personen-Kabine der sogenannten Helios-Klasse (12);
- Außenkabine, mit Balkon;
- Abmessung: Länge = 7,5 m und Breite 2,8 m;
- Flächenbereitstellung: ca. 20-21 m²;
- Geforderte Nutzungsdauer der Kabine: 30 Jahre;
- Fertigungsort: Deutschland mit Teilzulieferung aus Europa;
- Zentrale Energieversorgung der Kabine für Strom über den Schiffsgenerator unter Einsatz des Kraftstoffes Schweröl (HFO - Heavy Fuel Oil beziehungsweise MFO – Marine Fuel Oil);
- Wärme und Kältebereitstellung in der Kabine über den Schiffsgenerator und eine Fan Coil Unit (FCU) sowie
- Standard-Verglasung (ohne spezifische Funktionalität) zum Außenraum hin (Balkontür).

Annahmen für die ökonomische Potenzialabschätzung

Für die Potenzialabschätzung wurden lediglich die Materialien der Kabine im Referenzdesign berücksichtigt. Es sollten nach Rücksprache mit der MEYER WERFT vor allem der Einfluss relevanter Materialströme ökonomisch bilanziert werden. Es lagen die folgenden Randbedingungen zu Grunde:

- Betrachtungszeitraum: flexibel mit 10 Jahren, 20 Jahren und 30 Jahren (entspricht der maximalen prognostizierten Nutzungsdauer einer Schiffskabine gemäß Angaben des Projektpartners MeyerWerft)
- Kalkulatorischer Zinssatz: fix mit 3,0% pro Jahr (p. a.) (13)
- Allgemeine Preissteigerung für Herstellkosten: fix mit 2,0% pro Jahr (p. a.) (13)

- Berücksichtigte Lebenszyklusphasen: Herstellung ohne Energieaufwand für Transport oder Zusammenbau/Fertigung; Nutzungsphase durch Ersatz/Austausch von Komponenten innerhalb des Betrachtungszeitraums aufgrund geringerer Nutzungsdauer; ohne Berücksichtigung des Kabinenbetriebes
- Berücksichtigte Kabinenbestandteile: Wohnraum, Nasszelle, Komponenten der Energieversorgung und Außenraum (Balkon).

Ergebnisse der ökonomischen Potenzialabschätzung

Die Ergebnisse der ökonomischen Potenzialabschätzung zeigten deutlich die ökonomische Relevanz der Herstellungsphase der Schiffskabine. Mit Verlängerung des Betrachtungszeitraums in der Analyse war jedoch zunehmend der Einfluss der Nutzungsphase durch Austausch/Ersatz von Kabinenbestandteilen zu sehen, der sich unter den definierten Randbedingungen auf bis zu 33 % in der Potenzialabschätzung. Die spezifische Wahl einzelner Materialien und deren Langlebigkeit (Nutzungsdauer) werden hierbei für den Schiffskabinenbau relevanter.

Aus Sicht der Relevanz der betrachteten Kabinenbestandteilen - gruppiert in Wohnraum, Nasszelle, Energieversorgung und Außenraum – zeigte sich die zunehmende Relevanz des Wohnraums für die Lebenszykluskosten bei steigendem Betrachtungszeitraum. Die Gründe hierfür liegen u. a. in der Vielzahl an Kabinenelementen, die eine Lebensdauer zwischen 5 und 15 Jahren aufweisen sowie dem hohen Anteil des Wohnraumes an den Herstellungskosten, der bei Potenzialabschätzung mehr als die Hälfte betrug. Die Energieversorgung zeigte sich aus Sicht der Materialien von untergeordneter Bedeutung unter den o.g. Randbedingungen. Für den Außenraum wurde eine Nutzungsdauer von 30 Jahren zu Grunde gelegt. Ein Ersatz oder Austausch einzelner Elemente war nicht vorgesehen und führte zu einem annähernd gleichbleibendem Einfluss auf die so ermittelten Lebenszykluskosten der Potenzialabschätzung mit ca. 24 % - unabhängig vom Betrachtungszeitraum.

Die Ergebnisse der ökonomischen Potenzialabschätzung stützten den vorhandenen Projektansatz zur Optimierung der Schiffskabine in Bezug auf die eingesetzten Materialien und Komponenten, insbesondere für den Wohnraum. Hierzu lagen vom Projektpartner MEYER WERFT priorisierte Bauteile und Komponenten vor, die im Rahmen der prozessbegleitenden Analyse und des Baus einer Demonstrator Kabine im weiteren Projektverlauf auf ihren Einfluss für die ökonomische Bewertung analysiert werden konnten.

2.1.5 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Beschreibung des Klimasystem in der EcoCab

Im Rahmen des EcoCab Projekts konnte ein voll-dezentrales Kabinenklimatisierungskonzept und das zugehörige Gerät entwickelt und teilweise erprobt werden. Dabei wurden sowohl die relevanten Sicherheitsstrukturen wie Feuerzonenintegrität und Außenverschluss als auch die Standards an Hygiene berücksichtigt.

Verglichen mit dem konventionellen System können mit dem EcoCab Konzept je Kabine rund 0,2 kW Kühlwasserleistung und 0,17 kW elektrisch pro Kabine eingespart werden. Das bedeutet für die elektrische Leistungsaufnahme eine Einsparung von bis zu 62%. Der Kühlwasserbedarf ist darüber hinaus um rund 10% reduziert.

Aufgrund der eigenständigen Außenluft Aufbereitung wird der Platzbedarf für die ATU größer als der in der Nasszelle belegte Platz eines FCU's. Die Ansaugung von Frischluft und die Abgabe von Abluft muss für mehrere Kabinen gemeinsam erfolgen, da es Einschränkungen durch den Abstand zwischen Einlass und Auslass der Luft gibt.

Um die volldezentrale ATU in ihrem Optimum betreiben zu können ist ein eigener Regler entwickelt, der sowohl auf CO₂-Gehalt, Feuchtegehalt und die Temperatur reagieren kann. Die Integration erfolgt, sodass eine Kommunikation mit den bestehenden Schiffssystemen erfolgen kann.

Im Rahmen des EcoCab Projektes wurden Prototypen für das dezentrale Kabinenklimagerät (ATU) entwickelt, die erfolgreich in Labor- und Feldtests getestet werden konnten. Hierbei konnten sowohl die thermodynamischen Wirkungsgrade bezogen auf Feuchte- und Temperaturreckgewinnung als auch die generelle Funktionalität und Haltbarkeit der Komponenten bestätigt werden.

Dem gegenüber, stehen als Hauptnachteile ein erhöhter Aufwand an Komponenteneinbau und Wartung durch zusätzliche Filter und Wärmetauscher und einem leicht vergrößerten Bauraumbedarf im Kabinenbereich, genauer in der Service-Nische von ca. 0,1 m².

Konzepterstellung zur energetischen Optimierung

ATU-Inbetriebnahme-Tests

Um eine Vergleichbarkeit und Kombinierbarkeit der Testergebnisse am Fraunhofer IBP und DLR zu erzielen, fanden Absprachen zur Vereinheitlichung und Harmonisierung mit dem Projektpartner IBP und dem Hersteller MAC statt. Da es zu diesem Zeitpunkt nur ein Prototyp des dezentralen Klimatisierungssystems mit neuer Regelung verfügbar war, wurde in diesem Zuge auch die Reihenfolge der Messungen beschlossen. Zunächst wurde die ATU mit der überarbeiteten Regelstrategie an der Mockup-Kabine des IBP getestet und anschließend (Ende 2020) zum DLR transportiert.

Im Zuge der Inbetriebnahme ab Februar 2021 wurde ein Verdrahtungsfehler in der Steuerung des dezentralen Klimatisierungssystems festgestellt. Die Auswirkungen des Verdrahtungsfehlers betreffen im Wesentlichen den Sommerbetrieb der ATU, wenn keine Entfeuchtung erforderlich wird, da Spannungsversorgung der Ventilatoren und des Nachheizregisters vertauscht waren. In Absprache mit dem Hersteller wurde der Fehler behoben.

Auch danach ist die Betriebscharakteristik jedoch auffällig. In den ersten Inbetriebnahme- und Abstimmungstest zeigten sich einige Auffälligkeiten, darunter v.a. starke Schwankungen in der Ansteuerung der Ventilatoren und ein taktendes Verhalten der Kühlung und Nachheizung. Die folgenden Abbildungen zeigen Messdaten der Inbetriebnahme-Tests. Diese wurden mit den Projektpartnern MAC und IBP diskutiert.

In folgender Abbildung sind die teststandseitig gemessenen Luftvolumenströme in zwei Bedarfzuständen dargestellt. Deutlich erkennbar sind starke, hochfrequente Schwankungen in allen Kanälen, insbesondere jedoch im Außenluft (ODA)- und Abluft (EHA)-Volumenstrom. Weiterhin wird auch deutlich, dass Außenluft- und Abluftvolumenströme nicht gleich groß sind. Dies ist dadurch zu erklären, dass im Teststand keine Kabine vorhanden ist. Ein beispielsweise höherer Außenluftvolumenstrom wirkt sich somit nicht direkt auf den Innendruck in der Kabine aus und damit auch nicht auf den Abluft-Volumenstrom.

Abgleich und Harmonisierung der Testergebnisse zwischen DLR und IBP

Zur gegenseitigen Erweiterung der Aussagekraft der jeweiligen ATU-Messdaten von IBP und DLR, wurden in Kooperation mit dem IBP Kenngrößen identifiziert, welche herangezogen werden können, um die Messergebnisse zu ergänzen. Dazu zählen bei den Außenluft-Konditionen, die Temperatur und die absolute Luftfeuchte. Bei den Innenraum-Konditionen liegt der Focus auf der Sekundärluft, da hier der höhere Luftvolumenstrom vorliegt. Weiterhin werden auch hier die Temperatur und die absolute Luftfeuchte zur Indikation verwendet. Bei der Harmonisierung der Messdaten wurde zunächst versucht, aus bestehenden Messdaten, wie beispielsweise die oben vorgestellten Tagestests, einzelne Stunden für den Vergleich heranzuziehen. Durch den unstetigen Regelungscharakter ergab dies jedoch kein klares Bild. Vor diesem Hintergrund wurden vergleichbare Randbedingungen am DLR-Teststand eingestellt und die Messdaten aufgezeichnet und ausgewertet.

In der folgenden Tabelle 1 sind drei Szenarien dargestellt, welche harmonisiert werden konnten.

Tabelle 1: Übersicht der harmonisierten ATU-Testergebnisse

Szenario	Beschreibung	Randbedingungen						Messgrößen			
		Durchschnittliche ODA-Temperatur in °C	Durchschnittliche ODA-Luftfeuchte in %r.H.	Summe der prozentualen Abweichungen vom ODA-Mittelwert (Temperatur & abs. Feuchte) in %	Durchschnittliche SEC-Temperatur in °C	Durchschnittliche SEC-Luftfeuchte in %r.H.	Summe der prozentualen Abweichungen vom SEC-Mittelwert (Temperatur & abs. Feuchte) in %	R	P	Behaglichkeit PMV	
Teststand											
1	Statio-närer Winter-fall 3	12,3	96,2	14,8	18,6	51,2	11,5	1,1	0	-1,22	Kategorie D
2	Statio-närer Som-merfall 1	38,6	66,7	-3,7	20,9	72,6	-5,1	1,1	2,3	-0,24	Kategorie B
3	Statio-närer Som-merfall 3	36,5	77,1	-1,9	23,9	82,4	6,8	0,2	3,8	-0,37	Kategorie B

Das Szenario 1 stellt einen Winterfall mit moderaten Außentemperaturen und hoher Luftfeuchte dar. Trotz hoher Luftfeuchte wird die Kühlung jedoch nicht benötigt. Stattdessen ist die elektrische Nacherwärmung permanent aktiv. Insgesamt kann dieses Szenario jedoch keine gute Behaglichkeit in der Kabine erzeugen, welches an der erzielten Behaglichkeitskategorie D deutlich wird. Eine deutlich höhere Behaglichkeit wird dagegen in den Sommer-Szenarien erreicht. Beide Szenarien unterscheiden sich einerseits bezüglich Temperatur und Luftfeuchtigkeit, andererseits auch im Betriebszustand der ATU. Während Szenario 2 bei der ATU auch die dauerhaft aktive Entfeuchtung auslöst, wird diese in Szenario 3 nicht aktiviert. Im aktivierte Entfeuchtungsmodus sind in der ATU zeitgleich Kühl- und Heizregister aktiv. Dies führt zu einem höheren elektrischen Energiebedarf bei Szenario 2 gegenüber Szenario 3, in welchem lediglich die Ventilatoren elektrisch versorgt

werden müssen. Der höhere Kühlenergie-Verbrauch in Szenario 3 ist durch den höheren thermischen Bedarf zu begründen, welcher an der höheren SEC-Temperatur sichtbar wird.

Virtuelle Entwicklungsplattform und Systemintegration

Zunächst wurden auf der Grundlage des IST-Zustandes einer Passagierkabine mit Balkon Simulationsmodelle entwickelt. Das verwendete Simulationsmodell VEPZO (14) ist in der Programmiersprache Modelica geschrieben und wurde mit der Simulationsumgebung Dy-mola erstellt.

Der digitale Zwilling wurde anhand des aktuellen Kabinen Setups erstellt und validiert, da der Prototyp des neuen dezentralen Lüftungsgerätes (Air Treatment Unit; ATU) erst zur Mitte der Projektlaufzeit verfügbar war. Nach einer erfolgreichen Validierung des Simulationsmodells wurde dieses neue Kabinen Layout an die ATU Klimatisierung angepasst. Für die Optimierung der Modelle wurde ebenfalls das hygrothermische und raumklimatische Verhalten einer aktuellen Kabine vermessen und mit den Simulationsberechnungen abgeglichen.

Die so neu entstandenen Simulations-Modelle erlauben es im Gegensatz zu physisch gebauten Prototypen in kurzer Zeit eine Vielzahl von Lösungskombinationen zu untersuchen und die vorliegende Komplexität gegenseitig beeinflusster Zielfaktoren zu beherrschen. In der virtuellen Entwicklungsplattform identifizierte Lösungen mit hohem Potential in Bezug auf die Zielkriterien wurden dann als physische Funktionsmuster gebaut und auf der Testplattform vermessen. In iterativen Schleifen beschleunigt dies zum einen den Entwicklungsprozess, sichert gleichzeitig die Zielkriterien ab und liefert in Kombination mit den umwelt- und nachhaltigkeitsbezogenen Bewertungen die Grundlage für eine abschließende Gesamtbeurteilung der ausgearbeiteten Kabinen-Lösungen.

Gleichzeitig entstand mit der virtuellen Entwicklungsplattform ein Werkzeug, dass es erlaubt, potenziellen Kunden in Zukunft bereits vor der Realisierung einen Eindruck der Leistung und Wirkung der Systemlösung im Hinblick auf die raumklimatischen Verhältnisse zu ermöglichen bzw. sehr schnell Änderungswünsche auf ihre Umsetzbarkeit zu prüfen. Zudem können die Unterschiede von Lösungsvariationen deutlich besser dargestellt und vermittelt werden.

Methodik

Die Methodik für die Untersuchung und die Erstellung eines empirisch validierten »digitalen Zwillings« wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

Simulationen

Wie eingangs in beschrieben, wurden zwei unterschiedliche Simulationsmodelle verwendet, welche jeweils einen anderen Schwerpunkt haben. Durch die unterschiedliche Ausrichtung können beide Simulationsmodelle unabhängig voneinander betrieben werden.

WUFI® Plus

Die multi-zonale Simulation wurde mit dem am Fraunhofer IBP entwickelten hygrothermischen Gebäudesimulationsprogramm WUFI® Plus durchgeführt. Das Programm ermöglicht die Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes auf Gebäudeebene (15). Die Geometrie wurde zunächst nach PDF-Plänen nachmodelliert. Mit einem Plugin wurde diese Geometrie exklusive der Einbauten (Bett, Schreibtisch) in WUFI® Plus übertragen. Dort wurden die Bauteile zu zwei Zonen (Kabine und Nasszelle) gruppiert und die angeschlossenen Bereiche »Klimakammer«, »Gang« und »Klimagerät« ergänzt. Der Bereich wird erst als Ausgleichsvolumen für die Varianten mit ATU benötigt. Der Bereich »Gang« wurde vorsorglich integriert falls zukünftig dieses Volumen anders konditioniert ist als die umliegenden Flächen.

Die solaren Wärmeeinträge wurden im Modell über ein zeitlich variables, internes Lastprofil und eine Wärmestrahlungsquelle innerhalb der Zone »Kabine« berücksichtigt. Im Vergleich zu einem realen, solaren Eintrag durch die Fenstertür zum Balkon erfolgt keine sekundäre Abstrahlung (Reflexion) innerhalb der Kabine. Da die Berechnung der Behaglichkeitskenngroßen gesondert im VEPZO Simulationsmodell erfolgte, ist dies jedoch kein Problem. Die Minderung der eingebrachten Wärmestrahlung durch die Eigenverschattung des Balkons und die Reflexion des Glases wurde bereits bei der Erstellung der Lastprofile berücksichtigt. Die Ergebnisdaten der Simulation wurden zunächst als Textdatei exportiert, anschließend halbautomatisiert mit der Open-Source Software R (16) formatiert und geordnet über ein Excel® Makro in bestehende Auswertungsvorlagen überführt.

VEPZO

Die Simulation wurde mithilfe eines am Fraunhofer IBP entwickelten zonalen Modells, dem sogenannten VEPZO-Modell (Velocity Propagating Zonal Model) (14) durchgeführt. Es dient zur schnellen Abschätzung von Strömungsmustern und Temperaturverteilungen der Luft im Raum. Die Simulation basiert auf einem dreidimensionalen Netz, welches über das Raumvolumen gelegt wird, sodass eine Unterteilung in mehrere Zonen erfolgt. Dabei findet ein Luftaustausch zwischen den Zonen statt. Aus diesem Ansatz ergibt sich ein Kompromiss zwischen exakten Strömungsberechnungen anhand komplexer CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) und den niedrigen Rechenzeiten eines eindimensionalen Modells.

Bei der Zonierung wurde die Schiffskabine in mehrere kleinen Volumina unterteilt. Dabei bildeten die Kabinengeometrie, die Möblierung und die Lüftungsauslässe die Zonengrenzen. Je kleiner die Zonen gewählt werden, desto größer ist der Rechenaufwand und desto

genauer kann die Luftverteilung berechnet werden. Die äußeren Umschließungsflächen definieren die Randzonen und müssen ein geschlossenes Volumen aufweisen, um eine Zonengenerierung zu ermöglichen. Die Kabine besteht mit dem Aufenthaltsbereich und dem Bad (Nasszelle) aus zwei geschlossenen Räumen, die im VEPZO-Modell (14) zwei Domänen erzeugen.

Die Oberflächen der Kabinenmöbel bilden die inneren Zonengrenzen, an diesen werden die Luftströmungen unterbrochen. Beispielsweise findet im Schrank keine relevante Luftbewegung statt und daher wurde dieser im Modell nicht berücksichtigt. Die Zonenunterteilung der Kabine ist grafisch in Abbildung 4 gezeigt. Darin ist die Domäne der Nasszelle grün und die Domäne der restlichen Kabine grau dargestellt.

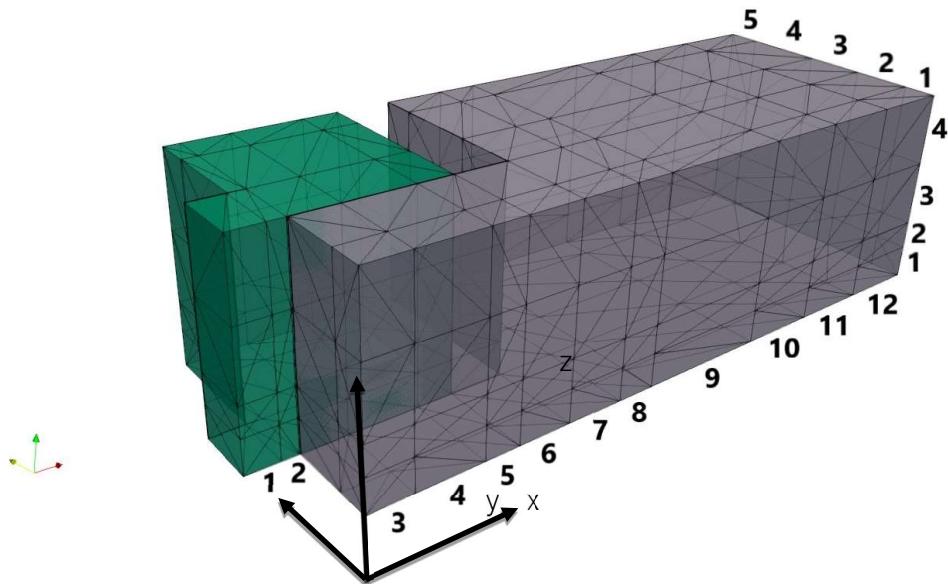


Abbildung 4: dreidimensionale Zonierung (x, y, z) der Passagierkabine

Die *Indoor Environmental Simulation Suite* (IESS) Tool- und Modellkette des Fraunhofer - Instituts für Bauphysik generierte nach der Eingabe der Eingangsgeometrie und der definierten Zonengrößen ein Zonenmodell (14). Darin wurde automatisch ein Modelica Code erzeugt, welcher die Größen und die Verknüpfungen der einzelnen, benachbarten Zonen über dessen Strömungspfade bereits beinhaltet.

Die solare Einstrahlung durch das Bordfenster ist im digitalen Modell ebenfalls mit abgebildet. Als Solarstrahlungswerte wurden stündliche Daten eines Solarprofils für einen repräsentativen Tag verwendet. Der im Simulationsmodell berechneten Oberflächentemperatur der Fensterscheibeninnenseite wurde ein zusätzlicher Wärmestrom für die solare Einstrahlung hinzugefügt. Der resultierende Wärmeeintrag beider Fensterscheiben war im Modell flächenmäßig auf die Zonen aufzuteilen, um eine konstante Wärmestromdichte und somit eine gleichmäßige Wärmeverteilung über die Fläche zu gewährleisten.

Im Gegensatz zu einer zentralen Luftversorgung der Passagierkabinen wurde in dem dezentralen System direkt die Außenluft angesaugt und aufbereitet. Aufgrund der feuchten Meeresluftkonditionen bildete sich Kondenswasser bei einer Abkühlung der Luft im dezentralen ATU-Gerät, dass für eine Entfeuchtung der Frischluft sorgte. Im Simulationsmodell mit dem ATU-Gerät galt es die ablaufenden Prozesse abzudecken, ohne dabei das detaillierte Regelverhalten der einzelnen Komponenten zu kennen. Dazu wurden die

gemessenen Temperaturen und Feuchtwerte ausgewertet, um einen Zusammenhang zwischen den einzelnen Größen festzustellen und somit eine Reglerfunktion zu definieren.

Da in der Kabine keine Feuchtequellen vorhanden waren, entsprach die absolute Feuchtigkeit in der Kabine dem gleichen Wert wie der der Kabinen Zuluft. Diese wiederum wurde von dem Entfeuchtungsprozess im Kühlregister bestimmt und ist somit von der Taupunkttemperatur abhängig. Über die Messwerte konnte eine Rückrechnung auf die jeweiligen Taupunkttemperaturen erfolgen. Diese diente als Ausgangsgröße der Reglerfunktion. Die Eingangsgröße setzte sich aus den Luftkonditionen der Außenluft und der Umluft zusammen. Die Außenluft strömte dabei zuerst durch den eingebauten Wärmetauscher, wird mit der Umluft vermischt und als Mischluft durch das Kühlregister geleitet.

Die Ergebnisse der Simulation wurden als .csv- Datei exportiert und in einer Excel® Datei, welche mit einem Makro zur Datenauswertung hinterlegt ist, angewendet. Zusätzlich konnte zur Visualisierung ein Falschfarbenbild mithilfe des Post Processing Tools der Fraunhofer IESS-Toolkette erstellt werden (siehe Abbildung 5).

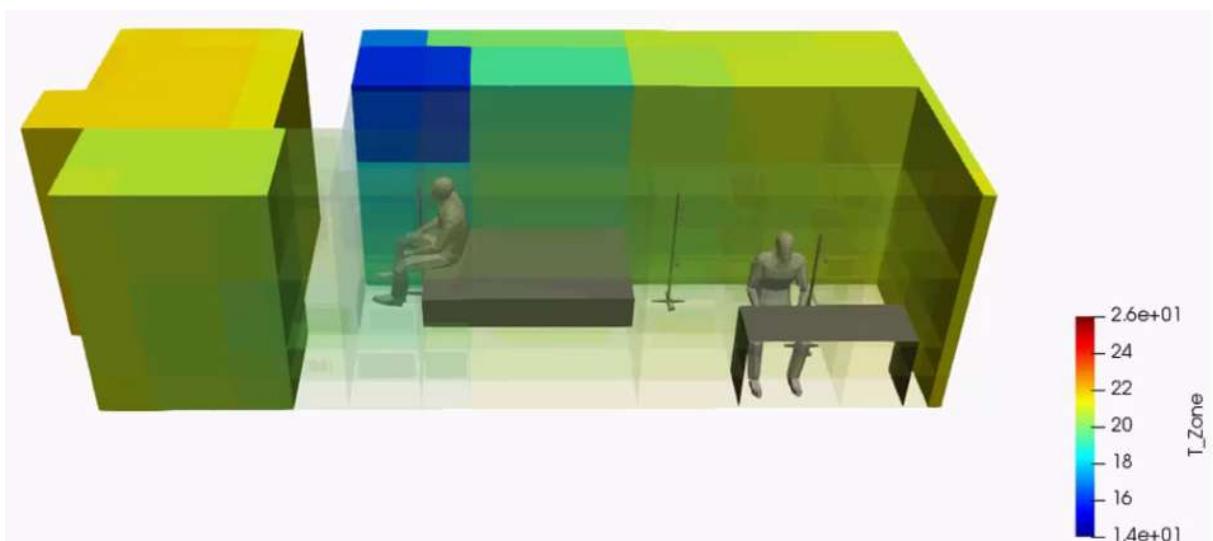


Abbildung 5: Visualisierung der simulierten thermischen Bedingungen in der Passagierkabine (mit Messprofilen und Positionen der Personen)

Setup Mock-UP

Die Kabine sollte im Mittel bei einer Temperatur von ca. 23°C liegen, die Versuchshalle ist unbeheizt und liegt im Jahresmittel durch die Abwärme der Anlagentechnik bei ca. 14°C. Damit ergab sich eine jahresmittlere Temperaturdifferenz von 9 K. Um den Einfluss der Hallentemperatur für die adiabat angenommenen Hüllflächen zu minimieren war eine zusätzliche Dämmung erforderlich. Es wurden dafür 10 cm zusätzliche mineralische Faserdämmung aufgebracht. Die zusätzliche Dämmung wurde als Leichtbaukonstruktion vor die eigentliche Kabinenwand gesetzt und mit Hartfaserplatten verdeckt.

Bei einer adiabat angenommenen Hüllfläche von ca. 34 m² ergab das einen Wärmestrom von ca. 80 W pro Versuchstag. Dies wurde durch den Eintrag der Abwärme der Messtechnik bzw. der dafür notwendigen Netztransformatoren ausgeglichen.

Der »Wärmebrückeneffekt« im Bereich des Bodens musste ebenfalls mitberücksichtigt werden. Im Mock-Up erfolgte dies durch eine Luftheizung im Bereich des Unterbodens. Der Unterboden wurde dafür zum eigentlichen Hallenboden hin mit einer 10 cm dicken Lage aus XPS-Dämmstoffplatten isoliert.

Für die Luftführung der Heizung wurden zusätzliche Einlässe aus Kunststoffrohren beidseitig von der Kabine angebracht. Zur besseren Vorstellung ist die Außenansicht des Mock-Up in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Anschluss der Zwischenbodenheizung auf der östlichen Seite des Mock-Up.

Dies ermöglichte einen Luftführung nach Tichelmann (17), sodass eine möglichst gleichmäßige Erwärmung des Zwischenbodens gewährleistet war. Die Temperatur im Zwischenboden sollte um 5 K über der Innenraumtemperatur liegen, dies wurde über die entsprechende Regelung erreicht.

Für das Außenklima wurde eine Klimakammer angefertigt und reversibel vor der Fenstertür angebracht. Über einer Schicht aus Dämmstoff wurde die Klimakammer in Holzständer Bauweise erstellt. Die eigentliche Klimatisierung (Kühlung der Kabine) erfolgt über einen dezentralen Kältegeräte, welches als »Huckepack-Gerät« ausgeführt war.

Für den sommerlichen Anwendungsfall wurde zusätzlich ein mobiles Klimagerät verwendet, welches die Hallenluft auf 12°C vorkonditioniert. Die vorkonditionierte Luft wurde bei hohen Hallenluftfeuchten zusätzlich über einen Adsorptionstrockner entsprechend

vorgetrocknet, bevor sie in die Klimakammer eingebracht wurde. Dies war notwendig, um eine übermäßige Vereisung des inneren Wärmetauschers im Lastfall »Winter« zu verhindern.

Zusätzlich ermöglichte dieser Aufbau im Lastfall »Winter« die zusätzliche Kühlung des Klimageserätes und damit den effizienteren Betrieb des Klimageserätes.

Durch die Klimakammer, welche die Außenklimabedingungen simulierte, ist die Fensterfüre der Kabine verdeckt und ein direktes Einbringen der solaren Strahlung nicht möglich. Da dennoch ein Wärmeeintrag durch solare Wärmestrahlung in die Kabine berücksichtigt werden sollte, wurde für die Innenseite der Fenstertüre ein elektrisches Flächenheizsystem konzipiert.

Hierfür war es zunächst notwendig möglichst realistische solare Globalstrahlungsdaten zu erhalten. Der Ansatz jeweils den kritischsten Fall zu betrachten, wurde dabei gewählt. Dies bedeutet für den sommerlichen Anwendungsfall die Betrachtung des Tages mit der höchsten solaren Einstrahlung (Überhitzung) und für den Winter die geringste tägliche solare Einstrahlung. Für die Simulation war es darüber hinaus notwendig das Strahlungsprofil in einer stündlichen Auflösung zur Verfügung zu haben. Dieses musste dann zunächst um die Verschattung durch z.B. Balkonteile und Sichtschutzelemente reduziert werden und mit Hilfe einer eigenen Simulation auf den Wärmeeintrag (strahlend) auf die Innenseite der Fenstertüre umgerechnet werden.

Vom Projektpartner DLR wurden dafür Strahlungsdaten in minütlicher Auflösung für eine Kreuzfahrtroute in der Karibik (Lastfall »Sommer«) und für Bergen (Lastfall »Winter«) zur Verfügung gestellt. Die Korrektur der Daten um die äußere Verschattung wurde dabei schon berücksichtigt.

Messtechnik

Die Sensorik umfasste die Messung von Temperaturen, relativer Feuchte, Luftgeschwindigkeiten, Volumenströmen sowie der Druckdifferenz. Zum Messen der Luft- und Oberflächentemperaturen wurden PT100 Temperaturgeber genutzt.

Für die Validierung der Simulationsmodelle musste beachtet werden, dass die Positionen der Sensoren von dem Zonenraster des Modells abhängig sind. Hierbei galt der Grundsatz, dass ein Oberflächentemperatursensor die Randbedingung für ein Berechnungselement validiert.

Die relative Feuchte wurde mit kapazitiven Feuchtefühlern, welche mit Temperatursensoren kombiniert waren, gemessen. Die Genauigkeit des kombinierten Temperatur- und Feuchtesensors lag bei $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 1,5 % rel. Feuchte (Rotronic, 2017). Um die Luftgeschwindigkeit am Nutzer zu messen, wurde mit einem thermoelektrischen Strömungssensor oder auch Thermoanemometer gearbeitet. Es wurde in unmittelbarer Nähe zum Nutzer ein Messprofil aufgestellt, um eine Behaglichkeitsbeurteilung durchzuführen. Der Volumenstrom der Zu- und Abluft wurde über den Rohrquerschnitt und die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr ermittelt. Die Messung des Differenzdruckes erfolgte mit einem analogen Messumformer auf kapazitiver Basis. Statt einer separaten Messung der beiden Absolutdrücke maß der Sensor die geringen Druckunterschiede an zwei gewünschten Stellen. Damit konnten höhere Genauigkeiten erzielt werden. Kapazitive Sensoren weisen bei einer niedrigen Temperaturempfindlichkeit und einer Langzeitstabilität generell hohe

Genaugkeiten auf. Deshalb eignen sich diese besonders für die Messung von niedrigen Differenzdrücken.

Die Bewertung der Behaglichkeit wurde unter anderem mit dem am Fraunhofer IBP entwickelten Messsystem DressMAN durchgeführt und steht für *Dummy REpresenting Suit for Simulation of huMAN heat loss*. Es dient zur objektiven und messtechnischen Bewertung der thermischen Behaglichkeit des Menschen. Das Sensorsystem setzt sich aus 16 bis 60 Sensoren zusammen, diese sind auf den gesamten Körper verteilt (Abbildung 7). Durch die Sensoren können die gerichteten Äquivalenttemperaturen an lokalen Körpersegmenten nach dem in DIN EN ISO 145052 beschriebenen Verfahren, erfasst werden. Die Messwerte wurden im Sekundenraster aufgenommen und über einen Funkempfänger auf einer lokalen Festplatte gespeichert. Anschließend konnten die lokalen Bewertungen mittels eines am Fraunhofer entwickelten Algorithmus in ein thermisches Gesamtempfinden umgerechnet werden.



Abbildung 7: DressMAN 2.0 zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit im »Büro-Bereich« der betrachteten Kabine.

Ergebnisse

Zusammenfassung Modellgüte

Bezogen auf die Oberflächentemperaturen zeigte sich die Auswirkung des Initialisierungszeitraumes bei den WUFI®+ Modellen. Diese Simulationsmodelle erreichten generell etwas später einen eingeschwungenen Zustand als die vergleichbaren VEZPO Modelle. Dies war vor allem bei den vier instationären Fällen von Bedeutung.

Da das VEZPO Modell anhand der Oberflächentemperaturen kalibriert wurde, ist hier sowohl für den Root Mean Square Error (RMSE) als auch für den Median der Abweichungen eine geringere Abweichung ersichtlich. Wenn hingegen die Bauteilaufbauten eine größere Rolle spielten, wie z.B. bei der Bodentemperatur, liefert WUFI®+ realistischer Ergebnisse.

Ergebnisse Air Treatment Unit (ATU)

WUFI® Plus

Bewertet nach dem RMSE, wurden auf Raumbene die Temperaturen in einer ähnlichen Güte wie bei den Referenzfällen berechnet. Bei den relativen Luftfeuchten ergaben sich hingegen höhere RMSE, was auf eine schlechtere Modellqualität im Vergleich zu den Referenz-Fällen hindeutet. Die schlechtere Übereinstimmung ist auf die unterschiedliche Abbildung des »Durchmischungsraumes« im Simulationsmodell im Vergleich zum realen ATU zurückzuführen. Der Wärmetauscher konnte hier nur unzureichend über den Wärmerückgewinnungsgrad abgebildet werden. Ein Feuchteaustausch über Querströmungen oder Ablagerungen innerhalb des Kreuzstromwärmetauschers konnte im Modell nicht berücksichtigt werden. Dies führte dazu, dass hier die Modellqualität entsprechend abnahm. Bezuglich der Modellqualität der Oberflächentemperaturen gab es zwischen den einzelnen betrachteten Positionen keine größeren Ausreißer. Tendenziell war die Modellqualität im Bereich der Wände etwas höher als bei der Decke und des Fußbodens.

Neben der raumklimatischen Beurteilung erlaubt das Simulationsmodell auf Bauteilebene eine Auswertung des Schimmelrisikos. Hierfür kann im Konstruktionsquerschnitt die Innoberfläche ausgewählt werden (Abbildung 8) und in der Folge eine instationäre, biohygrothermische Schimmelrisiko-Bewertung mit WUFI® BIO (18) durchgeführt werden.

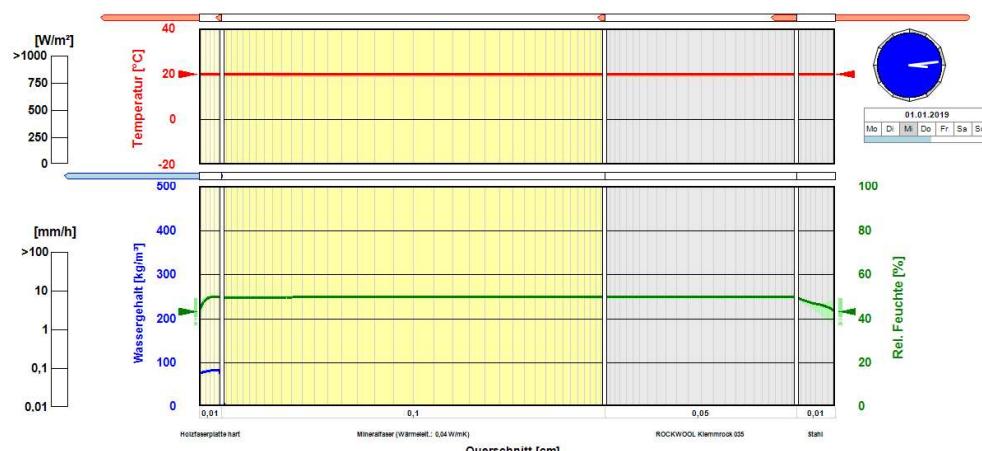


Abbildung 8: Exemplarischer Bauteilquerschnitt in WUFI®+ mit den Verläufen von Temperatur, rel. Feuchte und dem Wassergehalt der einzelnen Schichten.

Darüber hinaus können die Wärmeströme zusammengefasst oder je Bauteil ausgewertet werden. Die solaren Wärmegewinne sind dabei in den internen Wärmelasten als Strahlungsanteil berücksichtigt. Für eine genauere Analyse der Wärmeströme kann auch der zeitliche Verlauf, wie für die Kabine in Abbildung 9 dargestellt, ausgewertet werden.

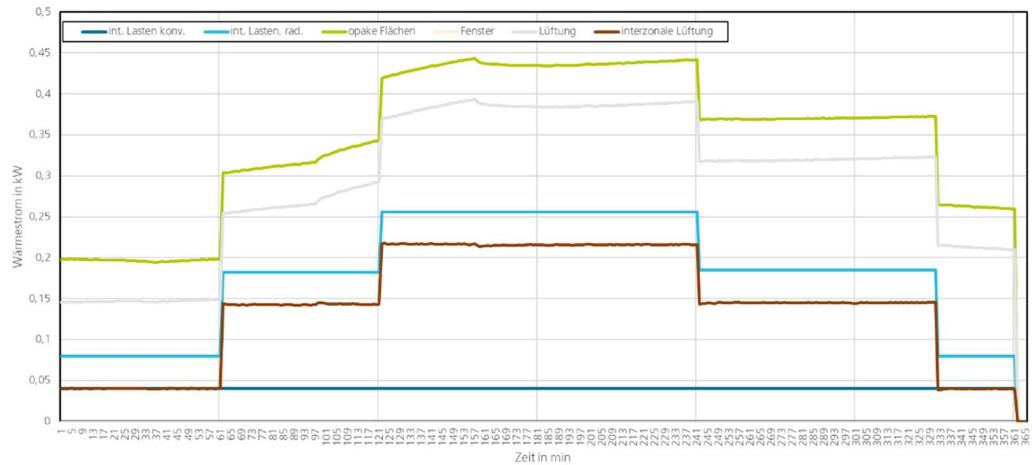


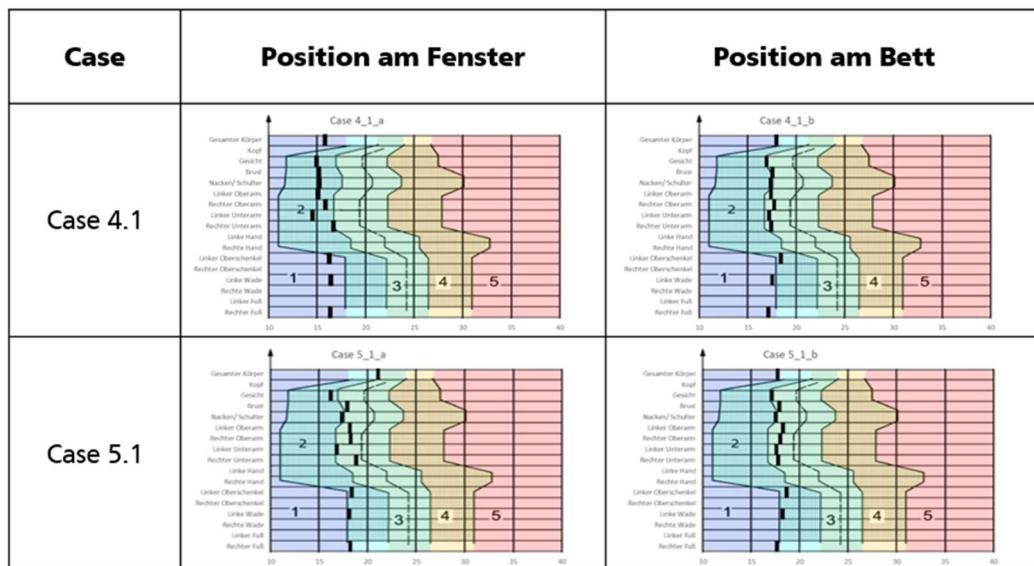
Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf der Wärmeströme für das Raumvolumen der Kabine im Testfall 6.1 mit ATU.

In beiden Betrachtungsweisen zeigte sich, dass die Hauptwärmeverluste über die Lüftung und die Fenstertüre erfolgen. Der Wärmeeintrag erfolgt vor allem in der Mitte des Versuchszeitraums über die Lüftung und den solaren Eintrag (Anteil der internen Wärmelasten).

VEPZO

Die Behaglichkeitsbeurteilung wurde analog zu den Referenzfällen für die Bereiche am Fenster und am Bett nach DIN EN ISO 7730 (19) durchgeführt. Es erfolgte ebenfalls eine Darlegung der Ergebnisse der Äquivalenttemperaturen der DressMAN Messungen. Diese sind in dem Diagramm in der folgenden Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Beurteilungsschema zum thermischen Empfinden der Äquivalenttemperaturen für die Winterfälle Case 4.1 und Case 5.1 nach DIN EN ISO 14505-2 an der Position am Fenster und am Bett



Die Äquivalenztemperaturen lagen größtenteils im neutralen bis etwas zu kühlen Bereich. Die Temperaturen an den Beinen erwiesen sich jeweils als zu kalt. Am Fenster zeigten sich die Auswirkungen der kalten Fensterscheibentemperatur im Szenario 4.1, dies war das Szenario mit einem stationären winterlichen Umgebungsklima ohne zusätzliche interne Wärmelasten sowie ohne Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung. Hier waren die Temperaturen fühlbar kälter als bei den restlichen Fällen. Im Allgemeinen waren die vertikalen und horizontalen Temperaturdifferenzen an der Position am Bett geringer als am Fenster, wirkten sich jedoch nicht auf das Behaglichkeitsempfinden aus. Im Mittel (T_{eq} , gesamter Körper) waren die Temperaturen an beiden Standpunkten für ein behagliches Gefühl für den Nutzer etwas zu kalt. Es zeigte sich, dass eine Sonnenstrahlung im Winter erforderlich ist, um den kalten Temperaturen der Fensterscheibe und somit einer Unbehaglichkeit des Nutzers entgegenzuwirken.

Die operativen Temperaturen in der Kabine, welche einen großen Einfluss auf das thermische Gesamtempfinden des Nutzers haben, wurden hauptsächlich von der Zuluft Temperatur bestimmt. Bei einer dezentralen Luftversorgung wurde diese unter anderem durch die Außenlufttemperaturen beeinflusst. Dabei führten die niedrigen Temperaturen im Winter zu einem zu kalten Raumklima und die hohen Temperaturen im Sommer zu einem zu warmen Raumklima in der Kabine.

Die lokalen, mittleren Luftgeschwindigkeiten lagen zwischen 0,10 m/s und 0,23 m/s. Da die Unzufriedenheit durch Zugluft mit einem Abfall der Temperaturen zunimmt (19), entstanden in den meisten Winterfällen unbehagliche Zuglufterscheinungen. Durch die höheren Lufttemperaturen im Sommer ergab sich hier im Mittel ein Prozentsatz von unter 20

% an unzufriedenen Nutzern. Der maximale vertikale Temperaturunterschied aller Szenarien betrug 1,2 °C. Dies hat einen Prozentsatz von unter 1 % an unzufriedenen Nutzern zur Folge. Die Fußbodentemperaturen befanden sich in einem optimalen Temperaturbereich von 19,5 °C und 26,7 °C und verursachten somit keine lokalen thermischen Unbehaglichkeiten. Die Strahlungsasymmetrie wird durch einen Temperaturunterschied zwischen zwei Halbräumen definiert. In den Versuchsfällen 4.1-6.2 ergeben sich durch die kalten Fensterscheibentemperaturen im Winter die größten Temperaturunterschiede zwischen Fensterfläche und Schrankwand. Der Nutzer wurde dadurch jedoch in seinem Behaglichkeitsempfinden nicht negativ beeinflusst.

Bei den Versuchen mit dem dezentralen ATU-Gerät entsprachen allgemein die vertikalen Lufttemperaturunterschiede, die Fußbodentemperaturen und die asymmetrische Strahlung nach DIN EN ISO 7730 der Kategorie A und wiesen somit keine lokalen Unbehaglichkeiten auf. Jedoch ist das Zugluftrisiko bei den lokalen Unbehaglichkeiten kritischer zu betrachten. In den Winterfällen konnte die Kategorie B, welche als Planungskategorie für Neubauten zählt, zum größten Teil nicht eingehalten werden. Im Sommer stellt die Zugluft keine lokale Unbehaglichkeit für den Nutzer dar.

Bei den Bewertungsmethoden nach DIN EN ISO 7730 über den PMV-Index und nach DIN EN ISO 14505-2 der Dressman Äquivalenttemperaturen zeigten sich geringe Unterschiede. Diese sind auf mehrere Faktoren zurückzuführen. Die Dressman Daten dienen als Stichprobe im Raum, hingegen beruht die Bewertung des PMV- und PPD-Indexes auf einer statistischen Verteilung. Da die Raumlufteuchte keinen Einfluss auf die Äquivalenttemperaturen hat, entstehen zudem Unterschiede aufgrund der nur teilweisen Berücksichtigung dieser Größe.

Variantenrechnung

Mit den bestehenden Simulationsmodellen konnten nun verschiedenste Varianten durchgerechnet werden, ohne das physische Aufbauten und Messungen notwendig sind.

Bodentemperatur

Bei der Betrachtung von unterschiedlichen Bodentemperaturen wurden die Versuchsfälle 6.1a für den Winter und 6.2a für den Sommer als Basisvarianten herangezogen. In den Versuchsmessungen wurde jeweils eine um 5 Kelvin höhere Temperatur des Unterbodenluftraumes gegenüber der Kabinentemperatur angenommen. Dieser Temperaturunterschied ist in der Praxis auf die Abwärme der Versorgungsleitungen, die in diesem Bereich verlaufen, zurückzuführen. Durch das in EcoCab entwickelte dezentrale Klimatisierungskonzept kann sich die Temperatur in diesem Bereich in Zukunft ändern. Um hier eine Abschätzung der Auswirkungen einer solchen Veränderung auf die Behaglichkeit machen zu können, wurden eine sommerliche und eine winterliche Variante simuliert. Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse bezüglich dem Behaglichkeitsempfinden des Nutzers wurde jeweils die Position am Bett bewertet. Der zeitliche Verlauf des vorausgesagt mittleren Votums (PMV) für die Varianten ist in der Abbildung 10 dargestellt. In der Grafik sind ergänzend die Behaglichkeitskategorien farblich markiert. Dabei entspricht dunkelgrün der Kategorie A, hellgrün der Kategorie B und gelb der Kategorie C. In den rot markierten Bereichen können die Anforderungen an die Behaglichkeitskategorien nicht erfüllt werden.

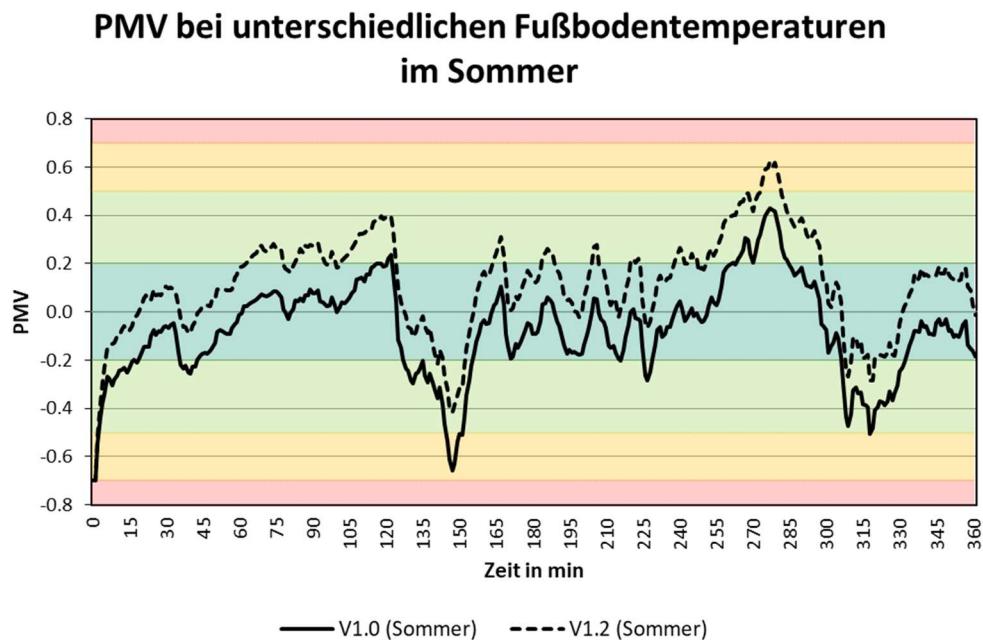


Abbildung 10: Verlauf des PMV-Indexes bei unterschiedlichen Fußbodentemperaturen im Sommer

Eine Temperaturdifferenz zwischen den Varianten von 2 Kelvin hat durchschnittlich eine Verschlechterung des PMV-Indexes von 0,2 zur Folge. Das ist für den Winter- als auch für den Sommerfall gültig.

Fensterglas

Der Einfluss der Fensterkomponente auf das Behaglichkeitsempfinden wurde in den folgenden Varianten untersucht. Dies ist von Bedeutung, da im Arbeitspaket 5 durch den Projektpartner DLR u.a. die Fensterverglasung energetisch optimiert wurde. Die damit einhergehenden Veränderungen der thermischen Behaglichkeit in der Kabine wurden so entsprechend eingeschätzt.

Zuerst wurden die Auswirkungen auf den PMV-Index der verschiedenen U-Werte analysiert. Dazu wurde der U-Wert in den Simulationen bei einem gleichbleibenden g-Wert variiert. In der folgenden Grafik wird der empfundene thermische Komfort (PMV) über einen Wintertag gezeigt. Eine lineare Abhängigkeit zwischen der Änderung des U-Wertes und einer resultierenden Änderung des PMV-Indexes kann nicht festgestellt werden.

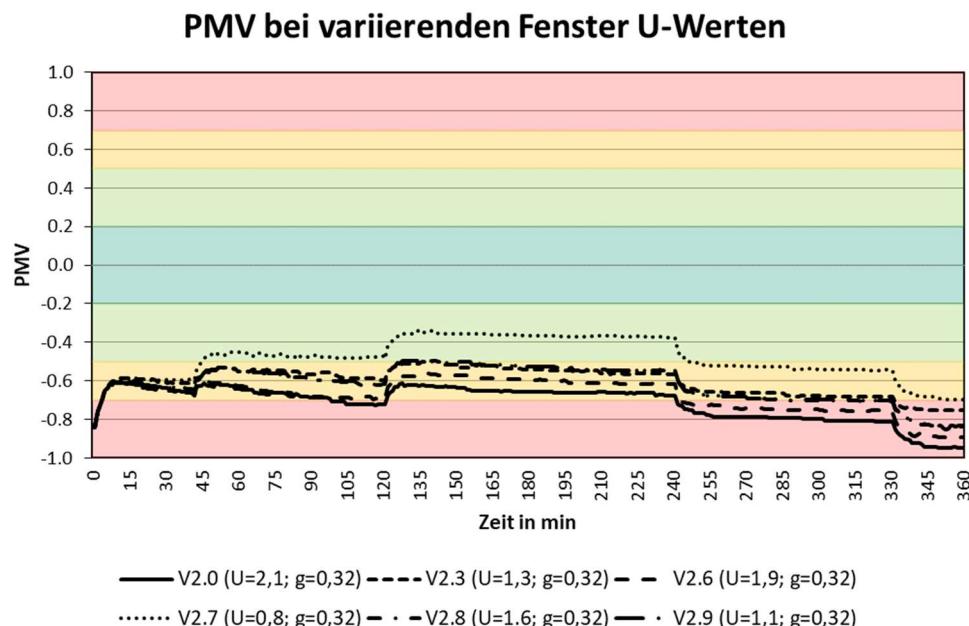


Abbildung 11: Verlauf des PMV-Indexes bei unterschiedlichen Fensterglastypen (im Winterfall bei gleichem g-Wert)

In der Abbildung 11 zeigt sich, dass ein anderes Fensterglas mit einem besseren U-Wert zu einem deutlich behaglicheren Raumklima im Aufenthaltsbereich am Fenster führt. Zudem trägt ein besserer U-Wert zur Reduktion der Wärmeübertragung von außen nach innen an heißen Sommertagen bei. Eine Aufgliederung der Varianten nach U-Wert und g-Wert ist in der Abbildung 12 sichtbar. Um die Folgen der Fenstertypen abschätzen zu können, ist der resultierende mittlere PMV-Index mit aufgeführt. Die einzelnen Datenpunkte sind je nach Behaglichkeitskategorie farblich markiert. Hellgrün entspricht dabei der Kategorie B, gelb entspricht der Kategorie C und rot entspricht einer schlechteren Wertung als Kategorie C.

Fensterglastypen mit dazugehörigem PMV-Index

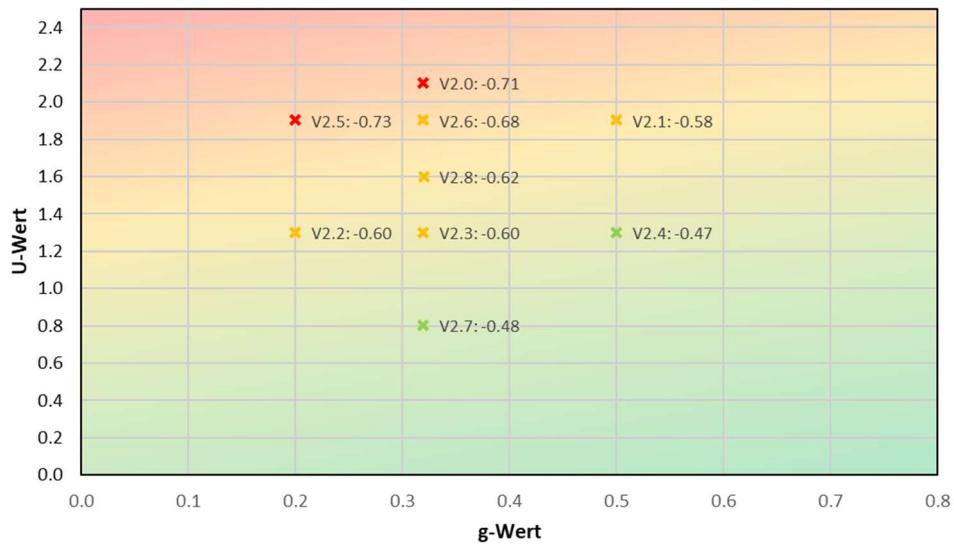


Abbildung 12: Charakteristische Werte (U- und g-Wert) der Fensterglastypen mit dem dazugehörigen PMV-Index. Der Farbverlauf wurde anhand der dargestellten Einzelwerte generiert.

Es zeigte sich, dass unabhängig vom Außenklima, ein niedriger U-Wert sich positiv auf die Behaglichkeit des Nutzers auswirkte. Im Winter sorgte zusätzlich ein hoher g-Wert für ein behagliches Raumklima. Dazu gegensätzlich wirkten sich hohe g-Werte im Sommer negativ auf das thermische Wohlbefinden aus. Für die V2.7 mit einem U-Wert von 0,8 W/(m²K) und einem g-Wert von 0,3 ergab sich nach technischen Möglichkeiten die besten Raumklimabedingungen.

Virtuelles Entwicklungskockpit

Um die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Simulationsmodelle möglichst einfach zugänglich zu machen und die gegenseitigen Abhängigkeiten zu veranschaulichen, wurde ein virtuelles Entwicklungskockpit zur integrierten Simulationsbewertung erstellt. Dieses Tool auf Basis eines Tabellenkalkulationsprogrammes greift auf die Teilergebnisse der Simulationsmodelle zu, gewichtet diese je Fachdisziplin und ermöglicht so eine einfache und übersichtliche Bewertung neuer Entwicklungsvarianten.

Dafür wurden die Ergebnisse der hygrischen-, energetischen- und thermische Behaglichkeitsmodelle zusammengeführt. Für den Austausch wurde ein Exportformat für die jeweiligen Simulationsmodelle festgelegt. Dieses kann über Makros in den jeweiligen Tabellenblättern hochgeladen werden. Etwaige abgeleitete oder berechnet Größen werden über Makros des Tabellenkalkulationsprogramms innerhalb der Arbeitsmappe errechnet. Die einzelnen Bewertungsgrößen wurden in der Folge gewichtet, sodass eine zusammengefasste Bewertung je Kategorie zwischen 0 und 1 skaliert entsteht. Zusätzlich wurden die Bewertungen für alle durchgeführten Referenzfälle ermittelt und als Vergleichsdatenbasis in der Arbeitsmappe hinterlegt. Für die vergleichende Bewertung einer neuen Entwicklungsvariante können diese dann innerhalb eines Spinnennetzdiagramms denen einer Referenzkabine gegenübergestellt werden (vgl. Abbildung 14).

Die hinter den Überkategorien liegenden Einzelbewertungen und Rohdaten sind in eigenen Tabellenblättern detailliert gegliedert. Dort können für die detaillierte Bewertung auch zusätzliche Auswertungen und Diagramme eingesehen werden. Der Feuchtschutz bewertet dabei das Tauwasserrisiko im Bereich der Wärmebrücke der Fenstertüre, sowie das Schimmelrisiko an Innenoberflächen. Die thermische Behaglichkeit bewertet PPD bzw. PMV sowie die lokale thermische Unbehaglichkeit. Aus den Simulationsergebnissen des DLR werden der elektrische- und thermische Energiebedarf sowie der Deckungsgrad mit regenerativen Energien bewertet (vgl. Abbildung 13). Jede Unterkategorie wird in einem eigenständigen Tabellenblatt ausgewertet.

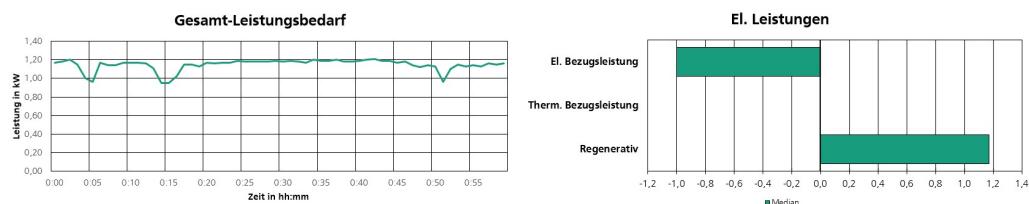


Abbildung 13: Visualisierung der Detailergebnisse der Energiebedarfe im virtuellen Entwicklungskockpit.

Neben der direkten Auswertung innerhalb des Bewertungskockpits ist auch ein Export der Bewertungsdaten für die Verwendung innerhalb der multikriteriellen Bewertung im Rahmen des AP 7 möglich.

Darüber hinaus ist das virtuelle Entwicklungskockpit so aufgebaut, dass mehrere Varianten miteinander und gegen einen ausgewählten Referenzfall verglichen werden können, wie es exemplarisch in Abbildung 14 dargestellt ist.

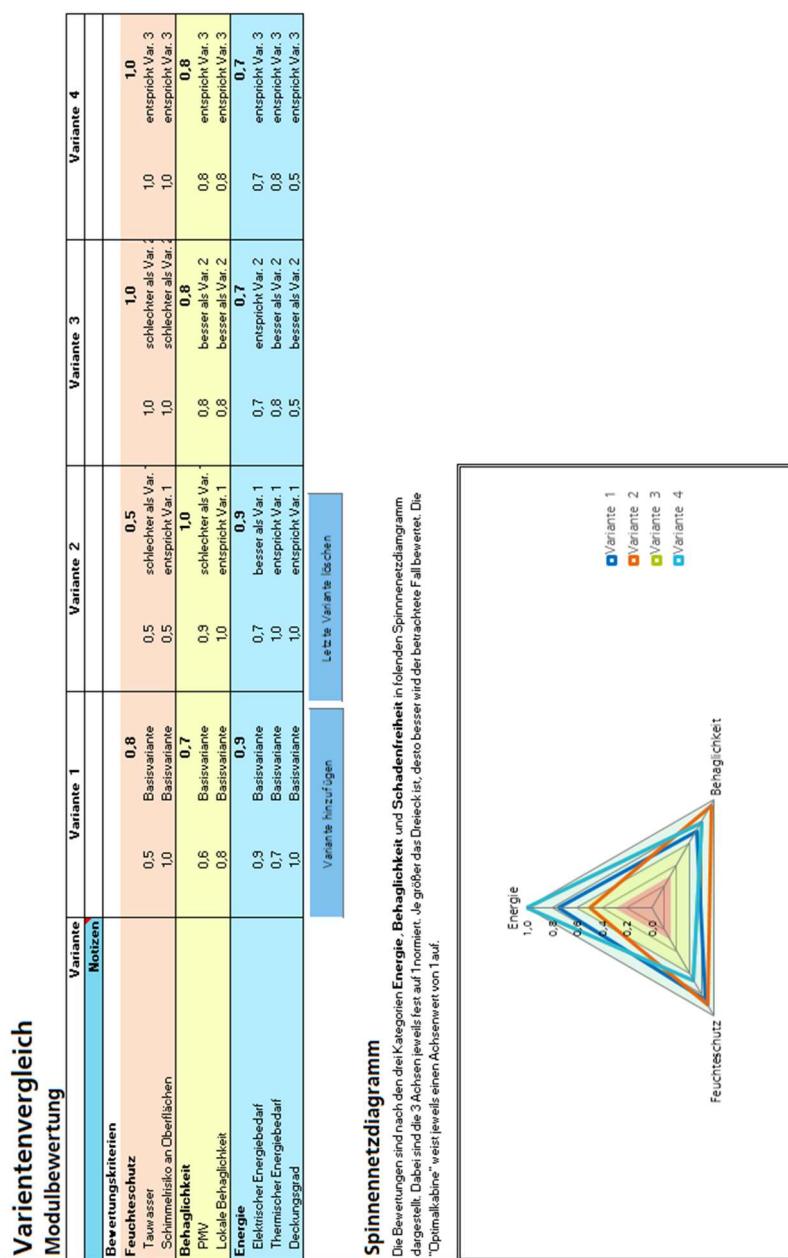


Abbildung 14: Beispiel für den Vergleich mehrerer Varianten im Bereich der integralen Modulbewertung des virtuellen Entwicklungskockpits

Multikriterielle Qualitätsbewertung

Gemäß des im Arbeitspaketes 1 festgelegten Bewertungsrahmens liefert das AP 6 Aussagen zur thermischen Behaglichkeit und zum elektrischen Energiebedarf im Vergleich zur Referenzkabine für das AP 7 (multikriterielle Qualitätsbewertung). Für die thermische Behaglichkeit wird weiterhin unterschieden zwischen generellen Behaglichkeitsbewertungen, welche für die gesamte Kabine Gültigkeit haben, dies sind *Percentage of dissatisfied people* (PPD) und *Predicted mean vote* (PMV) und lokalen Behaglichkeitskenngrößen. Für die lokalen Behaglichkeitskenngrößen wurde zwischen zwei Positionen auf Höhe des Bettes und am Schreibtisch neben dem Fenster unterschieden, die dort bewerteten lokalen Phänomene sind im Einzelnen:

- Strahlungsasymmetrie
- Zugluft
- Vertikaler Temperaturunterschied
- Fußbodentemperatur

Auf Grund der Schwierigkeiten mit der Regelung des ATU ist die Belastbarkeit der Ergebnisse auf den aktuellen Aufbau und die aktuelle Version der Regelung beschränkt.

Fazit

Für die dezentrale Klimatisierung mit dem ATU wurden zwei Simulationsmodelle (WUFI®+, VEPZO) entwickelt und validiert. Während sich das Simulationsmodell VEPZO auf die Berechnung von Luftströmungen und der thermischen Behaglichkeit konzentriert, liegt der Fokus von WUFI®+ auf energetischen Aspekten und hygrischen Fragestellungen wie Tauwasserbildung und Kondensation. Im Vergleich zur betrachteten bisherigen Klimatisierung ergaben sich für das ATU etwas größere Abweichung zwischen Simulationsmodell und Messung. Einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Ergebnissen beider Modelle bei gleicher Klimatisierung gibt es hingegen nicht. Über alle Varianten ergibt sich für das ATU, bezogen auf den RMSE, die größte Abweichung für VEPZO an der Ostwand und bezogen auf den Median für die Raumecke in WUFI®+. Letzteres ist auf die im Standardfall nicht gesondert berücksichtigte Wärmebrücke in der Raumecke zurückzuführen. Über alle Fälle und Modelle zeigt sich eine zufriedenstellende Modellqualität für die Raumtemperatur in beiden betrachteten Räumen (Bad, Kabine). Auf Raumebene liefert WUFI®+ bessere Ergebnisse hinsichtlich der rel. Raumluftfeuchte. Die Abweichungen steigen mit zunehmender Feuchtelast, was in der Folge dazu führt, dass das Bad etwas schlechtere Übereinstimmung hat als die Kabine. Zusammenfassend kann für das Modell mit WUFI®+ festgehalten werden, dass mit dem hygrothermischen Simulationsmodell, Raumklima, Wärmeströme, Behaglichkeit sowie die Feuchteströme der beiden betrachteten Zonen (Nasszelle und Kabine) realitätsnah simuliert werden konnte. Das Feuchteverhalten (Kondensation) der ATU konnte hingegen nur vereinfacht nachgebildet werden, da Strömungsverhältnisse und die komplexe Geometrie des Lüftungsgerätes in der Raumsimulation nur vereinfacht abgebildet wurden. Der RMSE über alle ATU-Varianten gemittelt lag für die Raumtemperatur bei 0,33 bei einer Standardabweichung von 0,32 sowie bei 2,30 mit einer Standardabweichung von 1,02 für die rel. Raumluftfeuchte.

Für das VEPZO Simulationsmodell der ATU kann zusammenfassend festgestellt werden, dass Raumklima, Luftströmungen sowie die thermische Behaglichkeit der betrachteten Zonen realitätsnah simuliert werden konnte. Die Abweichungen waren größer als in der Bestandsvariante mit dem FCU. Der RMSE über alle ATU-Varianten gemittelt lag für die Raumtemperatur bei 0,28 bei einer Standardabweichung von 0,37 sowie bei 2,31 mit einer Standardabweichung von 2,07 für die rel. Raumluftfeuchte.

Allgemein kann für die betrachteten ATU-Varianten festgehalten werden, dass ein geringerer solarer Wärmeeintrag im Winter zwingend notwendig war, um die thermische Behaglichkeit im Innenraum auch an Positionen in der Nähe der Fenstertüre zu gewährleisten. Die Strömungsgeschwindigkeiten der Zuluft im Bereich des Einbauschanks waren mit zu hoch. Hinzu kam das periodische, unstetige Verhalten des Zuluft-Lüfters, welches auf die Steuerung des ATU zurückzuführen ist. Im Vergleich zur bisherigen Klimatisierung nimmt die thermische Behaglichkeit in der Kabine leicht ab. Dies ist auf die höheren Luftgeschwindigkeiten und das generell etwas zu kühle Raumklima zurückzuführen. Die lokale thermische Behaglichkeit (Strahlungsasymmetrien, Temperaturunterschiede zwischen Boden und Decke) ist hingegen unkritisch, hier ist kein Unterschied zum FCU zu erwarten.

Im Kapitel Variantenrechnungen wurden gezeigt, welche Auswirkungen einzelne Aspekte der dezentralen Klimatisierung und der angepassten Energieversorgung auf die thermische Behaglichkeit in der Kabine haben. Eine Veränderung der Temperatur im Bereich des Bodens um 2 K hat dabei eine Veränderung des PMV um 0,2 zur Folge. Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit ergaben sich die besten Bewertungen bezogen auf den PMV für eine Verglasung mit einem U-Wert von 0,8 W/m²K und einem g-Wert von 0,3. Diese Werte

können u.a. von Dreischeibenverglasungen erreicht werden, welche dem Passivhausstandard genügen.

Durch das dezentrale Lüftungsgerät besteht zukünftig die Möglichkeit die Zuluft-Temperatur in einem weiteren Bereich zu variieren.

Ausblick

Da sich die Messergebnisse mit den angepassten Simulationsmodellen jedoch gut wiedergeben ließen, ist nach einer Überarbeitung der Steuerungssoftware zu erwarten, dass eine erneute Simulation zu einer günstigeren Behaglichkeitsbewertung führt. Einen Sonderfall stellt hier die Implementierung des Wärmetauschers im Simulationsmodell VEPZO dar. Hier wurde auf Grund des starken Ausfalls an Kondensat ein empirisches Modell implementiert. Da zu erwarten ist, dass sich das ATU bei angepasster Steuerungssoftware deutlich anders verhält, muss dieses Modell zukünftig noch angepasst werden. Dazu kann entweder ein generisches Modell nach Angaben des Herstellers angepasst oder ein neues physisches Muster messtechnisch erfasst werden, um daraus ein neues empirisches Modul zu erzeugen.

Zusätzlich hat sich gezeigt, dass sich mit Hilfe der Simulationsmodelle konstruktive Änderungen bzw. deren Auswirkungen auf z.B. das Raumklima und die thermische Behaglichkeit gut darstellen lassen. Die Suche nach einer optimalen technischen Lösung kann dadurch deutlich beschleunigt werden und die Kosten durch eine Reduktion der physischen Testläufe reduziert werden. Dies gilt auch für zukünftige Fragestellungen wie z.B. der Verwendung von alternativen Materialien für Innenoberflächen wie z.B. Wände oder Bodenbeläge, andere Regelungsansätze oder Tauwasserabschätzungen im Lüftungsgerät bei anderen Außenklimaten oder abweichenden internen Feuchtelasten.

Hinsichtlich möglicher Weiterentwicklungen der Anlagentechnik in Modelica ist die Implementierung der Wärmetauscher zu nennen. Das vorhandene Standard-Modul für Kreuzstromwärmetauscher war für den betrachteten Anwendungsfall unzureichend. Deshalb wurde ein neues empirisches Modell entwickelt, welches ausschließlich spezifisch für den betrachteten Wärmetauscher repräsentative Ergebnisse liefert. Für zukünftige Untersuchungen wäre es daher sinnvoll weitere Standard-Module eines Kreuzstromwärmetauschers in der Kombination mit anderen Lüftungskomponenten in der Modellbibliothek zu implementieren.

Für WUFI® + hat sich der Initialisierungszeitraum als problematisch herausgestellt, dieser kann derzeit minimal auf 0,1 Tage also 2,4 h gesetzt werden. Für die Validierung mit Versuchen, die eine kurze Laufzeit haben, kommt es zu einer Überlagerung mit der Einschwingphase. Um hier zukünftig eine noch bessere Übereinstimmung zu bekommen, sollte die Einschwingphase frei gewählt werden können.

Die Berechnung der rel. Luftfeuchten hat gezeigt, dass WUFI® + hier etwas höhere Genauigkeiten erzeugt als dies in VEPZO möglich ist. Andererseits hat VEPZO Vorteile bei der Berechnung von komplexeren Geometrien, wie sie bei einzelnen anlagentechnischen Komponenten vorkommen, gezeigt. Aufgrund dieser Aspekte wäre zukünftig eine »Kopplung« der einzelnen Simulationsmodelle eine sinnvolle Erweiterung.

2.1.6 Multikriterielle Qualitätsbewertung

Das AP7 umfasste die prozessbegleitende und abschließende Bewertung ausgewählter Materialien und Kabinentechnologien für die Weiterentwicklung der Kabine zur EcoCab-Kabine. Die Arbeiten des Fraunhofer IPB erfolgten in enger Zusammenarbeit mit DLR, Uni Lü und MW.

Im Rahmen der multikriteriellen Qualitätsbewertung führte das Fraunhofer IPB die ökonomischen Bewertung verschiedener Varianten der Weiterentwicklung der Schiffskabine durch und stellte die Ergebnisse für die multikriterielle Qualitätsbewertung bereit.

Wesentliche Grundlagen und Ergebnisse der ökonomischen Analyse werden nachfolgend vorgestellt. Weiterführende Information zur ökologischen und sozialen Bewertung sowie zu den abschließenden Ergebnissen der multikriteriellen Qualitätsbewertung können dem Partnerbericht des DLR entnommen werden.

Ökonomische Bewertung (als Teilaspekt der multikriteriellen Qualitätsbewertung)

Nachfolgend werden die wichtigsten Randbedingungen bzw. Festlegungen zur Ermittlung der ökonomischen Potenziale verschiedener Varianten der Weiterentwicklung der Schiffskabine aufgeführt. Ausgehend von einer gängigen, repräsentativen Schiffskabine (Referenzkabine) wurden hierbei verschiedene Varianten in unterschiedlicher Abstufung - bis hin zur Entwicklung der innovativen EcoCab-Kabine - analysiert.

Zielstellung

Zielstellung der prozessbegleitenden ökonomischen Analyse durch das Fraunhofer IPB war es:

- das ökonomische Potenzial bei Einsatz neuer Technologien und Materialien einzuschätzen (prozessbegleitende Analyse im Rahmen des AP 7.1.1) sowie
- eine abschließende ökonomische Bewertung durchzuführen (auf Basis der innovativen EcoCab-Kabine, AP 7.2.1)

Die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung sind zur Kommunikation nach intern (Projektpartner, MEYER WERFT) und extern (Fördergeber, Forschung, interessierte Öffentlichkeit) bestimmt. Eine kritische (externe) Prüfung wurde nicht durchgeführt.

Zusätzlich zu denen für die Potenzialabschätzung (siehe Kapitel 2.1.4) definierten Randbedingungen des Untersuchungsrahmens beziehungsweise der Festlegungen zur Referenzkabine werden nachfolgend, wesentliche und spezifische Randbedingungen für die prozessbegleitende und abschließende Bewertung erläutert.

Szenarien der Weiterentwicklung der Schiffskabine

Weiterhin konnten im Projekt Szenarien für die Weiterentwicklung der Schiffskabine abgeleitet werden. Für die ökonomische Bewertung, als Teil der im Projekt nachfolgenden multikriteriellen Qualitätsbewertung, wurden verschiedene Szenarien der Schiffskabine analysiert, die ebenfalls für die ökologische Analyse des Projektpartners DLR zu Grunde gelegt

wurden. Ökonomische und ökologische Bewertung im Projekt folgen damit möglichst einheitlichen und konsistenten Randbedingungen.

Tabelle 3 dokumentiert die für die ökonomische Bewertung analysierten Szenarien der Weiterentwicklung der Schiffskabine, die im Projekt abgeleitet wurden – ausgehend von der Referenzkabine hin zur innovativen EcoCab-Kabine.

Tabelle 3: Szenarien für die Weiterentwicklung der Schiffskabine (ausgehend von der Referenz)

Szenario	Kabinenkonstruktion	Verglasung	Energieversorgung	Kraftstoff
Baseline (Referenzkabine)	Referenz	Standard	FCU, Generator	HFO bzw. MFO
1a			ATU, Generator	
1b				LNG
1c				Methanol, reg.
2b			ATU, Generator, PV (maximal)	LNG
2c				
4c				Methanol, reg.
6c		Schaltbar; g-Wert=0,35		
7c	Demonstrator	Schaltbar; g-Wert=0,04		
8c		Standard		
9c (EcoCab-Kabine)		Schaltbar; g-Wert=0,35		

Funktion und funktionelle Einheit

In Analogie zur Ökobilanz (9) wurde für die Analyse von ökonomischen Potenzialen im Rahmen der Lebenszykluskostenrechnung eine Bezugsgröße für die Ergebnisdarstellung zu Grunde gelegt - die sogenannte funktionelle Einheit. Sie repräsentiert eine quantifizierbare Größe zur Abbildung der Funktion des untersuchten Produktes und dient als Bezugsgröße für die Gegenüberstellung von ökonomischen Potenzialen unterschiedlicher betrachteter Varianten.

Neben dem in AP 1 definierten Qualitätsverständnis der zukünftigen Schiffskabine ist eine grundlegende Funktion die Flächenbereitstellung zum behaglichen Aufenthalt von durchschnittlich zwei Passagieren. Behaglichkeit wird unter anderem durch entsprechende Konditionierung und thermischen Innenraumkomfort sichergestellt. Die Funktion der Flächenbereitstellung soll über einen geforderten spezifischen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren (durchschnittliche angenommene Lebensdauer der Schiffskabine) aufrechterhalten werden. Diese Anforderungen und Funktionen sollen auch bei Veränderung im Kabinendesign und bei technologischer Weiterentwicklung erfüllt werden. Als Bezugsgröße wird daher die komplette Kabine (1 Stück) festlegt.

Berücksichtigte Lebenszyklusphasen

Die ökonomische Bewertung berücksichtigt die folgenden Lebenszyklusmodule: die Herstellung, inklusive Abschätzung zum Transport der durch die Werft zugekauften und angelieferten (Vor-)Produkte; die Nutzungsphase, d.h. den Ersatz und Austausch von Kabinenkomponenten, die eine geringere Lebensdauer als der zu Grunde gelegte Betrachtungszeitraum (30 Jahre) aufweisen sowie den Kabinenbetrieb, d.h. die ökonomische Abbildung der für Wärme, Strom, Kälte, Wasserversorgung eingesetzten Material- und Energieflüsse bei Nutzung unterschiedlicher Energieträger.

Die Berücksichtigung des Lebensendes der Schiffskabine konnte aufgrund fehlender valider Daten und umfassender Annahmen nicht die ökonomische Analyse im Projekt EcoCab integriert werden. Sie stellt aktuell noch zukünftigen Forschungsbedarf dar. Weiterführend qualitative Ergebnisse zum Lebensende von Kreuzfahrtschiffen wurden im Projekt durch den Projektpartner Universität Lüneburg generiert. In der Regel werden diese am Ende ihrer Nutzungsdauer an kleinere Reedereien veräußert. Ein Großteil der so veräußerten Schiffe wird am Lebensende dem sogenannten »Beachen« zugeführt (20). Die Abbildung und ökonomische Berücksichtigung dieser Prozesse ist aufgrund fehlender valider Daten (noch) nicht möglich. Gleichermaßen gilt für denjenigen (sehr geringen) Anteil an Kreuzfahrtschiffen (21), der aktuell innerhalb der Europäischen Union, einem entsprechenden zertifizierten Verwertungsbetrieb zugeführt wird.

Berücksichtigte Hauptbauteile der Schiffskabine

Für die ökonomische Bewertung wurden Hauptbauteile der Schiffskabine berücksichtigt und in spezifische Kategorien und Gruppen (Wohnraum, Nasszelle, Energieversorgung, Außenraum, Transporte) zugeordnet.

Verbrauchsmaterialien wie Handtücher u. ä. wurden für die ökonomische Analyse nicht berücksichtigt. Für die Weiterentwicklung im Sinne einer C2C-geeigneten Schiffskabine wurden diese Aspekte im Rahmen des Arbeitspaketes AP3 durch den Projektpartner EPEA aufgegriffen.

Einschätzung zur Datenqualität

Die Qualität der verwendeten Eingangsdaten für die ökonomische Bewertung ist als gut einzustufen. Die erhobenen und genutzten Daten sind zeitlich repräsentativ für die Jahre 2019 bis 2022 und weitestgehend geografisch repräsentativ für Deutschland. Für die Abschätzung von Kraftstoffkosten wurde auf europäische Werte zurückgegriffen. Die Kostendaten für die Herstellung der Schiffskabine wurden weitestgehend vollständig erfasst und beruhen auf Primärdaten des Projektpartners MEYER WERFT. Datenlücken, insbesondere für die innovativen Technologien und Materialien in der EcoCab-Kabine wurde soweit möglich über repräsentative Marktprodukte oder über einen pauschalen Aufschlag abgeschätzt. Für die Nutzungsphase standen Erfahrungswerte aus bereits durchgeföhrten Projekten (22), aus Sekundärliteratur (23) und aus Ergebnissen der Simulation zum Kabinenbetrieb seitens des Projektpartners DLR zur Verfügung.

Annahmen und Abschätzungen für die Kabinenkonstruktion (Herstellung, Ersatz/Austausch)

Für die ökonomische Analyse wurden weiterhin folgende Annahmen und Abschätzungen zur Berücksichtigung der Kabinenkonstruktion für Herstellung sowie Ersatz und Austausch im Laufe des Betrachtungszeitraumes zu Grunde gelegt:

- Dezentrale Erzeuger (wie z. B. der Schiffsgenerator) wurden für die ökonomische Analyse kostenseitig nicht berücksichtigt. Effizienzen des Erzeugungs-/Verteil-systems wurden aber bei der Ermittlung des Kraftstoffbedarfs im Rahmen der Simulationen des Projektpartners DLR eingeschlossen.
- Herstellungskosten für den innovativen Materialeinsatz bei Produktoptimierung (möglichst auf Basis C2C-zertifizierter Produkte) ausgewählter Kabinenkomponenten wurden überschlägig und pauschal mit einem Aufschlag von 20 % auf die ursprünglichen Kosten der Referenzkabine angesetzt.
- Aufgrund z. T. fehlender Datengrundlage für eine etwaige Verlängerung der Nutzungsdauer bei Einsatz von C2C-zertifizierten Produkten, wurden sowohl im Referenzszenario als auch in den innovativen Szenarien (z. B. EcoCab-Kabine) identische Nutzungsdauern für potenzielle optimierten Produkte und Komponenten angesetzt.
- Für die innovativen Komponenten der Energieversorgung lag für das ATU eine Kostenabschätzung seitens des Projektpartners MAC vor. Die Kosten für den Einsatz von Photovoltaik (PV) und der schaltbaren Verglasung wurden auf Basis vorhandener Marktprodukte (24) (25) abgeschätzt.
- Für Hauptbauteile wurden Nutzungsdauern (22) für Ersatz und Austausch über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren abgeleitet, gestützt durch Experten-interviews bei Refit-Werften durch den Projektpartner Uni Lü.

Annahmen und Abschätzungen für den Kabinenbetrieb (Kraftstoffe bzw. Kraftstofffeinsatz)

Für die Höhe des Kraftstoffbedarfs im Kabinenbetrieb lagen Simulationsergebnisse des Projektpartners DLR für unterschiedliche Routenführungen und unterschiedliche Kraftstoffe zur Verfügung. Diese wurden unter Annahme des Schiffsbetriebes an 365 Tagen pro Jahr auf einen Kraftstoffbedarf je Jahr skaliert. Routenführung 1 stellte den Sommerbetrieb der Kabine in der Ostsee und den Winterbetrieb in der Karibik dar. Routenführung 2 berücksichtigte den ganzjährigen Betrieb der Schiffsabteilung in der Karibik.

Kosten für die verschiedenen Kraftstoffe wurden auf Basis von Börsenpreisen am Standort Rotterdam (HFO/MFO, LNG) beziehungsweise auf Basis von Kontrakt-preisen (Methanol) angesetzt. Da die Börsenpreise spezifischer Volatilität unterliegen wurden soweit möglich retrospektive Durchschnittswerte ermittelt. Für HFO/MFO wurden frei verfügbare Börseninformation (26) für den Standort Rotterdam und den Zeitraum November 2018 bis September 2022 für die retrospektive Durchschnittswertbildung zu Grunde gelegt. Für LNG wurden frei verfügbare Börseninformation (27) für den Standort Rotterdam und den Zeitraum November 2020 bis September 2022 für die retrospektive Durchschnittswertbildung genutzt.

Für Methanol wurde der 10-Jahresmittelwert für die Jahre 2012 bis 2022 für den EU-Markt angesetzt. Diese Informationen beruhen im Wesentlichen auf ermittelten Kontrakt-preisen (28), bereitgestellt über die Plattform STATISTA (29).

Analysestufen

Für die entwicklungsbegleitende und abschließende Bewertung wurden im Sinne der Transparenz der Ergebnisse drei Stufen der Analyse definiert und festgelegt:

- Analysestufe 0: ohne Berücksichtigung von Preissteigerung und/oder Diskontierung (Barwertbetrachtung)
- Analysestufe 1: inklusive Berücksichtigung von Preissteigerungen über den Betrachtungszeitraum aber ohne Diskontierung (Barwertbetrachtung)
- Analysestufe 2: inklusive Berücksichtigung von Preissteigerungen über den Betrachtungszeitraum und Diskontierung (Barwertbetrachtung)

Als Betrachtungszeitraum wurde einheitlich eine Nutzungsdauer von 30 Jahren berücksichtigt. Der kalkulatorische Zinssatz wurde mit 2,5 % pro Jahr ermittelt, auf Basis des durchschnittlichen Leitzinses der Europäischen Zentralbank (30) für die Jahre 1999 bis 2022. Für die Kostensteigerung im Kabinenbau wird die durchschnittliche Inflation gemäß EZB für die Jahre 2012 bis 2022 mit 1,8 % pro Jahr zu Grunde gelegt (30). Kostensteigerungen für die Kraftstoffe HFO/MFO und LNG wurden wegen fehlender Datengrundlage auf Basis der aktuellen Inflation gemäß EZB (7,56 % mit Stand September 2022 und steigender Tendenz) auf 8 % pro Jahr abgeschätzt. Für den Kraftstoff Methanol standen spezifische Jahresreihen für den EU-Markt von 2012 bis 2021 zur Verfügung (29). Aus der Auswertung dieser Daten wurde eine Kostensteigerung von 7,8 % pro Jahr ermittelt und für die Analyse zu Grunde gelegt.

Ergebnisse der prozessbegleitenden und abschließenden Bewertung

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse der abschließenden ökonomischen Bewertung für ausgewählte Szenarien der Weiterentwicklung der Schiffsdecke für die Routenführung 1 vorgestellt. Die spezifischen Ergebnisse der Analysestufe 2 (inklusive Preissteigerung und Diskontierung, Barwertmethode) wurden abschließend für alle Szenarien und alle Routen dem Projektpartner DLR für die multikriterielle Qualitätsbewertung zur Verfügung gestellt.

Für die ökonomische Ergebnisdarstellung werden die Positionen »Kabinenkonstruktion« und »Kabinenbetrieb« sowie die einzelnen Gruppen der Kabinenkonstruktion (Wohnraum, Nasszelle, Energieversorgung, Außenraum, Transport während Herstellung) differenziert. Die Position »Kabinenkonstruktion« aggregiert die potenziellen lebenszyklusbezogenen Kosten der Herstellung sowie diejenigen für den potenziellen Ersatz/Austausch einzelner Komponenten im Rahmen der Nutzungsdauer von 30 Jahren. Mit Hilfe dieser Anteile kann auf die Relevanz jeder Gruppe in Bezug auf die Kabinenkonstruktion rück geschlossen werden. Die Position des »Kabinenbetriebes« identifiziert die potenziellen lebenszyklusbezogenen Kosten, die durch den Einsatz des jeweiligen Kraftstoffes für die Bereitstellung von Wärme, Kälte und Strom in der Kabine aufgewendet werden müssen.

Szenario »Referenzkabine mit Einsatz des FCU-Gerätes und des Kraftstoffes HFO/MFO«:

Bei Berücksichtigung von Kostensteigerungen (Analysestufe 1) und/oder der Diskontierung zukünftiger Zahlungsströme im Rahmen der Barwertberechnung (Analysestufe 2) zeigt sich deutlich die steigende Relevanz der potenziellen Kosten im Kabinenbetrieb - bis hin zu einem relativen Anteil von knapp 41 % der gesamten potenziellen Lebenszykluskosten der Kabine. In Bezug auf die Kabinenkonstruktion stellt sich insbesondere der Wohnraum als

potenzieller Kostentreiber dar. Nasszelle und Außenraum verzeichnen ähnliche Einflüsse auf die potenziellen Lebenszykluskosten beziehungsweise die lebenszyklusbezogenen Kosten der Kabinenkonstruktion. Die Gruppe der Energieversorgung ist für die Kabinenkonstruktion von untergeordneter Bedeutung. Transporte während der Herstellung zeigten sich unter den vorliegenden Randbedingungen für die ökonomische Bewertung als vernachlässigbar. In Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der Potenzialabschätzung (AP 2) zeigte sich unter den gewählten Randbedingungen der abschließenden Bewertung eine höhere Relevanz aus dem Ersatz/Austausch für die Kabinenkonstruktion. Stellten sich die Verhältnisse zwischen Herstellung und Ersatz/Austausch für die Potenzialabschätzung noch mit knapp 67 % zu 33 % dar, zeigen sich diese in der abschließenden Bewertung bei einem Verhältnis von knapp 55 % zu 45 % und unterstreichen damit die Relevanz der Nutzungsphase für die Kabinenkonstruktion.

Szenario »EcoCab-Kabine (Szenario »9c«) mit Einsatz innovativer Materialien der Kabinenkonstruktion, des ATU-Gerätes, von Photovoltaik (PV), von schaltbarer Verglasung (sV) mit einem g-Wert von 0,04 und des Kraftstoffes Methanol (MeOH)«: Bei Berücksichtigung von Kostensteigerungen (Analysestufe 1) und/oder Diskontierung zukünftiger Zahlungsströme im Rahmen der Barwertberechnung (Analysestufe 2) zeigt sich auch hier die steigende Relevanz der potenziellen Kosten im Kabinenbetrieb. In der optimierten Variante der EcoCab-Kabine werden unter den definierten Randbedingungen die geringsten absoluten lebenszyklusbezogenen Kosten im Kabinenbetrieb erreicht. Der zusätzliche Einsatz von schaltbarer Verglasung mit verbesserten Eigenschaften wirkt sich hierbei positiv aus. Die lebenszyklusbezogenen Kosten im Kabinenbetrieb zeigen im Vergleich zum Szenario »Referenzkabine« eine Reduktionspotenzial von knapp (-)75%. Das ökonomische Potenzial zur Reduktion der gesamten lebenszyklusbezogenen Kosten im Vergleich zum Szenario »Referenzkabine« stellt sich mit ca. (-)8 % dar. In der optimierten Variante der EcoCab-Kabine zeigt sich die Relevanz der Kabinenkonstruktion (und damit der eingesetzten Materialien und Komponenten) bei einem relativen Beitrag von 89 % am höchsten. In Bezug auf die Kabinenkonstruktion stellt sich auch hier der Wohnraum als potenzieller Kostentreiber dar. Die Gruppen Nasszelle, Energieversorgung und Außenraum verzeichnen ähnliche Einflüsse auf die potenziellen Lebenszykluskosten.

Interpretation und Schlussfolgerungen

Tabelle 4 fasst abschließend das ökonomische Potenzial der EcoCab-Kabine im Vergleich zur Referenzkabine in den drei untersuchten ökonomischen Analysestufen und für den Lebenszyklus, den Kabinenbetrieb und die Kabinenkonstruktion zusammen.

Tabelle 4: Ökonomische Potenziale der EcoCab-Kabine im Vergleich zur Referenzkabine

Ökonomische Analysestufe	Reduktion / Erhöhung über den Lebenszyklus	Reduktion / Erhöhung aus der Kabinenkonstruktion	Reduktion / Erhöhung aus dem Kabinenbetrieb
0 (ohne Kostensteigerung, ohne Barwertermittlung)	(+) 15 %	(+) 37 %	(-) 74 %
1 (inklusive Kostensteigerung, ohne Barwertermittlung)	(-) 17 %	(+) 37 %	(-) 75 %
2 (inklusive Kostensteigerung, inklusive Barwertermittlung)	(-) 8 %	(+) 38 %	(-) 75 %

Bilanzierungsansatzes beziehungsweise Wahl der Analysestufe: Durch Berücksichtigung von Kostensteigerungen (Analysestufe 1) konnte der ökonomische Einfluss aus der Nutzungsphase der Kabine (Kabinenbetrieb sowie Ersatz/Austausch) deutlich aufgezeigt werden. Mögliche ökonomische Potenziale bei Weiterentwicklung der Kabine zeigen sich zwar in Analysestufe 1 mit Kostensteigerung absolut gesehen am höchsten, vernachlässigen jedoch den Zeitpunkt des Auftretens dieser Zahlungsströme (Cash-Flows) in der Zukunft. Über den Ansatz der Barwertmethode (Analysestufe 2) kann dieser Sachverhalt berücksichtigt werden und sollte daher für die (ökonomische) Entscheidungsfindung favorisiert werden.

Unsicherheit und Sensitivität der Ergebnisse: Die vorliegenden Ergebnisse der ökonomischen Bewertung weisen Unsicherheiten und Sensitivität aus. Zum einen sind diese in der Vollständigkeit der Eingangsdaten für den Untersuchungsgegenstand der Schiffskabine sowie den Abschneidekriterien der Analyse begründet (z. B. keine Berücksichtigung des Lebensendes der Kabine aufgrund Datenlücke). Zum anderen sind diese aber auch in den Randbedingungen der ökonomischen Analyse zu finden (z. B. Wahl des Betrachtungszeitraumes, Ansatz der Kostenwerte für die Kraftstoffkosten, Ansatz und Umgang mit Kostensteigerungen, Ansatz und Umgang mit Diskontierung). Die hier ermittelten spezifischen Ergebnisse der EcoCab-Kabine sind damit nicht generell über ihr ökonomisches Potenzial in den Kabinenbau übertragbar. Nichtsdestotrotz zeigen sie einen möglichen Weg für die Analyse auf.

Routenwahl: Aus den vorliegenden Ergebnissen der ökonomischen Analyse ist keine Präferenz für die Wahl der Routenführung ableitbar. Aus Lebenszyklusperspektive und unter Berücksichtigung der potenziellen Kosten aus der Kabinenkonstruktion stellen sich die ökonomischen Potenziale beider Routenführungen nahezu identisch dar.

Kraftstoffwahl: Der Einsatz von LNG führt unter den gegebenen Randbedingungen zu den höchsten potenziellen Kosten über den Lebenszyklus in vergleichbaren konstruktiven Varianten der Kabine. Ein geringerer Kraftstoffbedarf bei Einsatz von LNG wird durch den der Analyse unterstellten erhöhten Kostenansatz für LNG (im Vergleich zu HFO oder Methanol) kompensiert. Die Varianten der Kabinen mit Einsatz von LNG zeigen damit unter den vorliegenden Randbedingungen gegenteilige ökonomische Potenziale.

Technologiewahl Energieversorgung (Kabinenkonstruktion): Der Einsatz des ATU-Gerätes zeigt deutliche ökonomische Potenziale im Kabinenbetrieb. Der zusätzliche Einsatz von PV wirkt sich ebenfalls positiv auf potenzielle Reduktionen aus. Der Einsatz schaltbarer Verglasung mit einem verbesserten g-Wert zeigt sich aus ökonomischer Perspektive ebenfalls sinnvoll.

Materialwahl (Kabinenkonstruktion): Die Weiterentwicklung der Kabine (im Sinne der Erhöhung des Anteils von C2C-zertifizierten Materialien) führt zu zusätzlichen potenziellen Kosten für die Kabinenkonstruktion über den Lebenszyklus. Diese können aber durch potenzielle Reduktionen im Kabinenbetrieb (bei Einsatz der zuvor genannten Technologien zur Energieversorgung) durchaus kompensiert werden.

Fazit und Ausblick

Die Übertragung der methodischen Herangehensweise und Randbedingungen für die ökonomische Bewertung der Schiffskabine aus dem Hochbau sind möglich und wurden im Projekt erprobt – sowohl für die ökonomische Potenzialabschätzung als auch die entwicklungsbegleitende und abschließende Bewertung. Für die Vergleichbarkeit zukünftiger Ergebnisse ökonomischer Analysen und/oder einer Form der Benchmark-Ermittlung bedarf es weiterführender, allgemeiner – aber möglichst spezifisch maritimer - Konventionen (z. B. in Bezug auf die Wahl des Diskontierungsfaktors, den Umgang mit Kostensteigerungen, Nutzungsdauern etc.).

Mit Ausblick auf die ökonomische Bewertung besteht insbesondere noch Forschungsbedarf für:

- Die Integration von zukünftigen Zahlungsströmen in Form von Erlösen z. B. im Schiffsbetrieb und/oder am Lebensende der Kabine sowie die Integration der Ergebnisse in den Kontext »Schiff«.
- Die Bewertung betriebswirtschaftlicher Effekte am Lebensende, da hier aktuell eine Datenbasis fehlt (z. B. Sekundärdaten/Primärdaten im deutschen/europäischen Raum bei entsprechenden Verwertungsunternehmen).
- Die Bewertung volkswirtschaftlicher Effekte, insbesondere hervorgerufen durch neue Geschäftsmodelle am Lebensende (z. B. ausgelöst durch das erhöhte Potenzial der EcoCab-Kabine zur Kreislaufführung) oder der Integration von externen Effekten (sogenannter Monetarisierung).

2.2 Positionen zum zahlenmäßigen Nachweis

Der Nachweis des zahlenmäßigen Nachweises ist der gesonderten wirtschaftlichen Endabrechnung zu entnehmen.

2.3 Verwendbarkeit der Ergebnisse

Die Inhalte des EcoCab-Projektes wurden in die Lehre an der Universität Stuttgart sowie an der Hochschule Augsburg eingebbracht.

Die im Beurteilungsrahmen im Projekt erarbeiteten Kriterien der Nachhaltigkeitsbewertung können nun einerseits bei der Entscheidungsfindung und Produktoptimierung im Hinblick auf die neu zu entwickelnden Systemlösungen für die zukünftige, nachhaltige und dezentral versorgte Niedrigenergiекabine unterstützen. Zum anderen sind sie ebenfalls auch in der Kommunikation mit Passagieren von Kreuzfahrtschiffen und/oder späteren Kabinen- bzw. Schiffseignern in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte dienlich.

Generell stellt das EcoCab Projekt für das Fraunhofer IPB einen wichtigen Beitrag bei der Transformation der Baustein der Gesamtstrategie zum Bau nachhaltiger Kreuzfahrtschiffe dar.

2.4 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Vorhabens Laufzeit sind keine relevanten Ergebnisse anderer Stellen bekannt geworden.

2.5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Während der Laufzeit des Projekts sind Zwischenergebnisse in Kooperation mit Forschungspartnern sowie eigenständig veröffentlicht worden, eine Aufstellung ist dem gesonderten Verwertungsplan zu entnehmen.

Literaturverzeichnis

1. **World Commission on Environment and Development (WCED).** Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. 1987.
2. **United Nations (UN).** Report of the United Nations Conference on Environment and Development. Rio de Janeiro, 3-14 June 1992. Volume I. A/CONF.151/Rev.1 (Vol. I). New York, United States of America, 1993.
3. —. Report of the World Summit on Sustainable Development. A/CONF.199/20*. Johannesburg, South Africa, 26 August - 4 September, 2002. New York, United States of America, 2002.
4. **Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V. (DGNB).** DGNB System, Kriterienkatalog Gebäude Neubau, Version 2018. Stuttgart, 2018.
5. —. DGNB System, Kriterienkatalog Innenräume, Version 2018.
6. **BRE Global Limited.** BREEAM® In-Use International. Technical Manual. SD221 - 2.0:2015, February 2016. Watford, United Kingdom.
7. **U.S. Green Building Council (USGBC).** LEED v4.1 - Interior Design and Construction. Washington D.C., United States of America. April, 2019. .
8. **Cradle to Cradle Products Innovation Institute.** CRADLE TO CRADLE CERTIFIEDCM. Product Standard. Version 3.0. Amsterdam, The Netherlands. 2015.
9. **Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN).** DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006+A1:2018+A2:2020. Beuth Verlag, Berlin, 2021.
10. **International Organization for Standardization (ISO).** ISO 15686-5: Buildings and constructed assets - Service life planning. Part 5: Life-cycle costing. Second edition 2017-07. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
11. **United Nations Environment Programme (UNEP).** Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. ISBN: 978-92-807-3021-0. DTI/1164/PA. Nairobi, South Africa. 2009.
12. **Schiffe und Kreuzfahrten.** Schiffe und Kreuzfahrten. [Online] 2023. <https://www.schiffe-und-kreuzfahrten.de/kreuzfahrtschiffe/aida-helios-klasse/>.
13. **Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB).** DGNB System, Kriterienkatalog Innenräume, Version 2018. ECO1.1 - Kosten über den Lebenszyklus. Stuttgart, 2018.
14. **Norrefedt, Victor.** *VEPZO A locally refined airflow model for confined spaces to use in optimization applications.* s.l. : Universität Stuttgart, 2013.

15. **Holm, A., et al.** Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. 2004.
16. **Team, R Core.** *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna : s.n., 2020.
17. **Pistohl, Rechenauer und Scheuerer.** *Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2 Heizung, Lüftung, Beleuchtung und Energiesparen*. 2016.
18. **Sedlbauer, Klaus.** Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. 2001.
19. **ISO EN DIN 7730:50.** *Ergonomie der thermischen Umgebung –Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit* . s.l. : Beuth, 2006.
20. **fairkehr GmbH.** fairkehr. Menschen. Nachhaltig. Mobilität. Das VCD Magazin. [Online] [Zitat vom: 9. April 2021.] <https://www.fairkehr-magazin.de/archiv/2015/fk-03-201500/2015-3-titel/3-2015-schiffe-abwracken/>.
21. **European Commission (EC).** European Commision. Home. Topics. Waste and recycling. Ships. [Online] [Zitat vom: 9. April 2021.] https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/ships_en.
22. **BALance Technology Consulting GmbH.** JOULES - Joint Operation for Ultra Low Emission Shipping. [Online] BALance Technology Consulting GmbH, Bremen, Deutschland. <https://joules-project.eu/Joules/>.
23. **Bundesministerium der Finanzen.** AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Gastgewerbe". Fassung vom 01.07.1995. Berlin, Deutschland.
24. **Tepto GmbH.** Tepto GmbH. Photovoltaik. [Online] <https://www.tepto.de>.
25. **Switchfoil International.** switchfoil international. Home. Online-Kalkulator. [Online] <https://switchfoil.de/>.
26. **Ship & Bunker, Vancouver, British Columbia, Canada.** Ship&Bunker. Rotterdam Bunker Prices. MGO. [Online] <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam>.
27. —. Ship&Bunker. Rotterdam Bunker Prices. LNG. [Online] <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#LNG>.
28. **METHANEX Corporation.** methanex. Our Business. Methanex posts regional contract methanol prices for Europe, North America, Asia and China. [Online] <https://www.methanex.com/our-business/pricing>.
29. **Statista GmbH, Hamburg, Deutschland.** Durchschnittlicher Preis für Methanol auf dem europäischen Markt in den Jahren von 2012 bis 2022. Stand September 2022. [Online]
30. **European Central Bank (ECB).** Statistical Data Warehouse. Home. Publications.

