

Abschlussbericht

BMUKN - Umweltinnovationsprogramm

Vorhaben OSe4 - 003544

**Demonstrationsvorhaben zur umweltschonenden Herstellung
verbrauchsminimierter Kühl- und Gefriergeräte mittels
innovativer Vakuumtechnologie**

Zuwendungsempfänger/-in

Liebherr-Hausgeräte Ochsenhausen GmbH

Umweltbereich

Ressourcen

Laufzeit des Vorhabens

14.04.2021 bis 31.12.2024

Autoren

Arzt, Ephraim

Bareiss, Verena

Braun, Jonas

Grimm, Markus

Hiemeyer, Jochen

Maucher, Benjamin

Wowra, Adrian

**Gefördert mit den Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klima-
schutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit**

Datum der Erstellung

30.09.2025

Gefördert durch



Bundesministerium
für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz
und nukleare Sicherheit



Berichtskennblatt

Aktenzeichen UBA:	Vorhaben-Nr. OSe4 – 003544
Titel des Vorhabens: Demonstrationsvorhaben zur umweltschonenden Herstellung verbrauchsminderter Kühl- und Gefriergeräte mittels innovativer Vakuumtechnologie	
Autoren (Namen, Vornamen) Arzt, Ephraim Hiemeyer, Jochen Bareiss, Verena Maucher, Benjamin Braun, Jonas Wowra, Adrian Grimm, Markus	Vorhabensbeginn: 14. Januar 2021
	Vorhabensende (Abschlussdatum): 31. Dezember 2024
Fördernehmer/-in (Name, Anschrift) Liebherr-Hausgeräte Ochsenhausen GmbH Memminger Straße 77–79, 88416 Ochsenhausen	Veröffentlichungsdatum: 30.09.2025
	Seitenzahl: 40 (ohne Berichtskennblatt, Verzeichnisse und Anhang)
Gefördert im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz, nukleare Sicherheit	
Kurzfassung	
Ausgangssituation: Über 90 % des Energieverbrauchs von Kühl- und Gefriergeräten werden zur Aufrechterhaltung der Temperaturdifferenz zwischen Geräteinnenraum und Geräteumgebung aufgebracht. Zur Reduzierung des Energieverbrauchs ist daher die Verbesserung der thermischen Isolierung ein wesentlicher Ansatzpunkt. Darüber hinaus steht für Liebherr im Fokus, von der Entwicklung, über die Produktion entlang der gesamten Prozesskette nach ökologischen Aspekten zu arbeiten. Mit dem Vorhaben sollte der von der LHG beschrittene Weg der Energieeinsparung, Umweltschonung und Nachhaltigkeit von der Entwicklung über die Produktion bis hin zum Recycling konsequent fortgesetzt werden.	
Ziele / Lösungsansatz / Umwelteffekte: Das Vorhaben zielte auf die erstmalige großtechnische Umsetzung eines vollkommen neuartigen Fertigungsprozesses für Kühl- und Gefriergeräte. Die Anlage sollte eine hohe Ressourcen- und Energieeffizienz im Fertigungsprozess, wie auch einen gegenüber dem Stand der Technik signifikant niedrigeren Energieverbrauch in der Gerätenutzung über die gesamte Lebensdauer ermöglichen. Weiterhin sollten eine verbesserte Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit der Geräte erreicht werden. Der Lösungsansatz umfasste im Kern einem neuartigen, technisch komplexen, hochautomatisierten Struktur- und Formgebungsprozess zur Umsetzung eines neuartigen Konstruktionsprinzips zur thermischen Isolation von Kühl- und Gefriergeräten. Unter innovativer Anwendung des Prinzips der Vakuumwärmedämmung wird dabei – dem Aufbau und dem Funktionsprinzip herkömmlicher Vakuumisulationspaneele (VIP) folgend – ein geometrisch komplexer, thermisch hocheffizient isolierender Vakuumkörper nebst Vakuumgerätekörper aufgebaut. Die Außenhülle der Vakuumkörper besteht aus einer Hochbarrierefolie, die das Vakuum inklusive des als Kernmaterial eingesetzten Perlits umschließt. Der entstehende Sandwichverbund aus Vakuumkörper, Innenbehälter (Kunststoff) und Außenhülle (Stahlblech) verleiht der Gehäusestruktur in Verbindung mit der Materialsteifigkeit des Perlits die erforderliche Steifigkeit. Die umgesetzte Fertigungsanlage umfasst die Prozessschritte Formgebung, Deckschichtanbringung und Evakuierung und ist auf eine Produktion von 50.000 Geräten pro Jahr ausgelegt. Die Geräte erreichen die Energieeffizienzklasse A, die Technologie erhielt den Namen BluRoX.	

Das Vorhaben wurde technisch erfolgreich umgesetzt und die erwarteten Umwelteffekte erreicht. PU-Schaum als Dämmstoff entfällt ebenso wie ergänzende VIP, die in herkömmlichen sehr energieeffizienten Geräten zur Verbesserung der thermischen Isolation zum Einsatz kommen. Dies, in Verbindung mit einer modularen Kapselung der Kühltechnik, ermöglicht gegenüber dem Stand der Technik eine deutlich verbesserte Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit. Die Ergebnisse des Messprogramms zeigen auf, dass gegenüber einem repräsentativen Referenzgerät über Herstellung und mindestens 17-jähriger Nutzungsphase pro Gerät insgesamt rd. 1,6 MWh Energie und rd. 800 kg Treibhausgasemissionen (THG-Faktor: 0,498 kg/kWh) eingespart werden. Über eine angenommene 10-jährige Nutzungsdauer der Anlage und die – durch die mindestens 17-jährige Lebensdauer der Geräte – lange Wirkungsdauer der Energieeffizienzeffekte lässt sich auf Basis aktueller Stückzahlenprognosen eine kumulierte Energieeinsparung von mindestens 450 GWh und eine Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Höhe von mindestens 224 kt durch das Vorhaben erzielen. 33 % der Einsparungen entfallen auf die Herstellung und 67 % auf die Nutzungsphase der Geräte.

Schlagwörter

Energieeinsparung, Energieeffizienz, Ressourceneffizienz, Kühl- und Gefriergeräte, Vakuumisolation, Perlit, Cradle to Cradle, Kreislaufwirtschaft, Recycling

Anzahl der gelieferten Berichte

Papierform:

Elektronischer Datenträger:

Sonstige Medien:

Veröffentlichung im Internet:

Report coversheet

Reference no. UBA:	Project no. OSe4 – 003544
Project title: Demonstration project for the environmentally friendly production of consumption-minimised fridges and freezers using innovative vacuum technology	
Autors Arzt, Ephraim Hiemeyer, Jochen Bareiss, Verena Maucher, Benjamin Braun, Jonas Wowra, Adrian Grimm, Markus	Start of project: January 14 th , 2021
	End of project: December 31 st , 2024
Recipient (name, address) Liebherr-Hausgeräte Ochsenhausen GmbH Memminger Straße 77–79, 88416 Ochsenhausen	Publication date: September 30 th , 2025
	No. of pages: 40 (without report coversheet, registers and appendix)
Funded by the Environmental Innovation Program of the Federal Ministry for the Environment, Climate Action, Nature Conservation and Nuclear Safety	
Summary Initial situation Over 90% of the energy consumed by fridges and freezers is used to maintain the temperature difference between the appliance interior and the surrounding environment. Improving thermal insulation is therefore a key approach to reducing energy consumption. In addition, Liebherr focuses on working in accordance with ecological aspects along the entire process chain, from development to production. The aim of the project was to consistently continue the path taken by LHG towards energy saving, environmental protection, and sustainability, from development through production to recycling.	
Approach / goals / environmental effects The project aimed to implement a completely new manufacturing process for fridges and freezers on an industrial scale for the first time. The system was designed to enable a high level of resource and energy efficiency in the production process, as well as significantly lower energy consumption in appliance use over the entire service life compared to the state of the art. Furthermore, improved reparability and recyclability of the appliances was to be achieved. The approach essentially comprised an innovative, technically complex, highly automated structuring and shaping process for implementing a new construction principle for the thermal insulation of fridges and freezers. Following the design and functional principle of conventional vacuum insulation panels (VIP), the innovative application of the principle of vacuum thermal insulation involves the construction of a geometrically complex, thermally highly efficient insulating vacuum appliance body together with a vacuum appliance door. The outer shell of the vacuum body consists of a high-barrier foil that encloses the vacuum, including the perlite used as the core material. The resulting sandwich composite of vacuum body, inner container (plastic) and outer shell (sheet steel) gives the housing structure the necessary rigidity in combination with the material rigidity of the perlite. The production plant implemented comprises the process steps of shaping, applying the top layer and vacuuming, and is designed for a production of 50,000 appliances per year. The appliances achieve energy efficiency class A, and the technology has been given the name BluRoX. The project was successfully implemented from a technical perspective and achieved the expected environmental effects. PU foam is no longer used as an insulating material, nor are supplementary silica-based VIPs, which are used in conventional, highly energy-efficient appliances to improve thermal insulation. This, in conjunction with modular encapsulation of the cooling technology, enables significantly improved reparability and recyclability compared to the state of the art. The results of the measurement programme show that, compared to a representative reference appliance, a total of approx. 1.6 MWh of energy and approx. 800 kg of greenhouse gas emissions (GHG factor: 0.498 kg/kWh) are saved over the manufacturing and at least 17-year usage phase per appliance. Based on an assumed 10-year service life for the system and the minimum 17-year lifespan of the appliances – long-term energy efficiency effects – current unit forecasts, the project can achieve cumulative energy savings of at least 450 GWh and a reduction in greenhouse gas emissions of at least 224 kt. 33% of the savings are attributable to production and 67% to the use phase of the appliances.	

Keywords

energy conservation, energy efficiency, resource efficiency, refrigeration and freezing appliances, vacuum insulation, perlite, cradle to cradle, circular economy, recycling

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Kurzbeschreibung des Unternehmens.....	8
1.2	Ausgangssituation.....	9
1.2.1	Stand der Technik Wärmeisolation Kühl- und Gefriergeräte	9
1.2.2	Motivation zur Umsetzung des Vorhabens	10
2	Vorhabensumsetzung	11
2.1	Ziel des Vorhabens	11
2.1.1	Qualitative Zielsetzung für die Vakuum-Perlit-Technologie.....	12
2.1.2	Quantitative Zielsetzung für die BluRoX-Technologie.....	12
2.2	Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	13
2.3	Umsetzung des Vorhabens	15
2.3.1	Umsetzung des Vorhabens im Überblick	15
2.3.2	Umsetzung des Vorhabens im Detail nach Teilvorhaben	16
2.4	Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)	22
2.5	Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	22
2.6	Konzeption und Durchführung des Messprogramms.....	24
3	Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung	26
3.1	Bewertung der Vorhabensdurchführung.....	26
3.2	Stoff- und Energiebilanz.....	27
3.2.1	Einsparungen im Herstellprozess.....	28
3.2.2	Einsparungen in der Nutzungsphase.....	30
3.3	Umweltbilanz.....	30
3.3.1	Langzeitmessungen und erste Erfahrungen aus der Praxiseinführung	30
3.3.2	Beitrag zum Umweltschutz	31
3.3.3	Qualitative Bewertung zu Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit	33
3.4	Wirtschaftlichkeitsanalyse	38
3.5	Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	39
4	Übertragbarkeit	40
4.1	Erfahrungen aus der Praxiseinführung.....	40
4.2	Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)	41
4.3	Kommunikation der Projektergebnisse	41
4.3.1	Umgesetzte Maßnahmen	42
4.3.2	Geplante Maßnahmen	43
5	Zusammenfassung	44
5.1	Einleitung	44
5.2	Vorhabensumsetzung	44
5.3	Ergebnisse	45
5.4	Ausblick	45
6	Summary	46
6.1	Introduction	46
6.2	Project implementation	46
6.3	Project results	47
6.4	Prospects	47

1 Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens

Die Liebherr-Hausgeräte Ochsenhausen GmbH (im Folgenden LHG) ist die deutsche Produktionsgesellschaft der Sparte Hausgeräte mit Sitz in Ochsenhausen und gehört zur familiengeführten Liebherr-Unternehmensgruppe. Die Unternehmensgruppe beschäftigte 2024 weltweit rd. 54.728 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen, die einen Umsatz von rd. 14,62 Mrd. € erwirtschafteten. Mehr als 40 % des Gruppenumsatzes werden in der Europäischen Union erzielt, wo auch mehr als 70 % der Mitarbeitenden beschäftigt sind. Liebherr zählt zu den weltweit größten Baumaschinenherstellern und ist darüber hinaus in weiteren Geschäftsfeldern tätig, wie z. B. Luftfahrt und Verkehrstechnik, Werkzeugmaschinen, Automationstechnik sowie Hausgeräte.

Die Sparte Hausgeräte entwickelt, produziert und vertreibt mit 6.596 Mitarbeiter:innen weltweit Kühl- und Gefriergeräte und trug 2024 mit rd. 1,1 Mrd. € zum Umsatz der Liebherr-Unternehmensgruppe bei. Der Umsatz der Hausgeräte-Sparte wurde zu rd. 75 % in der Europäischen Union erzielt. Mit jährlich rd. 2 Mio. produzierten Geräten zählt Liebherr-Hausgeräte als Spezialist im Bereich Kühlen und Gefrieren zu den europäischen Marktführern. Die Produktion erfolgt in Deutschland, Österreich, Bulgarien, Malaysia und Indien.

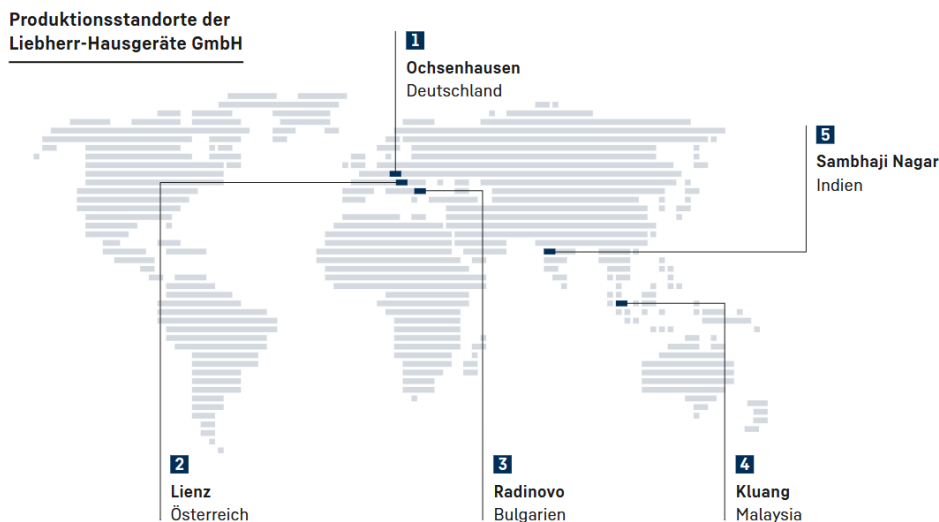


Abbildung 1: Produktionsstandorte Liebherr-Sparte Hausgeräte

Die LHG wurde im Jahr 1954 gegründet. Sie entwickelt und produziert ein breites Portfolio an hochwertigen Kühl- und Gefriergeräten. Die Jahresproduktion beläuft sich auf etwa 800.000 Kühl- und Gefriergeräte. Am Standort Ochsenhausen sind rund 2.000 Mitarbeiter:innen tätig.

Kühl- und Gefriergeräte von Liebherr stehen seit Jahrzehnten für Qualität, Zuverlässigkeit und eine lange Lebensdauer. Insgesamt umfasst das Sortiment über 60 Produktgruppen und mehr als 1.400 Modelle, die freistehend oder als Unter- oder Einbaugeräte zum Kühlen und/oder Gefrieren sowohl für private Haushalte als auch für professionelle Zwecke in Handel, Handwerk, Gastronomie, Gewerbe und Labor zum Einsatz kommen.

1.2 Ausgangssituation

1.2.1 Stand der Technik Wärmeisolation Kühl- und Gefriergeräte

Die Kühl- und Gefrierwirkung von Kühl- und Gefriergeräten entsteht durch das Entziehen von Wärme aus dem Geräteinnenraum und dem darin befindlichen Kühl- und Gefriergut. Dies geschieht durch eine in einem geschlossenen Rohrsystem zirkulierende, bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck verdampfende Flüssigkeit (Kältemittel). Sie entzieht dem Innenraum am Verdampfer („Kälteerzeuger“) Wärme. Damit fortwährend Kältemittel unter Aufnahme von Wärme verdampfen kann, muss das dabei entstehende gasförmige Kältemittel weiter transportiert werden. Über einen Kompressor wird das gasförmige Kältemittel verdichtet, die Temperatur des Kältemittels steigt über die Temperatur der Umgebungsluft an, gibt seine Wärme an die Umgebungsluft ab und verflüssigt wieder.

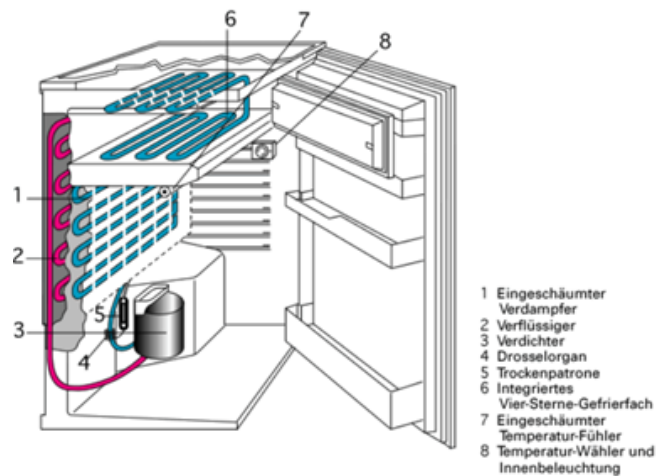


Abbildung 2: Aufbau und Kältemittelkreislauf Kühlschranks (Quelle: HEA-Fachgemeinschaft effiziente Energieanwendung e. V.)

Das Kompressionssystem umfasst Verdampfer (Kälteerzeuger), Verdichter (Kompressor), Verflüssiger (Kondensator) und Drosselorgan. Den aktuellen Stand der Technik stellt, wie in Abbildung 2 dargestellt, eine aus einem Innenbehälter und einer Außenhülle bestehende Doppelstruktur dar, diese bildet die Grundstruktur von Kühl- und Gefriergeräten. Der Innenbehälter dient der Aufnahme des Kühl- und Gefrierbutes, die Außenhülle stellt, wesentlich gestützt durch eine Dämmschicht, die mechanische Stabilität des Geräts sicher. Als Dämmschicht wird in diesen Hohlraum zwischen Außenhülle und Innenbehälter des gesamten Gehäuses thermisch isolierendes Material eingebracht, um den temperaturdifferenzbedingten Wärmetransport zwischen Innenraum und Geräteumgebung zu verringern. Seit den 1950er Jahren wird der Hohlraum dazu mit dem erdölbasierten Kunststoff Polyurethan (PU) ausgeschäumt (siehe nachfolgende Abbildung 3, oben), dies entspricht nach wie vor dem Stand der Technik.

Zwar dient der Polyurethaneinsatz der Verbrauchsreduzierung der Geräte, aus umweltpolitischer Sicht ist die Verwendung von Polyurethan aber nicht unbedenklich:

- Polyurethan ist der weltweit fünfthmeist produzierte, synthetisch aus Erdöl gewonnene Kunststoff und erfordert einen sehr hohen Energieaufwand zur Herstellung.
- Polyurethan ist ein isocyanatbasiertes Produkt. Die risikobehaftete Herstellung von Isocyanaten und Polyurethan erfordert einen hohen Herstellungs- und Sicherheitsaufwand.
- PU-Recycling ist sehr schwierig und erfolgt zum überwiegenden Teil thermisch. Die Verbrennung ist jedoch problematisch, da gefährliche Chemikalien freigesetzt werden können (z. B. Isocyanate, Blausäure und Dioxine). In Deponien zersetzt sich Polyurethan in klimaschädliche Stoffe.

Bei besonders energieeffizienten und weniger preissensiblen Geräten der höchsten Energieeffizienzklassen entspricht es dem Stand der Technik zur Erhöhung der Isolationswirkung des PU-Schaums in begrenztem Umfang zusätzlich Wärmedämmelemente (Vakuumisulationspaneele, abgekürzt VIPs) in den Gehäuseaufbau einzubringen (siehe nebenstehende Abbildung 3, unten). VIPs sind hocheffiziente Wärmedämmelemente, die das Prinzip der Vakuumwärmedämmung nutzen und den durch die Gasmoleküle der Luft bedingten Wärmetransport durch Vakuum

Verschiedene Isolationsvarianten

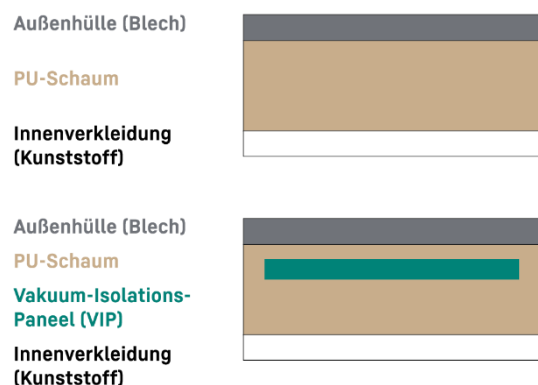


Abbildung 3: Thermische Isolierung von Kühl- und Gefriergeräten nach Stand der Technik

unterbinden. Dadurch kann die Wandstärke reduziert und das nutzbare Kühlvolumen vergrößert werden. VIPs bestehen aus einer mehrschichtigen mit Aluminium bedampften Kunststoffolie und einem druckstabilen, porösen Füllmaterial. Die Kunststoffolie ist als hochdichte Barrierefolie ausgelegt, die Gaseintrag in die VIPs verhindert. Das Innere der VIPs wird auf einen Druck von wenigen mbar evakuiert. Als Kernmaterial kommen Glasfasern, PU-Schaum, Perlitpulver und pyrogene Kieselsäure in Frage. Das ideale Kernmaterial ist kostengünstig und weist geringen Porendurchmesser, geringe Wärmeleitfähigkeit und lange Nutzungsdauer auf. Gemäß Stand der Fertigungstechnik bei Antragstellung stellte pyrogene Kieselsäure technisch das optimale Kernmaterial zur Herstellung von VIPs dar, jedoch ist sie sehr teuer und die Herstellung von VIPs mit pyrogener Kieselsäure als Kernmaterial sehr energieintensiv.

Im konventionellen Fertigungsprozess von Kühl- und Gefriergeräten werden für Korpus und Gerätetür zunächst hohle Formteile aus Blech hergestellt. Anschließend werden diese zur thermischen Dämmung mit PU-Schaum ausgeschäumt, in den bei Geräten hoher Energieeffizienzklassen zusätzlich VIPs eingebracht werden. Die Formteile aus Blech (außen) und tiefgezogenem Polystyrol (innen) bilden im konventionellen Herstellverfahren die Struktur von Korpus und Gerätetür. Neben der Dämmfunktion ist der PU-Schaum wesentlich für die mechanische Stabilität der Gerätekonstruktion verantwortlich, die durch Innenbehälter und Außenhülle alleine nicht gewährleistet wäre.

1.2.2 Motivation zur Umsetzung des Vorhabens

Die Liebherr-Gruppe verfolgt das Ziel, ein wirtschaftlich, ökologisch und sozial nachhaltig aufgestelltes Unternehmen zu werden und durch ihre Corporate-Responsibility-Strategie innovative Lösungen bereitzustellen sowie die Lebensqualität heutiger und zukünftiger Generationen zu verbessern. Den inhaltlichen Rahmen bilden dabei vier zentrale Handlungsfelder: Produkte und Dienstleistungen, Umwelt und Energie, Mitarbeitende und Gesellschaft sowie nachhaltige Unternehmensführung.

Liebherr-Hausgeräte hat diese Corporate-Responsibility-(CR)-Strategie übernommen und gezielt an die eigenen Wirkungsbereiche angepasst, um ihre Nachhaltigkeitsaktivitäten noch wirkungsvoller auszurichten. Im Mittelpunkt stehen dabei fünf zentrale Handlungsfelder – Materialien, Produktion, Nutzung, Recycling sowie Menschen und nachhaltiges Wirtschaften. Sie bilden den klaren Orientierungsrahmen für verantwortungsvolles Handeln.

Verantwortung zu übernehmen ist ein fester, zentraler Bestandteil der Unternehmenswerte von Liebherr. Seit Jahrzehnten legt Liebherr besonderen Wert auf die Forschung und Entwicklung ökologischer Lösungen – stets mit Blick auf den gesamten Lebenszyklus der Produkte. Dieses Selbstverständnis treibt das Engagement für eine nachhaltigere Zukunft maßgeblich voran.



Abbildung 4: Liebherr-Corporate-Responsibility-Strategie

Ein zentraler Entwicklungsschwerpunkt der LHG ist die konsequente Optimierung des Energieverbrauchs und der Energieeffizienz der Kühl- und Gefriergeräte. Dies ist vor allem hinsichtlich der Vielzahl und Langlebigkeit dieser Wirtschaftsgüter von Bedeutung. Im Jahr 2022 verfügte laut Statistischem Bundesamt jeder der 38,1 Millionen deutschen Haushalte über ein Kühl- und nahezu die Hälfte über ein Gefriergerät. Die Anzahl der Kühlgeräte je Haushalt liegt durchschnittlich bei 1,27. Prozesskälte/Kühlgeräte (ohne Klimageräte) ist im Jahr 2023 mit rd. 29,5 TWh (22,7 %) die zweitgrößte Anwendung des Endenergieträgers Strom im Sektor privater Haushalte hinter der Prozesswärme/Kochen (30,6 %)¹. Da es sich bei Kühl- und Gefriergeräten um sehr langlebige Wirtschaftsgüter mit einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von mehr als 15 Jahren handelt, sind viele Geräte technisch überaltert und liegen im Vergleich mit den derzeit energieeffizientesten Geräten deutlich zurück. Der Stromverbrauch von Kühl- und Gefriergeräten ist in den letzten 30 Jahren kontinuierlich gesunken. Gegenüber der bis 2003 besten Energieeffizienzklasse A musste ein Kühl- und Gefriergerät gemäß der zum Zeitpunkt der Antragstellung

¹ Energieverbrauch privater Haushalte, Umweltbundesamt (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>, abgerufen am 21.05.2025)

gültigen (EU) Verordnung 1060/2010 höchste Energieeffizienzklasse A+++ eine Verbrauchseinsparung von 60 % aufweisen. Nach der aktuell gültigen (EU) Verordnung 2019/2016 aus dem Jahr 2021 muss die höchste Effizienzklasse A demgegenüber weitere 56 % einsparen.

Über 90 % des Energieverbrauchs von Kühl- und Gefriergeräten werden zur Aufrechterhaltung der Temperaturdifferenz zwischen Geräteinnenraum und Geräteumgebung aufgebracht, weshalb die weitere Verbesserung der thermischen Isolierung wesentlicher Ansatzpunkt zur Reduzierung des Energieverbrauchs von Kühl- und Gefriergeräten ist. Über die Fokussierung auf den Energieverbrauch der Geräte hinaus wird in der Entwicklung und Produktion über die gesamte Prozesskette hinweg nach ökologischen Aspekten gearbeitet. Bereits bei der Konzeption wird höchster Wert auf qualitativ hochwertige und damit langlebige Komponenten gelegt. Alle Kunststoffe eignen sich optimal zum Recycling. Auch die Fertigungsprozesse im Werk sind auf eine effiziente Nutzung von Ressourcen ausgerichtet.

2 Vorhabensumsetzung

2.1 Ziel des Vorhabens

Wie bereits in Kapitel 1.2.1 dargestellt, wird zur thermischen Isolation und Minimierung des temperaturdifferenzbedingten Wärmetransports zwischen Geräteinnenraum und Geräteumgebung seit den 1950er Jahren der Zwischenraum zwischen Außen- und Innengehäuse mit dem erdölbasierten Kunststoff Polyurethan (PU) ausgeschäumt. Neben seiner Dämmfunktion ist der PU-Schaum für die mechanische Stabilität der Gerätekonstruktion wichtig.

Bei besonders energieeffizienten und weniger preissensiblen Geräten entspricht es dem Stand der Technik zur Erhöhung der Dämmwirkung in begrenztem Umfang zusätzlich z. B. auf pyrogener Kieselsäure basierende Wärmedämmelemente (Vakuumisolationspaneele oder VIPs) in den Gehäuseaufbau einzubringen.

Verschiedene Isolationsvarianten



Abbildung 5: Thermische Isolierung von Kühl- und Gefriergeräten (rot umrandet: Innovation BluRoX)

Da die konventionell verwendeten Dämmstoffe und -methoden keine weiteren Verbrauchsreduzierungen ermöglichen, hat die Liebherr-Hausgeräte GmbH unter innovativer Anwendung des Prinzips der Vakuumwärmedämmung ein neues Konstruktions- und Fertigungsprinzip für thermisch hocheffizient isolierte Kühl- und Gefriergeräte entwickelt. Die Isolationswirkung eines Vakuums wird dabei genutzt, um den Wärmetransport ins Innere des Gefriergeräts zu minimieren. Die Vakuumisolierung entspricht dabei dem Aufbau und dem Funktionsprinzip von VIPs (siehe Kapitel 1.2.1), jedoch wird ein komplexer 3D-Gerätekörper nebst Gerätetür nach diesem Prinzip aufgebaut. Die Vakuumkörper für Gehäuse und Tür substituieren dabei das Volumen eines PU-Dämmkörpers, sodass zu 100 % auf den Einsatz von PU-Schaum als Dämmmaterial verzichtet werden kann. Als stützendes Kernmaterial dient der natürliche Rohstoff Perlit. Es handelt sich dabei um gemahlenes Vulkangestein. Perlit eignet sich besonders, da es eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist und eine hohe Energie- und Ressourceneffizienz ermöglicht. Die Außenhülle der Isolation besteht aus einer Hochbarrierefolie, die das Vakuum inklusive des Kernmaterials Perlit umschließt. Das innovative Konstruktions- und Fertigungsprinzip sollte im Rahmen des Vorhabens erstmals großtechnisch umgesetzt werden. In der nebenstehenden Abbildung 5 sind sowohl die in Kapitel 1.2.1 beschriebenen Isolationsmethoden dargestellt, die dem Stand der Technik entsprechen (oben: PU-Schaum, Mitte: PU-Schaum mit VIP) wie auch unten die Vakuumisolierung auf Basis von Perlit. Dieses neuartige Prinzip der Vakuumwärmedämmung für Kühl- und Gefriergeräte wurde von Liebherr unter dem Markennamen "BluRoX" in den Markt eingeführt.

2.1.1 Qualitative Zielsetzung für die Vakuum-Perlit-Technologie

Das Vorhaben zielte darauf, das oben beschriebene innovative, umweltschonende Konstruktions- und Fertigungsprinzip erstmalig großtechnisch umzusetzen, um damit umweltschonende Produkte herzustellen. Die Umweltschutzwirkung gegenüber dem Stand der Technik resultiert demzufolge sowohl aus dem Fertigungsprozess als auch aus der Gerätenutzung. Im Fertigungsprozess wird durch die vollständige Substitution von Polyurethan sowie der energetisch aufwendig hergestellten Vakuumisulationspaneele (VIPs) durch die innovative Anwendung der Vakuumdämmtechnik auf Basis des natürlichen Rohstoffs Perlit eine hohe Ressourcen- und Energieeffizienz möglich. Bei der Gerätenutzung wird aufgrund der signifikant verbesserten Wärmedämmung des Perlits eine signifikante Energieeinsparung erzielt.

Die innovative Anwendung der Vakuum-Perlit-Technologie (im Folgenden BluRoX-Technologie) mit dem mineralischen Kernmaterial Perlit macht die konventionelle Gerätestruktur mit Innen- und Außenbehälter und dem zur Dämmung und Stabilisierung mit PU-Schaum und zusätzliche Vakuumisulationspaneele hinfällig. Der Sandwichverbund aus Vakuumkörper, Innenbehälter und Außenhülle ermöglicht in Verbindung mit der gegenüber PU-Schaum vierfach höheren Materialsteifigkeit des Perlits die Realisierung eines neuartigen Konstruktionsprinzips, dass der Struktur des Gehäuses die erforderliche Steifigkeit verleiht.

In einem neuartigen, technisch komplizierten, hochautomatisierten Formgebungsprozess wird aus Perlit und Hochbarrierefolie ein geometrisch komplexer, eigenstabiler, thermisch hocheffizient isolierender einteiliger Gerätekörper (3D-Vakuumisulationskörper) hergestellt. Er dient der Aufnahme von Kühl- und Gefriergut und gibt dem Gerät die nötige mechanische Stabilität. Mit dem im Vorhaben umgesetzten Fertigungsprozess für Kühl- und Gefriergeräte mit der neuartigen BluRoX-Technologie und der damit einhergehenden Substitution von PU-Schaum und VIPs wird der von der LHG beschrittene Weg der nachhaltigen Entwicklung und Produktion für nachhaltige Produkte konsequent fortgesetzt.

2.1.2 Quantitative Zielsetzung für die BluRoX-Technologie

Das neuartige Verfahren zur umweltschonenden Herstellung verbrauchsminimierter Kühl- und Gefriergeräte entwickelt sowohl in der Herstellung als auch in der Gerätenutzung erhebliche Umweltentlastungseffekte. In einem umweltschonenden Produktionsverfahren werden umweltverträgliche Produkte hergestellt. Im Einzelnen durch

- Energieeinsparungen im Fertigungsprozess durch die Substitution des zur thermischen Isolierung von Kühl- und Gefriergeräten eingesetzten erdölbasierten Kunststoffes Polyurethan und der energetisch aufwendig hergestellten Vakuumisulationspaneele (VIP) durch eine innovative Anwendung der Vakuumdämmtechnik (BluRoX) mit dem natürlichen Rohstoff Perlit und
- Energieeinsparungen in der Nutzungsphase durch die signifikant verbesserte Wärmedämmung.

Die neuartige Technologie sollte über die typische Nutzungsdauer von 17 Jahren pro Gerät eine Energieeinsparung von 1,2 MWh (30 %) gegenüber einem vergleichbaren Referenzgerät ermöglichen. Die Energieeinsparung in der Herstellung sollte dabei durch den eingesparten kumulierten Energieaufwand (KEA) erreicht werden, der mit der Einsparung bzw. Substitution energieintensiver Materialien einher geht. In der Nutzungsphase wurde die Erreichung der Energieeffizienzklasse B mit einem Energieverbrauch von maximal 139 kWh pro Jahr (s. Delegierte Verordnung (EU) 2019/2016) angestrebt. Das Label A wurde zum Zeitpunkt der Antragstellung von keinem in Europa verfügbaren Kühl- und Gefriergerät erreicht.

Eine weitere wesentliche, jedoch noch nicht zu beziffernde, Umweltentlastungswirkung wurde durch die verbesserte Recyclingfähigkeit und Reparierbarkeit der BluRoX-Kühl- und -Gefriergeräte erwartet. Abfälle sollten nach Art und Menge abnehmen und Schadstoffemissionen in Luft und Boden sowie Beeinträchtigung des Bodens verringert werden.

Ziel war es, die BluRoX-Technologie bei zunehmender Marktdurchdringung auch auf andere Modelle und Produkte des Sortiments zu übertragen, um signifikante Stückzahlen zu erreichen. Dadurch sollten die minimierten Umweltaffekte schnell in die Breite getragen werden.

2.2 Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Vakuum ist definiert als Zustand eines Gases bei deutlich geringerem Druck als dem Atmosphärendruck bei Normalbedingungen (~1.000 mbar). Vakuumwärmeeisolation ist ein hocheffizientes System zur thermischen Isolation, bei dem der durch die Gasmoleküle der Luft bedingte Wärmetransport durch das Vakuum verhindert wird. Durch Absaugen (Evakuieren) von Gas wird der Gasdruck innerhalb des Vakuumkörpers reduziert, die Wärmeleitfähigkeit des Restgases verschlechtert und die thermische Isolationswirkung des Dämmkörpers verbessert.

Im Gegensatz zu rotationssymmetrischen Behältern (z. B. Thermoskanne), bei denen die zylindrische Hülle den Druckkräften des den evakuierten Körper umgebenden Luftdrucks standhält, müssen zu evakuierende Flachkörper (z. B. Vakuumisulationspaneele) eine Stützstruktur aufweisen, die dazu dient, den unter Normalbedingungen von außen auf die Vakuumisulationspaneele wirkenden atmosphärischen Belastungsdruck von rd. 1.000 mbar mit einer Gewichtslast von 10 t/m² auszugleichen. Die Stützwirkung entsteht durch das poröse Kernmaterial, das evakuiert und mit einer mehrschichtigen Hochbarrierefolie umschlossen wird. Die Folie dient dazu, im Hinblick auf eine qualitativ hochwertige und langfristige Isolationswirkung der Vakuumisulationspaneele einen Gaseintrag von außen möglichst gering und das Vakuum innerhalb der Wärmedämmplatte möglichst dauerhaft zu halten. Ebenso kommt der Porosität des Materials erhebliche Bedeutung zu, da von ihr die gasdruckabhängige Wärmeleitfähigkeit des Vakuums abhängt. Je feiner die Zwischenräume des Kernmaterials sind, desto geringer sind die Anforderungen an den Restgasdruck bzw. die Qualität des Vakuums.

Die Idee einer umfassenden Ausstattung von Kühl- und Gefriergeräten mit einer Vakuumisolation wird seit den 1940er Jahren verfolgt. Es liegen zahlreiche Patentanmeldungen und Patente vor, um mit steifen Materialien (Metallen oder Kunststoffen) eine vakuumdichte eigensteife Gerätehülle mit pyrogener Kieselsäure als Füllmaterial zu erzeugen. Diese Ansätze haben aufgrund der hohen Kosten und Risiken der Umsetzung und der damit einhergehenden erforderlichen Umstellung des gesamten Fertigungsprozesses nie den Weg in die Anwendung gefunden. Im Grundsatz hat die LHG diese seit den 1940er Jahren existierende Idee der Vakuumisolation aufgegriffen und sie dahingehend zu einer neuartigen Lösung entwickelt, dass in einem technischen komplexen Struktur- und Formgebungsprozess auf Basis des porösen Kernmaterials Perlit dreidimensionale, im Sandwichverbund mechanisch eigenstabile, hochisolierende Vakuum-Perlit-Körper geformt werden.

Zur Geräteherstellung ist die Anwendung des Formgebungsprozesses (Fertigung des Vakuumkörpers) zweifach erforderlich:

- Gerätekorpus: Formung eines geometrisch komplexen, hochisolierenden Vakuum-Perlit-Körpers als Gerätekorpus, der die Gerätestruktur bildet
- Gerätetür: Formung eines geometrisch einfachen, flächigen Vakuum-Perlit-Körpers (die Herstellung der Gerätetür ist nicht im geförderten Umfang des Vorhabens enthalten)

Gerätekorpus und Gerätetür werden auf unterschiedlichen Anlagen ausgeführt, folgen jedoch demselben Grundprinzip mit prinzipiell denselben Fertigungsschritten, die komplexitätsbedingt nur in der Reihenfolge abweichen:

- Formgebung des Vakuum-Perlit-Körpers für Gerätekorpus respektive Gerätetür
- Deckschichtanbringung
- Evakuierung

Im Einzelnen werden folgende Fertigungsschritte durchlaufen (siehe auch nachfolgende Abbildung 6)

Prozessschritt	Erläuterung
1. Hochbarrierefolie	Eine Folie, bestehend aus einer Siegelschicht aus Polyethylen und Barrierschichten, wird von der Rolle geführt und in den Bearbeitungsschritten 1–3 zu einem dreidimensionalen Folienbeutel geformt und thermisch verbunden. Dieser bleibt für die folgenden Prozessschritte zunächst einseitig offen.
2. Zuschnitt der Folie	
3. Fertigung Folienbeutel	
4. Anbringung Sorptionspumpe	Diese für die weiteren Schritte wichtige Produktkomponente wird in den Beutel eingebracht, mit der Folie verbunden und verbleibt im Gerät
5. Zuführung Innenbehälter	Der Folienbeutel wird auf dem separat gefertigten und dem Prozess beige-stellten Innenbehälter positioniert und thermisch mit ihm verbunden.
6. Übergabe Folienbeutel	
7. Befestigung an Innenbehälter	
8. Befüllung	Der Folienbeutel wird mit Perlit befüllt.
9. Kompaktieren	Der nach dem Befüllen thermisch verschlossene Folienbeutel wird verdichtet und die Form mit leichtem Unterdruck gefestigt.
10. Deckschichtanbringung	Die Außenbleche werden auf dem mit Perlit gefüllten Folienbeutel thermisch verbunden.
11. Evakuieren	Die Gehäuse werden für mehrere Stunden evakuiert. Dabei wird die Luft über die zuvor angebrachte Sorptionspumpe entzogen.
12. Endmontage	Der Korpus, die Tür und das Kältemodul werden zum Gerät montiert. Danach lagert und ruht das Gerät für mindestens 24 Stunden bis ein physikalischer Gleichgewichtszustand im Vakuum erreicht ist und wird anschließend mittels eigenentwickelter Wärmestromsensoren auf mögliche Leckagen überprüft.

Tabelle 1: Wesentliche Prozessschritte des innovativen Fertigungsprozesses

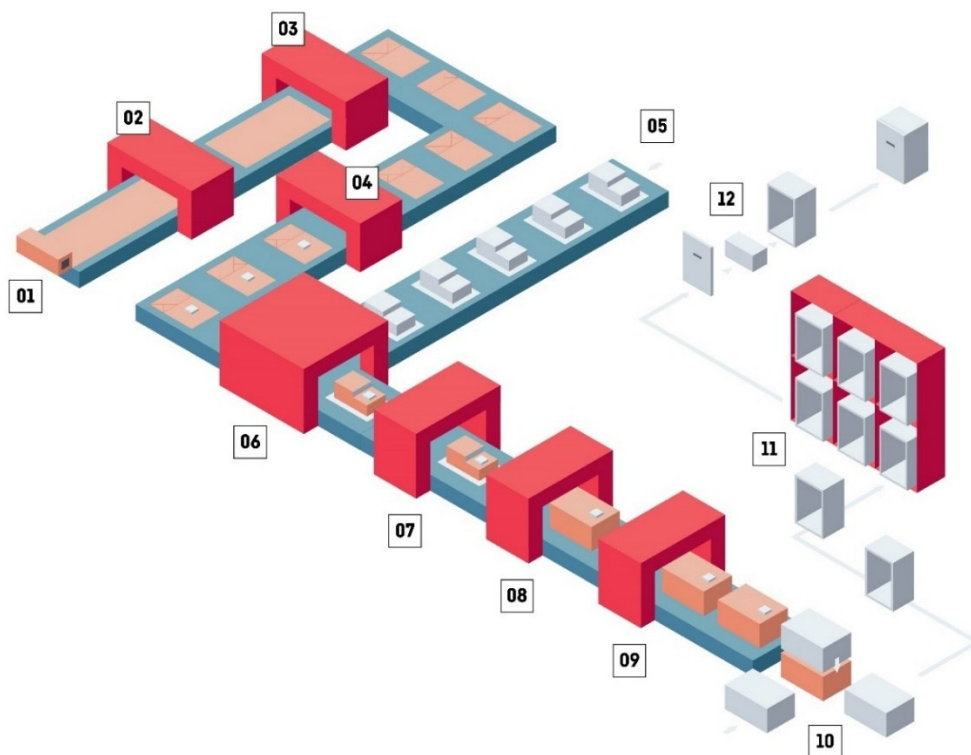


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses (eigene Darstellung LHG)

Wesentliche Herausforderung im Formgebungsprozess ist die hochgenaue, automatisierte Handhabung der beschädigungsempfindlichen Folie in den einzelnen Fertigungsschritten vom Zuschneiden über die Herstellung eines Folienbeutels und Formgebung (Endkontur) bis zur Aufbringung der Deckschichten, da selbst Mikroschädigungen der Folie die Isolationswirkung nachhaltig beeinträchtigen. Vor diesem Hintergrund weisen die einzelnen Anlagenteile einen hohen Automatisierungsgrad auf. Darüber hinaus erfolgt eine permanente, sensorbasierte Produktionssteuerung und -überwachung des hochautomatisierten Fertigungsprozesses, die die Aufzeichnung und Rückverfolgbarkeit wesentlicher Produktionsparameter ermöglichen (Track & Trace).

Die Gesamtanlage ist auf die Fertigung von 50.000 Geräten pro Jahr ausgelegt.

2.3 Umsetzung des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in fünf Teilvorhaben durchgeführt, die einzelnen Anlagenteilen entsprechen. Diese Teilvorhaben wurden weitestgehend parallel umgesetzt und projektbegleitend zur Gesamtanlage integriert:

- T1 Fertigungsanlage 3D-Vakuumkörper Gerätegehäuse
- T2 Automatische Evakuierstation 3D-Vakuumkörper
- T3 Automatische Deckschichtanbringung Gerätetür
- T4 Automatische Druckausgleichsanlage inkl. Werkstückträger
- T5 Messanlagen mit Wärmestromsensoren

2.3.1 Umsetzung des Vorhabens im Überblick

Im Folgenden wird der zeitliche Ablauf der Umsetzung des Vorhabens im Überblick dargestellt.

Umsetzungsschritt	Zeitraum	Erläuterung
Vorhabenbeginn	14.04.2021	Genehmigung des förderunschädlichen vorzeitigen Vorhabenbeginns
Detaillierte Vorhabenplanung	Q2-Q3/2021	Beauftragung der Teilvorhaben und detaillierte Anlagen- und Zeitplanung der Tätigkeiten der Lieferunternehmen
Anlagenkonstruktion und -montage durch Lieferunternehmen	Q2/2022	Anlieferung und Aufbau T3
	Q4/2022	Aufbau erstes Prüffeld T5 für die Türenprüfung (FNb 165) bei LHG
	Q1-Q3/2023	Aufbau T2 bei LHG
	Q2-Q3/2023	Inbetriebnahme und Vorabnahme T1 beim Lieferunternehmen
	Q3/2023	Abbau T1 beim Lieferunternehmen, Transport und Aufbau bei LHG
	Q3-Q4/2023	Aufbau T4 bei LHG
	Q3-Q4/2023	Aufbau der finalen Messanlage T5 bei LHG und Integration in T4
Inbetriebnahmephase (Ochsenhausen)	Q2/2022-Q3/2023	Inbetriebnahme T3
	Q4/2023	Inbetriebnahme T1
	Q4/2023	Inbetriebnahme T2
	Q1/2024	Inbetriebnahme T5
	Q2/2024	Inbetriebnahme T4
Musterproduktion und Abnahme	Q3/2024	Musterproduktion und Abnahme T2
	Q3/2024	Musterproduktion und Abnahme T3
	Q3/2024	Musterproduktion und Abnahme T5
	Q3/2024	Musterproduktion und Abnahme T1
	Q4/2024	Musterproduktion und Abnahme T4
Vorhabenende	31.12.2024	Vorhabenende

Tabelle 2: Zeitlicher Ablauf des Vorhabens von der Planungsphase bis zur Anlagenabnahme (Überblick)

2.3.2 Umsetzung des Vorhabens im Detail nach Teilvorhaben

T1 Fertigungsanlage 3D-Vakuumpörper Gerätegehäuse

Die Fertigungsanlage zur Herstellung des 3D-Vakuumpkörpers für das Gerätegehäuse stellt das zentrale Element des Fertigungsprozesses der innovativen, umweltschonenden BluRoX-Technologie dar. Erst durch sie lässt sich das neuartige Konstruktionsprinzip des Gerätekorpus in einem neuartigen, automatisierten Fertigungsprozess umsetzen. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, handelt es sich dabei um einen technisch komplizierten Struktur- und Formgebungsprozess, in dessen Verlauf aus dem porösen Kernmaterial Perlit ein hochisolierender 3D-Vakuumpkörper geformt wird. Der Fertigungsprozess ist technisch, hinsichtlich der eingesetzten Materialien und Fertigungstechnik nicht mit dem bisherigen Stand der Technik vergleichbar und überschreitet diesen.

Das Teilvorhaben, mit einer Dimension von ca. 50 x 11 Metern, umfasst folgende Anlagenteile, die im Rahmen des Vorhabens umgesetzt wurden:

- Wirbelschichtanlage: Beinhaltet die Perlitkonditionierung (Temperatur und Feuchtigkeit)
- Folienlogistik: Beinhaltet alle Schritte zur Fertigung der dreidimensionalen Folienbeutel vom Abrollen der Folie bis zur Anbringung der Sorptionspumpe
- Vakuumpkörperlogistik: Beinhaltet alle Schritte zur Fertigung des Vakuum-Perlit-Körpers bis zur Kompaktierung
- Transportlogistik: Beinhaltet die Befestigung des Innenbehälters, die Anbringung der Deckschicht und die Übergabe zur Evakuierung

Die folgenden Abbildungen zeigen die Fertigungsanlage Gerätegehäuse (Abbildung 7), die Wirbelschichtanlage zur Perlitkonditionierung (Abbildung 8), den Zuschnitt der Hochbarrierefolie (Abbildung 9), ein BluRoX-Gehäuse in der Gehäuseanlage vor der Deckschichtanbringung (Abbildung 10) und schließlich ein BluRoX-Gehäuse nach der Deckschichtanbringung (Abbildung 11), bevor das Gehäuse evakuiert wird.

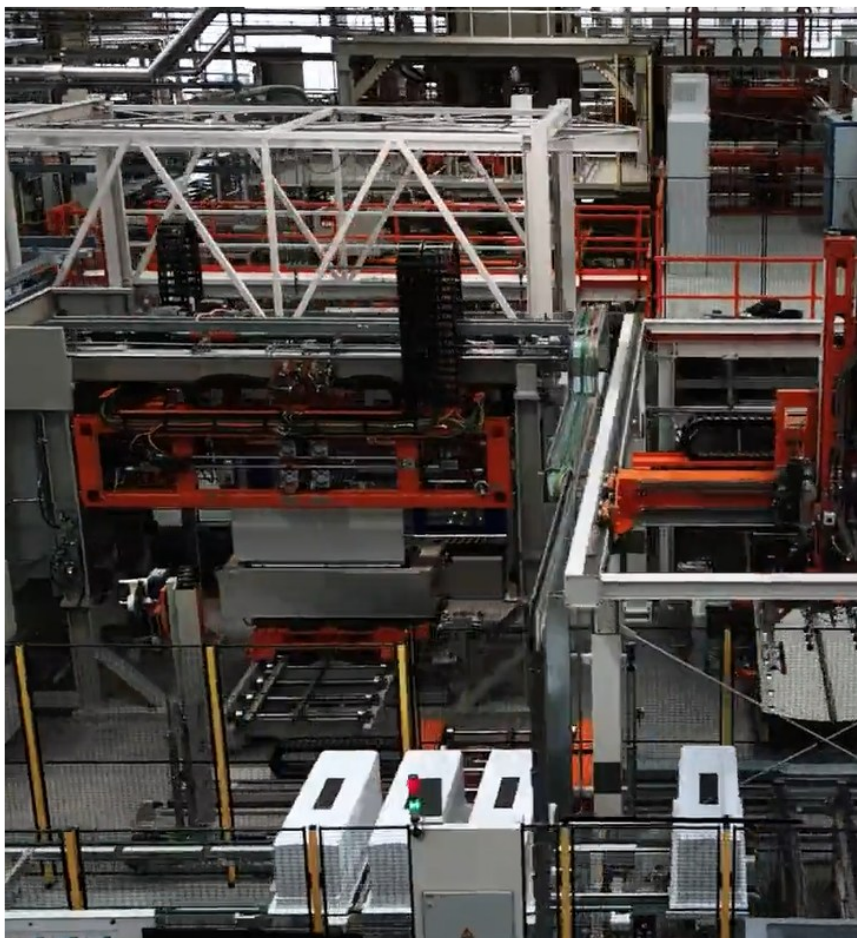


Abbildung 7: Fertigungsanlage 3D-Vakuumpkörper Gerätegehäuse Teilvorhaben T1



Abbildung 8: Wirbelschichtanlage zur Perlitkonditionierung



Abbildung 9: Zuschnitt Hochbarrierefolie



Abbildung 10: BluRoX-Gehäuse in der Gehäuseanlage (ohne Deckschicht)

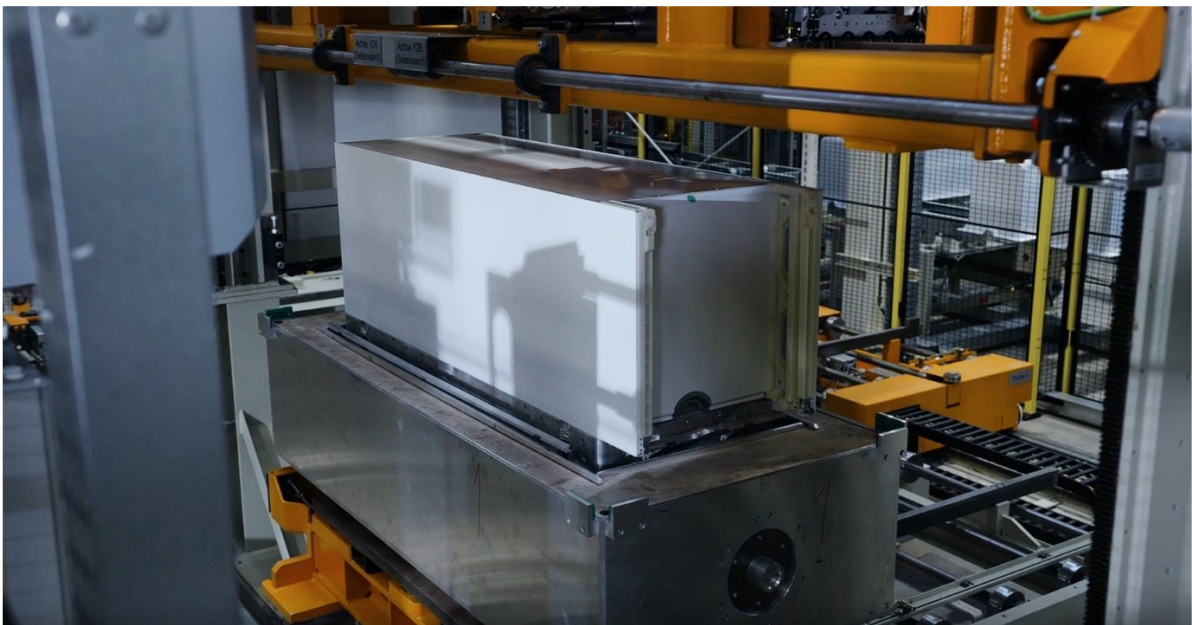


Abbildung 11: BluRoX-Gehäuse mit Deckschicht

T2 Automatische Evakuierstation 3D-Vakuumkörper

Durch das Evakuieren wird das Zieldruckniveau für Stickstoff und Sauerstoff unter Aktivierung der Sorptionspumpe erreicht. Die Endevakuierung der gefertigten Vakuumkörper erfolgt über mehrere Stunden für mehrere Vakuumkörper parallel und ist vom Formgebungsprozess abgekoppelt. Im Rahmen dieses Prozessschrittes wird das Material in der Sorptionspumpe aktiviert.

Die folgende Abbildung zeigt eine Draufsicht auf die automatische Evakuierstation mit ihren Evakuierplätzen (Abbildung 12).



Abbildung 12: Draufsicht Evakuierstation mit Evakuierplätzen

T3 Automatische Deckschichtanbringung Gerätetür

Die Fertigungsanlage für den Vakuumkörper der Gerätetür war nicht Teil des Vorhabens, da sie zum Zeitpunkt der Antragstellung als modellhafte erste Anwendung der Vakuum-Perlit-Technologie bei einer einfacheren Geometrie bereits existierte. Lediglich die automatisierte Deckschichtanbringung war Vorhabensbestandteil, da diese in der bestehenden Anlage noch manuell erfolgte. Kern der realisierten Anlage im Teilvorhaben T3 waren Siegelstationen für die Anbringung der Deckschicht, die notwendigen Handlingtools für den Transport zwischen den Stationen sowie Steuerungs- und Sicherheitstechnik.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Deckschichtsiegelung einer Gerätetür (Abbildung 13) und Gerätetüren nach der Deckschichtanbringung auf den Evakuierplätzen (Abbildung 14).



Abbildung 13: Deckschichtsiegelung Gerätetür



Abbildung 14: Türen nach der Deckschichtanbringung auf den Evakuierplätzen

T4 Automatische Druckausgleichsanlage inkl. Werkstückträger

Vakuumpkörper müssen 48 Stunden ruhen, bis die Diffusionsvorgänge im Perlit abgeschlossen sind und ein physikalischer Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die gefertigten Vakuumpkörper werden für diesen Zeitraum in einer automatischen Druckausgleichsanlage zwischengelagert. Die Ein- und Auslagerung erfolgt automatisiert.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen das Anlagenlayout der automatischen Druckausgleichsanlage (Abbildung 15) und einzelne BluRoX-Geräte in der automatischen Druckausgleichsanlage (Abbildung 16).

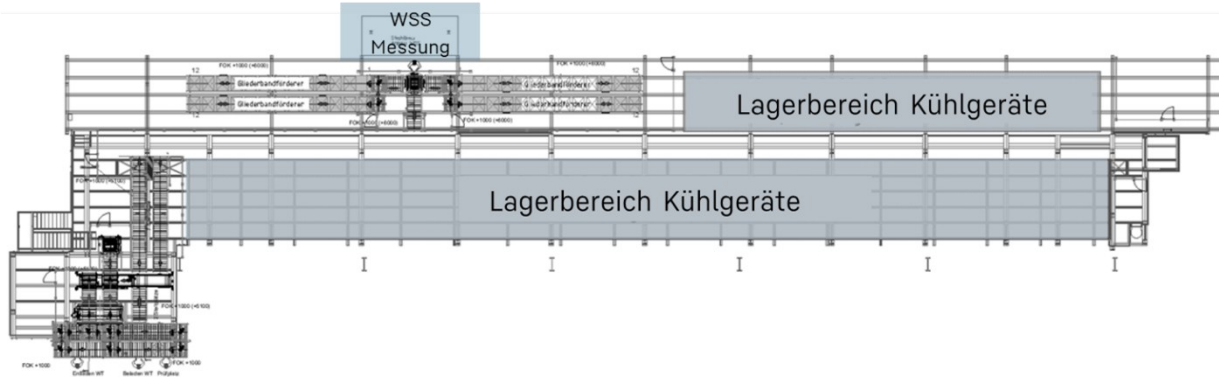


Abbildung 15: Anlagenlayout automatische Druckausgleichsanlage



Abbildung 16: BluRoX-Geräte in der automatischen Druckausgleichsanlage

T5 Messanlagen mit Wärmestromsensoren

Während des Fertigungsprozesses sind Folienmaterial und Vakuum-Perlit-Körper hohen Belastungen durch Dehnen, Knicken und Scheren ausgesetzt, die potenziell zu Mikroschädigungen führen. Um die maximal zulässige Verschlechterung der Isolierfähigkeit über die Lebensdauer eines Geräts zu gewährleisten, darf die Summe aller Undichtigkeiten nicht ein Maß überschreiten, das über die Lebensdauer des Geräts zu einer signifikanten Verschlechterung des Dämmvermögens führt. Zur Messung der Mikroschädigung nach der Fertigung dient eine eigenentwickelte hochgenaue Messtechnik, welche unter Nutzung relevanter Prozessgrößen die Wärmeleitfähigkeit misst und (über den bekannten Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Gasdruck) mittels eines Grenzwertes zu große Leckagen erkennt.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Anbringung eines Wärmestromsensors an der Gerätetür mithilfe eines Handlinggeräts (Abbildung 17) und montierte Wärmestromsensoren an Gerätetür (vorn) und am Gehäuse (hinten) (Abbildung 18).



Abbildung 17: Anbringung eines Wärmestromsensors an der Gerätetür mithilfe des Handlinggeräts



Abbildung 18: Wärmestromsensoren an der Tür und am Gehäuse

2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Es mussten keine Genehmigungen für das Vorhaben eingeholt werden.

2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Der wesentliche Umwelteffekt in der Fertigung besteht in der Einsparung des kumulierten Energiebedarfs (KEA) durch die Materialsubstitution von PU-Schaum und VIP-Dämmung durch die BluRoX-Technologie. Hinzu kommt der Energiebedarf für den Fertigungsprozess. Dieser wird seit 2018 weitestgehend CO₂-neutral mit aus Wasserkraft erzeugtem Ökostrom gedeckt, in einzelnen Prozessschritten kommt Erdgas zum Einsatz. Insgesamt ist der Energiebedarf der gesamten Anlage direkt messbar und fließt in das Energie- und Umweltmanagementsystem ein.

Quantifiziert werden folgende Daten:

Betriebsdaten	Erläuterung
Energieverbrauch	<ul style="list-style-type: none">– Die Messung des elektrischen Energieverbrauchs erfolgt mittels Janitza-Stromwandlern an verschiedenen Messstationen. Je Messstation (s. u.) werden kontinuierlich Datensätze generiert. So wird der Energieverbrauch durchgehend gemessen.– Für die Gas- und Druckluftverbräuche werden Durchflussmesser verwendet, welche ebenfalls mit den Janitza-Stromwandlern vernetzt sind. Aus den Volumenströmen und konstanten Umrechnungskoeffizienten leiten sich die Energieverbräuche ab.– Einminütige Aufzeichnungsintervalle werden in 15-minütigen Mittelwerten zusammengefasst und dienen als Datenbasis für die Messung des Energieverbrauchs.

Materialverbrauch Hochbarrierefolie	<ul style="list-style-type: none"> – Der Materialbedarf an Hochbarrierefolie wird der Stückliste entnommen. – Die Quantifizierung des Bedarfs erfolgte initial mittels Versuchen und wurde anhand der realen Produktionsbedarfe verifiziert. Bei Bedarf finden anhand eines Trackings der Bestände Anpassungen der Stückliste statt.
Materialverbrauch Perlit	<ul style="list-style-type: none"> – Das Perlitvolumen ist ein fixer, produktspezifischer Parameter. Er ergibt sich aus der geometrischen Festlegung des Vakuumkörpers seitens Produktentwicklung. – In der Produktion findet eine Umrechnung zur Perlitmenge in kg statt. Hauptumrechnungsfaktor ist die Dichte der jeweiligen Perlitcharge. Sie wird in einer automatisierten Messvorrichtung inline ermittelt. – Die Perlitmenge pro Vakuumkörper (= Batch) wird gewogen und anschließend in einen Vakuumkörper verfüllt. Dabei wird die Perlitmenge zusammen mit der ID des Vakuumkörpers in einer Datenbank abgelegt (Trace-Datenbank).
Materialverbrauch Kunststoff	<ul style="list-style-type: none"> – Der Kunststoffbedarf für den Innenbehälter wird der Stückliste entnommen. – Der Innenbehälter wird tiefgezogen, das Werkzeug bildet die Geometrie ab. Es wird ein Kunststoffzuschnitt (Platine) mit einer Materialstärke von 4,5 mm benötigt, um die geeignete Materialverteilung an Rippenstruktur und Randbereichen zu erreichen. – Die Festlegung des Materialbedarfs in der Stückliste erfolgte auf Basis dessen, dass die erforderlichen mechanischen Eigenschaften in Versuchen erreicht wurden. – Überschüssiges Material wird aufbereitet und dem Prozess erneut zugeführt.
Materialverbrauch Stahlblech	<ul style="list-style-type: none"> – Der Materialbedarf an Stahlblech für Seiten- und Rückwand, Boden, Decke und Tür wird der Stückliste entnommen. – Die Berechnung der erforderlichen Menge erfolgte in der Konstruktion (CAD-Zeichnung) anhand der Produktmaße unter Berücksichtigung der vorliegenden Biegungen. – Das benötigte Blech wird vom Coil in der benötigten Länge heruntergeschnitten.
Ausschussrate/ Produktionsfehler	<ul style="list-style-type: none"> – Teilweise automatisierter Prozess (teilweise manuell, z. B. Vakuumkörper), bei dem an den relevanten Messstationen ein Barcode gescannt wird, der sich an jedem Bauteil befindet. Anschließend wird ein Ausschusscode vergeben, in dem Informationen zur Ursache des Ausschusses dokumentiert werden. Die Buchungssoftware, H-Pro, entspricht dem Fabrikstandard und wird auch für die Buchung von Ausschuss bei der Produktion herkömmlicher Geräte eingesetzt.

Tabelle 3: Messdaten zur Vorhabensbewertung

Die erforderlichen Messungen werden an folgenden Messstationen vorgenommen:

- MS1 Fertigungsanlage Gehäuse inkl. Perlitkonditionierung
- MS2 Automatische Evakuierstation 3D-Vakuumkörper Gerätegehäuse
- MS3 Fertigungsanlage Tür inkl. Perlitkonditionierung
- MS4 Automatische Evakuierstation Gerätetür
- MS5 Automatische Deckschichtanbringung Gerätetür
- MS6 Messanlage mit Wärmestromsensoren

Wesentliche Leistungsparameter zur Bewertung des Vorhabenserfolgs sind:

Leistungsparameter	Erläuterung
Energiebedarf (kWh) pro Gerät (Nutzung)	– Jährlicher Energieverbrauch für die Energieeffizienzklasse Europa (Energie-label), Messung nach Methode EU 2019/2016
Materialverbrauch pro Gerät	– Perlit, Hochbarrierefolie, Stahlblech, Kunststoff gemäß Stückliste
KEA (kWh) pro Gerät (in der Herstellung)	Berechnung anhand <ul style="list-style-type: none"> – eingesetzter Materialmengen pro Gerät und öffentlich verfügbarer KEA-Daten pro Einheit Material, v. a. PROBAS-Datenbank des Umweltbundesamtes und – Energieverbrauch im Herstellprozess

THG-Ausstoß (kg) pro Gerät	Berechnung anhand des THG-Faktors (Treibhausgas-Emissionsfaktor) des Umweltbundesamtes
Ausschussrate Barrierefolie	anhand Dokumentation
Ausschussrate Perlit	anhand Dokumentation
Ausschussrate Geräte	anhand Dokumentation

Tabelle 4: Leistungsparameter zur Bewertung des Vorhabenserfolgs

2.6 Konzeption und Durchführung des Messprogramms im Herstellprozess

Auf Basis der erfassten und aufbereiteten Betriebsdaten (s. Kapitel 2.5) war die Durchführung eines Messprogramms ursprünglich zu folgenden Messzeitpunkten vorgesehen, zum Zeitpunkt des Abschlussberichts sollten alle Messzeitpunkte erreicht sein:

Messzeitpunkt 1: Inbetriebnahme der Anlagenteile bei den jeweiligen Lieferunternehmen

Messzeitpunkt 2: Testproduktion I, dies entspricht der Nullserienproduktion bei LHG in Ochsenhausen

Messzeitpunkt 3: Serienbestätigung, nach der Produktion von 1.000 Stück als Grundlage der finalen Bewertung für den Abschlussbericht

Da die Messzeitpunkte 2 und 3 zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichts aufgrund noch nicht abgeschlossener Prozessoptimierungen noch nicht erreicht wurden, wird ein zusätzlicher Messzeitpunkt 1.1: Vorserienproduktion eingeführt, der mit dem Abschlussbericht erläutert wird.

Messstationen und Messungen	Messzeitpunkt 1	Messzeitpunkt 1.1	Messzeitpunkt 2	Messzeitpunkt 3
	Inbetriebnahme der Anlagenteile bei Liebherr	Vorserienproduktion (Status Abschlussbericht)	Testproduktion I (Nullserienproduktion)	Serienbestätigung nach 1.000 Stück
MS 1 Fertigungsanlage Gehäuse inkl. Perlitkonditionierung				
Energieverbrauch	X	X	X	X
Materialverbrauch Barrierefolie*	X	X	X	X
Materialverbrauch Perlit	X	X	X	X
Materialverbrauch Kunststoff Innenbehälter*	X	X	X	X
Materialverbrauch Stahlblech*	X	X	X	X
Ausschussrate/Produktionsfehler			X	X
MS 2 Automatische Evakuierstation Gerätegehäuse				
Energieverbrauch	X	X	X	X
MS 3 Fertigungsanlage Tür inkl. Perlitkonditionierung				
Energieverbrauch	X	X	X	X
Materialverbrauch Barrierefolie	X	X	X	X
Materialverbrauch Perlit	X	X	X	X
Ausschussrate/Produktionsfehler	X	X	X	X
MS 4 Automatische Evakuierstation Gerätetür				
Energieverbrauch	X	X	X	X

MS 5 Automatische Deckschicht-anbringung Gerätetür				
Energieverbrauch	X	X	X	X
Materialverbrauch Kunststoff innen	X	X	X	X
Materialverbrauch Stahlblech außen	X	X	X	X
Ausschussrate/Produktionsfehler	X	X	X	X
MS 6 Messanlage mit Wärmestromsensoren				
Ausschussrate Geräte			X	X
Gesamtbewertung				
Wesentliche Leistungsparameter				
Energiebedarf (kWh) pro Gerät		X		
KEA pro Gerät		X		
CO ₂ -Ausstoß pro Gerät		X		
Qualitätsrelevante Parameter				
Ausschussrate Barrierefolie				X
Ausschussrate Perlit				X
Ausschussrate Geräte				X

* gemäß Stückliste

Tabelle 5: Konzeption Messprogramm

3 Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

3.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung

Zum Zeitpunkt der Erstellung des Abschlussberichts befand sich die Anlage in der Vorserienphase, die Anlagenoptimierungen in Vorbereitung auf den Produktionsstart (SOP) waren noch nicht abgeschlossen. Das Vorhaben wurde technisch erfolgreich umgesetzt. Anfang 2026 werden die ersten BluRoX-Geräte am Markt verfügbar sein, der Produktionsstart ist im Herbst 2025 geplant. Die im Rahmen der Antragstellung erwarteten Einspareffekte im Herstellprozess wie auch in der Nutzungsphase der Geräte konnten mit 1,6 MWh pro Gerät erreicht bzw. sogar übertroffen werden. Erwartet wurde eine Einsparung von 1,2 MWh. Dieses Ergebnis lässt sich bereits auf Basis der ersten Messergebnisse aus der Vorserienphase bestätigen. Über Stückzahleneffekte werden sich bei steigenden Produktionsvolumen noch bessere Ergebnisse erzielen lassen. Die im Förderantrag angestrebte Energieeffizienzklasse B der Geräte wird ebenfalls übertroffen, mit 114 kWh Energieverbrauch pro Jahr wird die Energieeffizienzklasse A erreicht.

Technische und umweltrelevante Ziele	Zielerreichung
Erfolgreiche erstmalige großtechnische Umsetzung des neuartigen Herstellprozesses	✓
Erfolgreiche Umsetzung der Vakuum-Perlit-Isolierung bei komplexen Geometrien	✓
Reduzierung des Energieverbrauchs im Herstellprozess	✓
Reduzierung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase	✓
Verzicht auf erdölbasiertes Polyurethan als Isolationsmaterial	✓
Reparierbarkeit hinsichtlich Kältetechnik	✓
Verbesserte, umweltschonendere Aufarbeitbarkeit der Geräte (Recycling)	✓
Rückführbarkeit des Perlits in den Produktionsprozess	✓

Tabelle 6: Ziele und Bewertung der Zielerreichung

Im Rahmen der Vorhabensdurchführung traten eine Vielzahl unerwarteter Schwierigkeiten auf, denen die LHG Rechnung tragen musste. Diese Schwierigkeiten waren insbesondere der Coronapandemie und dem Krieg Russlands gegen die Ukraine geschuldet und führten zu signifikanten Lieferengpässen, Lieferverzögerungen und um ein Vielfaches höheren Kosten als noch in der Antragstellung geplant. Hinzu kam eine hohe Anlagenkomplexität, die der Tatsache geschuldet war, dass das Vorhaben einen sehr hohen Innovationsgrad hinsichtlich verschiedener Faktoren aufweist, die gesamthaft gleichzeitig beherrscht werden mussten:

- neuartiger Herstellprozess;
- neuartige Materialien;
- neuartige Anlagentechnik (Sondermaschinenbau);
- neuartiges Produkt.

Die Umsetzung des Vorhabens unter den gegebenen gesamtwirtschaftlichen Umständen war insgesamt herausfordernd, die aufgetretenen Schwierigkeiten konnten jedoch behoben werden, nicht jedoch ohne das Vorhaben gegenüber der ursprünglichen Laufzeit verlängern zu müssen. Es wurde am 31.12.2024 mit Inbetriebnahme und Anlagenabnahme abgeschlossen.

3.2 Stoff- und Energiebilanz

In der nachfolgenden Stoff- und Energiebilanz wird ein Gerät der BluRoX-Technologie mit einem dem Stand der Technik entsprechenden konventionellen Gerät, bei dem Polyurethanschaum in Kombination mit einem Vakuumsolationspaneel (in der Gerätetür) als Isolationstechnologie zum Einsatz kommt, verglichen. Dieses Referenzgerät wies zum Zeitpunkt der Antragstellung die höchste Energieeffizienzklasse (A+++) auf. Bezogen auf das Gerätenutzvolumen (gemäß ab 03/2021 gültiger EU-Kennzeichnungsverordnung) ist das BluRoX-Gerät 9,8 Liter kleiner als das Referenzgerät. Dieser geringfügige Volumenunterschied wird in der Berechnung der Stoff- und Energiebilanz durch einen Faktor berücksichtigt und somit aus den Einspareffekten herausgerechnet, um eine direkte Vergleichbarkeit herzustellen.


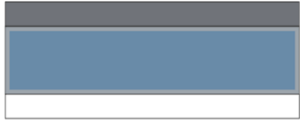
	Referenzgerät	BluRoX-Gerät
Geräteart	Gefriergerät (Standgerät)	Gefriergerät (Standgerät)
Gerätenutzvolumen (normiert EU)	369,5 Liter	359,7 Liter
Gerätemaße (H/B/T)	195/70/75 cm	185/60/67 cm
Isolationstechnologie und eingesetzte Materialien	Polyurethanschaum mit einem eingebrachten VIP in der Gerätetür	Vakuum-Perlit-Technologie (BluRoX-Technologie)
	<p>Außenhülle (Blech)</p> <p>PU-Schaum</p> <p>Vakuum-Isolations-Paneel (VIP)</p> <p>Innenverkleidung (Kunststoff)</p> 	<p>Außenhülle (Blech)</p> <p>Hochbarrierefolie</p> <p>Evakuierter Perlit</p> <p>Innenverkleidung (Kunststoff)</p> 

Tabelle 7: Wichtige Eckdaten Referenzgerät und BluRoX-Gerät

Bei der Darstellung des Energieverbrauchs und der Einsparung eines Geräts wird zwischen Herstellprozess und der Nutzungsphase unterschieden. Unter Berücksichtigung von Herstellprozess und einer typischen Nutzungsphase von 17 Jahre können pro BluRoX-Gerät über seine Lebensdauer mindestens 1,6 MWh Energie gegenüber dem Referenzgerät eingespart werden. Damit wird auf Basis der für den Abschlussbericht durchgeführten Messungen von rd. 200 Geräten die erwartete Energieeinsparung von 1,2 MWh um mehr als 30 Prozent übertroffen werden.

Energieeinsparung je Gerät über die Lebensdauer von 17 Jahren	Zielsetzung (lt. Antragstellung)	Zielerreichung (Abschlussbericht)
Energieeinsparung Herstellprozess (KEA-Materialeinsatz und direkter Energieeinsatz)	528 kWh	496 kWh
Energieeinsparung Nutzungsphase	680 kWh	1.105 kWh
Energieeinsparung gesamt	1.208 kWh	1.601 kWh

Tabelle 8: Zielerreichung Energieeinsparung

Das erste BluRoX-Gerät wird 2026 in den Markt eingeführt, vor diesem Hintergrund sind konkrete Marktprognosen aktuell schwer zu treffen, insbesondere da gesamtwirtschaftlich positive Impulse bislang ausbleiben und von Seite der Verbraucher und Verbraucherinnen nach wie vor ein zurückhaltendes Investitionsverhalten und eine hohe Kostensensitivität festzustellen sind.

Vor diesem Hintergrund, aber auch unter Berücksichtigung der zunehmenden Umweltsensibilität der Verbraucher:innen und der bei Markterfolg geplanten Übertragung der Technologie auf weitere Geräte, soll anhand von drei Szenarien aufgezeigt werden, welche Effekte sich in der Zukunft bei steigenden jährlichen Stückzahlen erreichen lassen.

Szenario 1: Markthochlaufphase (Produktion von 6.500 Geräten pro Jahr)

Szenario 2: Durchwachsene Baukonjunktur und Investitionsbereitschaft der Kunden
(Produktion von 25.000 Geräten pro Jahr)

Szenario 3: Verbesserte Konjunktur, Technologieakzeptanz, hohe Investitionsbereitschaft
(Produktion von 50.000 Geräten)

In der folgenden Abbildung ist abzulesen, wie sich die Energieeinsparung über die Lebensdauer eines Geräts gegenüber dem Referenzgerät bei steigenden Stückzahlen entsprechend den oben beschriebenen Szenarien entwickelt. Der jeweils untere Teil des Balkens (blau) stellt dabei die Energieeinsparung in der Nutzung über einen Nutzungszeitraum von 17 Jahren dar. Der obere Teil (gelb) repräsentiert die Energieeinsparung im Herstellprozess. Wie man erkennen kann, erwartet LHG, dass die Einsparung über Stückzahleneffekte nochmals um rd. 53 kWh steigen wird. Zurückzuführen ist diese Steigerung auf eine Reduzierung des Energieverbrauchs pro Gerät im Herstellprozess. Im folgenden Kapitel wird darauf detaillierter eingegangen.

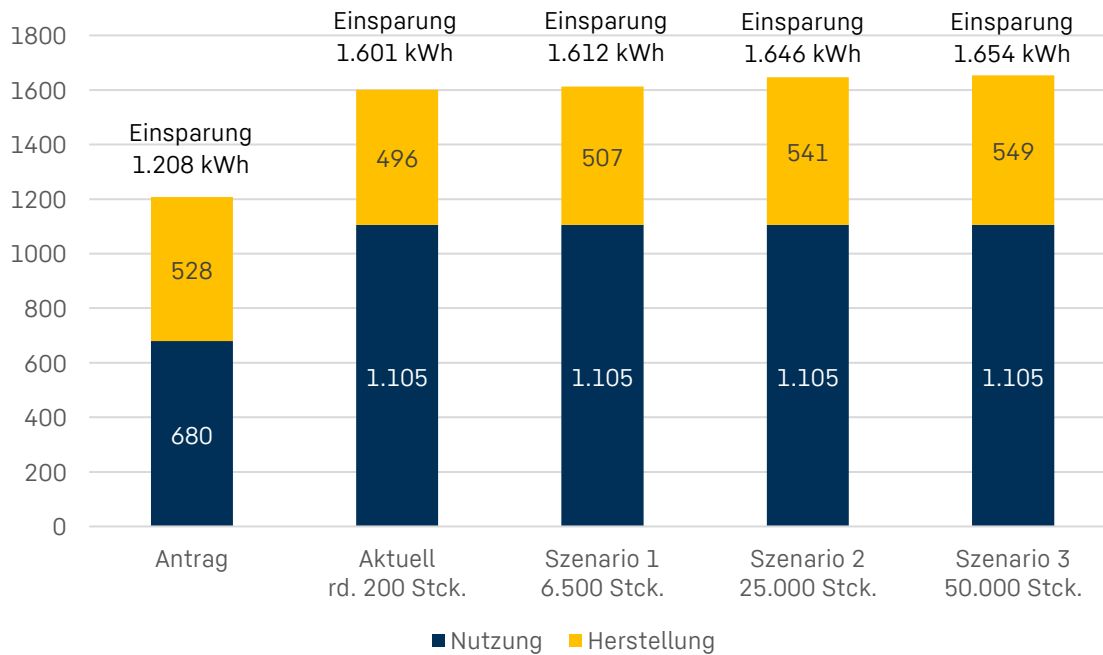


Abbildung 19: Steigerung der Energieeinsparung gegenüber dem Referenzgerät über die Lebensdauer durch Stückzahleneffekte in kWh

Die berechneten Einsparpotenziale betrachten den Austausch von Geräten mit vergleichbaren Werten zum Referenzgerät. Erfolgt ein Austausch weniger energieeffizienter Geräte einer vergleichbaren Größenklasse, ist die Einsparung selbstverständlich höher.

3.2.1 Einsparungen im Herstellprozess

Auf Basis der vorliegenden Messdaten zum Zeitpunkt des Abschlussberichts werden mit dem BluRoX-Gerät gegenüber dem Referenzgerät im Herstellprozess rd. 494 kWh (38 %) pro Gerät eingespart. Diese Energieeinsparung geht auf den kumulierten Energieaufwand (KEA) im Zusammenhang mit dem Materialeinsatz zurück. Der wesentliche Unterschied – der sich auch sehr deutlich in der erreichten Energieeinsparung niederschlägt – besteht in der Isolationstechnologie. Statt PU-Schaum und VIPs kommt, wie bereits ausführlich dargestellt, im BluRoX-Gerät eine innovative Vakuum-Perlit-Isolierung zum Einsatz. In beiden Geräten wird in der Außenhülle Stahl und zur Innenverkleidung Kunststoff eingesetzt. Der nachfolgenden Tabelle ist der Materialeinsatz der verglichenen Geräte gegenübergestellt.

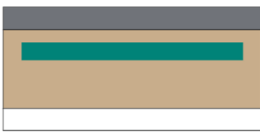
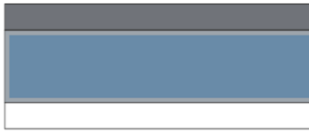
Geräte	Referenzgerät	BluRoX-Gerät
Isolations-technologie	Polyurethanschaum mit einem eingebrachten Vakuumisulationspaneel in der Gerätetür	Vakuum-Perlit-Technologie (BluRoX-Technologie)
Aufbau	<p>Außenhülle (Blech)</p> <p>PU-Schaum</p> <p>Vakuum-Isolations-Paneel (VIP)</p> <p>Innenverkleidung (Kunststoff)</p> 	<p>Außenhülle (Blech)</p> <p>Hochbarrierefolie</p> <p>Evakuierter Perlit</p> <p>Innenverkleidung (Kunststoff)</p> 
Materialeinsatz		
Außenhülle	~ 18 kg Stahlblech	~ 23 kg Stahlblech
Isolierung	~ 14 kg PU-Schaum ~ 4 kg VIP	~ 68 kg expandierter Perlit ~ 13 m² Hochbarrierefolie
Innenverkleidung	~ 13 kg Kunststoff	~ 9 kg Kunststoff

Tabelle 9: Technologievergleich Isolierung und Materialeinsatz

In der nachfolgenden Abbildung wird der kumulierte Energieaufwand (KEA) für die eingesetzten Materialien pro Gerät verglichen und durch den direkten Energiebedarf im Herstellprozess ergänzt. Wie in Kapitel 2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten erläutert, wurden zur Ermittlung Daten aus öffentlich verfügbaren Quellen herangezogen, insbesondere der PROBAS-Datenbank des Umweltbundesamtes.

Zur besseren Vergleichbarkeit wird der KEA der Materialien entsprechend der obigen Darstellung zu Außenhülle (oben, grau), Isolierung (Mitte oben, blau) und Innenverkleidung (Mitte unten, rot) zusammengefasst. Der direkte Energieeinsatz im Herstellprozess ist unten (gelb) dargestellt. Wie man der Abbildung entnehmen kann, geht der Energieaufwand pro Gerät zu rd. 90 % auf den KEA für die eingesetzten Materialien zurück. Insbesondere fällt dabei die Isolierung ins Gewicht, da die im Referenzgerät eingesetzte Isolierung aus Polyurethanschaum und VIP einen hohen KEA bedingt.

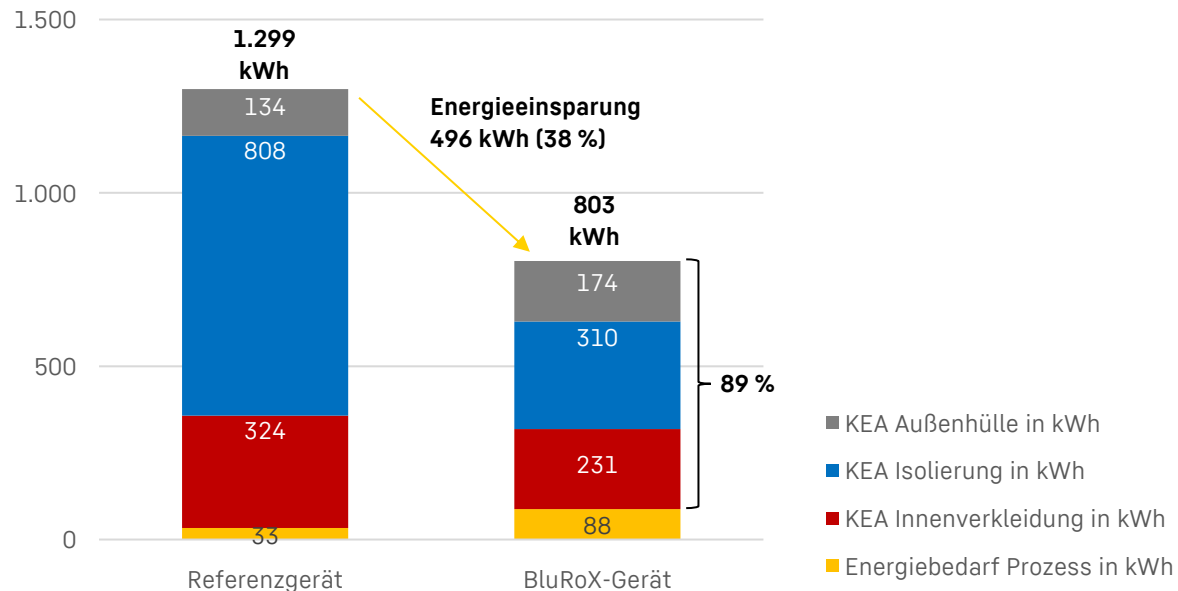


Abbildung 20: Energieverbrauch im Herstellprozess: Referenzgerät und BluRoX-Gerät im Vergleich inkl. Einsparung

Der direkte Energiebedarf im Herstellprozess ist aktuell mit rd. 88 kWh pro Gerät noch deutlich höher als angestrebt. Erwartet wird hier ein Energiebedarf vergleichbar mit dem des Referenzgeräts (rd. 33 kWh). Der aktuell noch hohe Energiebedarf im Prozess ist vor allem bedingt durch die noch niedrigen Stückzahlen, auf deren Messungen und Berechnungen die Daten beruhen. Einige Prozessschritte, insbesondere zu nennen die

Perlitkonditionierung und das Evakuieren weisen eine relativ hohe Grundlast auf, die sich mit steigenden Stückzahlen auf mehr Geräte verteilt, sodass der Energieverbrauch pro Stück sinkt.

3.2.2 Einsparungen in der Nutzungsphase

Die hohe Energieeinsparung in der Nutzungsphase hängt mit der höheren Energieeffizienzklasse zusammen, die das BluRoX-Gerät durch seine gute Isolation ermöglicht. Das Referenzgerät entsprach zum Zeitpunkt der Antragstellung der höchsten Energieeffizienzklasse A+++ . In der Zwischenzeit wurde die EU-Norm angepasst, nach neuer Norm ist es der Energieeffizienzklasse C zuzuordnen. Wurde in der Antragstellung noch konservativ davon ausgegangen, dass mit dem BluRoX-Gerät die Energieeffizienzklasse B erreicht wird, wird nun tatsächlich die Energieeffizienzklasse A erreicht. Dies ermöglicht eine Energieeinsparung von 1,1 MWh (rd. 36 %) über die Nutzungsdauer des BluRoX-Geräts gegenüber dem Referenzgerät sowie eine Einsparung von 18 % gegenüber dem BluRoX-Gerät in Klasse B.

	Referenzgerät	BluRoX (Antrag)	BluRoX (Abschlussbericht)
Energieeffizienzklasse (EE-Klasse)	C	B	A
Verbrauch pro Jahr gemäß EU-Norm	179 kWh	139 kWh	114 kWh
Verbrauch über Nutzungsdauer von 17 Jahren	3.043 kWh	2.363 kWh	1.938 kWh
Einsparung gegenüber Referenzgerät	-	680 kWh (22 %)	1.105 kWh (36 %)
Einsparung EE-Klasse A gegenüber EE-Klasse B			425 kWh (18 %)

Tabelle 10: Zielerreichung Energieeinsparung in der Nutzungsphase

3.3 Umweltbilanz

In den folgenden Kapiteln zur Umweltbilanz erfolgt auf Basis des Kapitels 3.2 eine Darstellung der vermiedenen energie- und prozessbedingten Treibhausgas-Emissionen sowie eine qualitative Darstellung der Umwelteffekte durch Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit der BluRoX-Technologie.

3.3.1 Langzeitmessungen und erste Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Die Isolationswirkung der verschiedenen eingesetzten Technologien zur Isolation nimmt über die lange Lebensdauer eines Kühl- und Gefriergeräts ab. Langjährige Messreihen der LHG an Materialproben im Labor zeigen jedoch, dass sich die Isolationswirkung typischer Materialien über 20 Jahre durch Materialalterung sehr unterschiedlich verhält. Liebherr-Kühl- und -Gefriergeräte sollen so lange wie möglich energieeffizient arbeiten. Deshalb kommen in hocheffizienten Geräteklassen heute PU-Schaum großflächig ergänzt durch langlebige Vakuumisulationspaneele (VIPs) mit pyrogener Kieselsäure als Kernmaterial als Isolationstechnologie zum Einsatz, die sehr langsam altern.

Obwohl der Wärmeleitwert von evakuiertem Perlit, wie es in den BluRoX-Geräten zum Einsatz kommt, höher ist als der von anderen Vakuumpaneelen, ist die Gesamtisolationswirkung der BluRoX-Geräte besser, da das ganze Gerät aus einer Vakuumisolation aufgebaut ist, als von Geräten, die PU-Schaum ergänzt durch Kieselsäure basierte VIPs nutzen. Dieser Vorteil entsteht dadurch, dass das gesamte Gerät aus der Vakuum-Perlit-Isolierung besteht.

Ausgehend von einem beschädigungsfreien Perlitkörper wird bei perlitbasierten Geräten über mindestens 17 Jahre Lebensdauer eine sehr geringe Verschlechterung der Isolationswirkung um nur rd. 1 % pro Jahr erwartet. Dies entspricht einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von 7 auf 8,19 mW/m²*K nach mindestens 17 Jahren. Dieser

Anstieg der Wärmeleitfähigkeit ist auf einen Gasdruckanstieg im Vakuumraum zurückzuführen, da eine geringe Luftmenge (ca. $1 \cdot 10^{-7}$ mbar l/s) die den Perlitkörper umgebende Hochbarrierefolie durchdringt. Eindringender Wasserdampf trägt nicht zur Alterung der Isolation bei, da er über die vorgesehene Sorptionspumpe abgeführt wird. Der Funktionsausfall des Geräts (= Betauung, Dauerlauf des Kompressors, Nichterreichen der Zieltemperatur) ist ab einer Wärmeleitfähigkeit von 30 mW/m²*K zu erwarten. Dieser Fall tritt bei einem beschädigungsfreien perlitbasierten Gerät theoretisch erst nach mehr als 300 Jahren ein.

Erste Erfahrungen aus dem Feld mit rd. 20.000 Gerätetüren, die über Vakuum-Perlit-Technologie verfügen und in PU-Schaum-Gerätegehäusen verbaut wurden, bestätigen die Laborversuche: Gemessen wurden weniger als ein Prozent thermische Verschlechterung pro Jahr, bei Geräten, die 6 Jahre im Einsatz waren. Reklamationen aufgrund der Isolierung sind seit Markteintritt nicht zu verzeichnen. Ausgehend von diesen Erfahrungen spricht aktuell alles dafür, dass – unter der Voraussetzung eines beschädigungsfreien Perlitkörpers – die prognostizierte Lebensdauer von mindestens 17 Jahren wie erwartet erreicht werden kann.

3.3.2 Beitrag zum Umweltschutz

Die vermiedenen Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) werden auf Basis des THG-Emissionsfaktors mit Vor-ketten aus dem Jahr 2022 (für Strom/elektrische Energie) gemäß Umweltbundesamt²² in Höhe von 498 g CO₂-Äquivalenten pro kWh dargestellt.

Jahr	Kohlendi-oxidemissionen der Strom-erzeugung ¹ [Mio. t]	Strom-verbrauch ² [TWh]	CO ₂ -Emissions-faktor Strommix ³ [g/kWh]	Stromverbrauch unter Berücksichtigung des Strom-handels-saldos ⁴ [TWh]	CO ₂ -Emissionsfaktor Strom-inlands-ver-brauch ⁵ [g/kWh]	Kohlen-dioxid-emissionen der Stromer-zugung unter Berücksichtigung Handels-saldo ⁶ [Mio. t]	THG-Emission-faktor ohne Vor-ketten [g CO ₂ -Äqui-valente /kWh]	THG-Emission-faktor mit Vor-ketten [g CO ₂ -Äqui-valente /kWh]	THG-Emissionen der Strom-erzeugung [Mio. t CO ₂ -Äqui-valente] ⁷
1990	366	479	764	480	763	367	769	860	369
2016	303	581	522	530	572	277	531	595	309
2017	285	584	488	531	537	259	498	557	290
2018	271	573	472	525	516	248	481	538	276
2019	222	543	408	511	434	208	416	473	226
2020	187	513	364	494	378	180	373	429	191
2021	214	526	407	508	422	207	416	473	219
2022*	221	515	429	488	453	209	439	498	226
2023**	173	454	380	465	371	177	388	445	176

*vorläufig, ** geschätzt

Quellen: Umweltbundesamt eigene Berechnung April 2024

Abbildung 21: THG-Faktor zur Berechnung der Umwelteffekte des Vorhabens

Zur besseren Vergleichbarkeit wird zur Darstellung der Einsparung an THG-Emissionen das gleiche Balkendiagramm gewählt wie zur Darstellung der Energieeinsparung. Im Diagramm ist abzulesen, wie sich die Reduzierung der THG-Emissionen gegenüber dem Referenzgerät über die Lebensdauer eines Geräts bei steigenden jährlichen Stückzahlen entsprechend der in Kapitel 3.2 bereits genutzten drei Szenarien entwickelt.

Szenario 1: Markthochlaufphase (Produktion von 6.500 Geräten pro Jahr)

Szenario 2: Durchwachsene Baukonjunktur und Investitionsbereitschaft der Kunden (Produktion von 25.000 Geräten pro Jahr)

²² Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2023, Umweltbundesamt, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23_2024_cc_strommix_11_2024.pdf (abgerufen am 21.05.2025)

Szenario 3: Verbesserte Konjunktur, Technologieakzeptanz, hohe Investitionsbereitschaft (Produktion von 50.000 Geräten)

Der jeweils untere Teil des Balkens (blau) stellt dabei die Einsparung der THG-Emissionen in der Nutzung über einen Nutzungszeitraum von 17 Jahren dar. Der obere Teil (gelb) repräsentiert die Einsparung an THG-Emissionen im Herstellprozess. Wie man erkennen kann, erwartet LHG, dass die Einsparung über Stückzahleneffekte nochmals steigen wird. Zurückzuführen ist diese Steigerung auf eine Reduzierung des Energieverbrauchs pro Gerät im Herstellprozess. Im Kapitel 3.2.1 wurde dies im Detail erläutert.

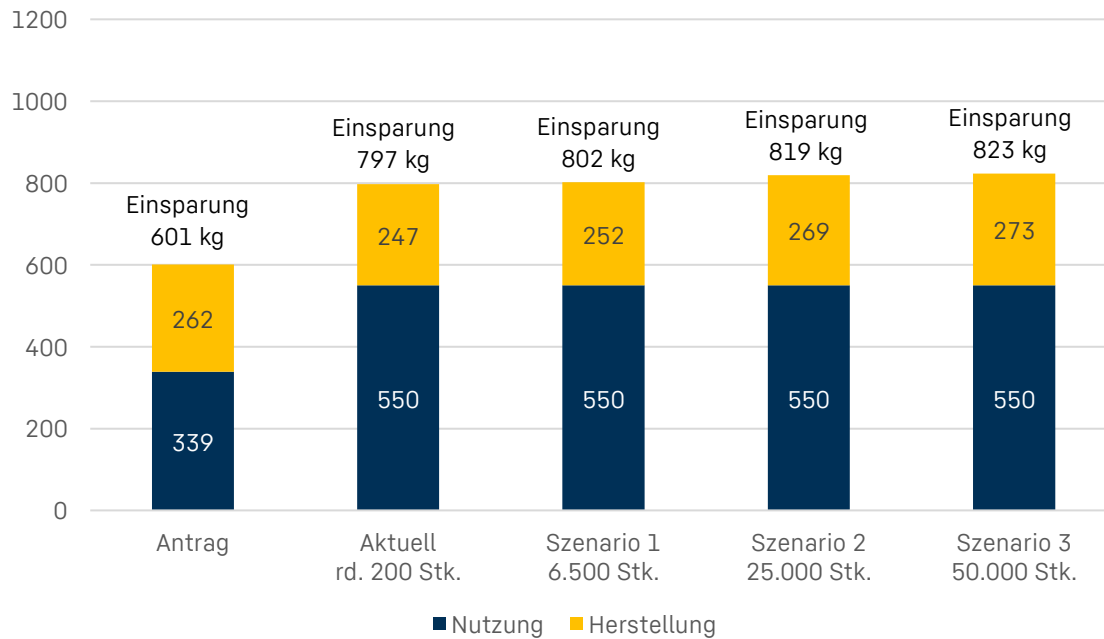


Abbildung 22: Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen über die Lebensdauer pro Gerät im Vergleich zum Referenzgerät in kg CO₂-Äq. inkl. Stückzahleneffekte der Szenarien

Über eine angenommene betriebsübliche 10-jährige Nutzungsdauer der Anlage und die – durch die 17-jährige Mindestlebensdauer der Geräte – lange Wirkungskdauer der Energieeffizienzeffekte lässt sich auf Basis aktueller Stückzahlenprognosen bei hoher Technologieakzeptanz, verbesserter Konjunktur und hoher Investitionsbereitschaft eine kumulierte Energieeinsparung von mindestens 450 GWh und eine Reduzierung von Treibhausgas-Emissionen (THGE) in Höhe von mindestens 224 kt durch das Vorhaben erzielen. 33 % der Einsparungen entfallen auf die Herstellung und 67 % auf die Nutzungsphase der Geräte.

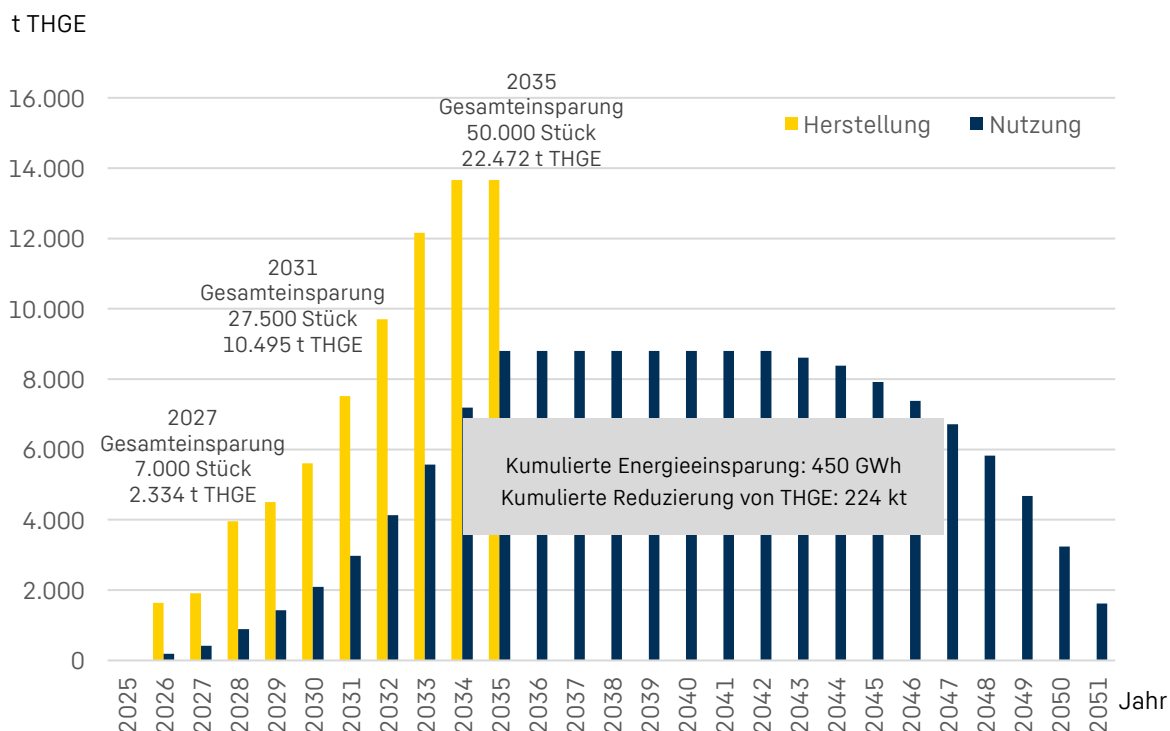


Abbildung 23: Einsparung von Treibhausgas-Emissionen in t gegenüber dem Referenzgerät über den Gesamtwirkungszeitraum des Vorhabens

3.3.3 Qualitative Bewertung zu Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit

Die im Vorhaben umgesetzte Vakuum-Perlit-Technologie BluRoX erforderte ein vollständiges Umdenken der Gefriertechnologie und ermöglicht erstmals einen konsequent zirkulären Ansatz nach den Prinzipien dieses Cradle-to-Cradle-Ansatzes (von der Wiege zur Wiege).

Cradle to Cradle Certified® ist eine eingetragene Marke des Cradle to Cradle Products Innovation Institute und ein renommierter Zertifizierungsstandard für Produkte, die für die Kreislaufwirtschaft entwickelt wurden. Anstatt dem „Take-Make-Waste“-Modell zu folgen, fördert Cradle to Cradle einen zirkulären Ansatz für kontinuierliche Wiederverwendung, Reparatur, Recycling oder biologischen Abbau. Die Designphilosophie von C2C basiert auf drei Kernprinzipien:

- **Abfall gleich Nahrung:** Produkte werden so entworfen, dass sie recycelt oder biologisch abgebaut werden können, wodurch alles in wertvolle Ressourcen umgewandelt wird.
- **Erneuerbare Energien nutzen:** Es werden erneuerbare Energiequellen wie Solar-, Wind- und Wasserkraft genutzt.
- **Vielfalt zelebrieren:** Die Vielfalt von Kulturen und Orten wird zelebriert. Es werden Produkte entworfen, die den Anforderungen der jeweiligen Gemeinschaften entsprechen und effektiv sind.

Cradle to Cradle (C2C) operiert mit zwei komplementären Kreisläufen: dem biologischen Kreislauf, der biologisch abbaubare Materialien in die Natur zurückführt, und dem technischen Kreislauf, der sich auf Produkte konzentriert, die für Wiederverwendung, Reparatur oder Recycling entwickelt wurden.

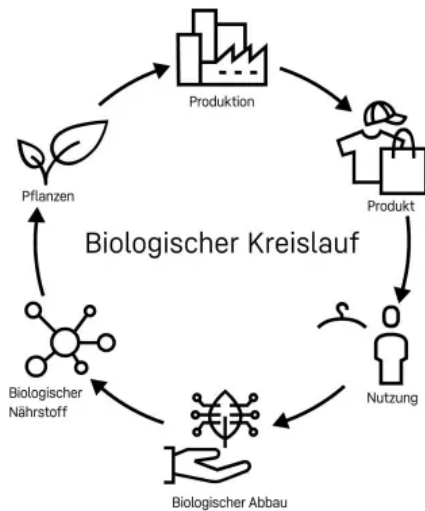


Abbildung 24: C2C biologischer Kreislauf

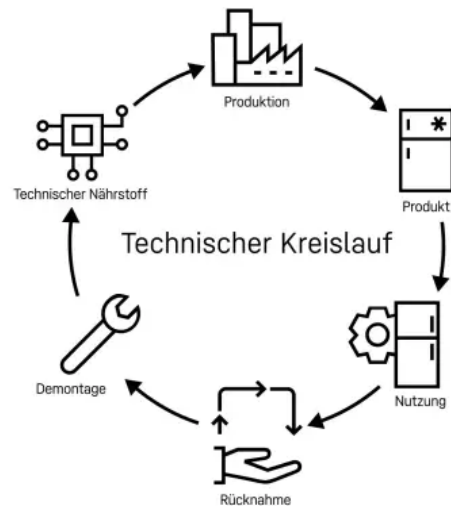


Abbildung 25: C2C technischer Kreislauf

Im biologischen Kreislauf (Abbildung 24) werden Produkte aus biologisch abbaubaren Materialien ohne schädliche Zusatzstoffe gefertigt. Diese Produkte zersetzen sich natürlich und kehren in die Biosphäre zurück, wodurch die Regeneration natürlicher Ressourcen unterstützt wird. Im technischen Kreislauf (Abbildung 25) werden nicht-biologisch-abbaubare Produkte so verwertet, dass sie der Umwelt keinen Schaden zufügen. Produkte im technischen Kreislauf sind dafür ausgelegt, wiederverwendet, repariert oder recycelt zu werden.

Entwickelt für Energieeffizienz, Recyclbarkeit und Reparaturfreundlichkeit folgt der erste auf der Vakuum-Perlit-Technologie basierende BluRoX-Gefrierschrank (FNXa 522i) diesen Prinzipien. Dieses Engagement hat ihm im September 2024 – als erstem Elektrogroßgerät der Branche – die Cradle-to-Cradle-Bronze-Zertifizierung in der Version 4.0 des Standards des Cradle to Cradle Products Innovation Institute (C2CPII) eingebracht.



Abbildung 26: C2C Logo

Die Zertifizierung ist Ergebnis eines umfassenden Prozesses, den Liebherr in Zusammenarbeit mit dem Forschungs- und Beratungsunternehmen EPEA (EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer) durchlaufen hat. Das BluRoX-FNXa-522i-Gerät selbst sowie der Produktionsprozess und organisatorisch eingebundene Bereiche des Produktionsstandorts Ochsenhausen wurden dabei in fünf Kategorien bewertet: Materialgesundheit, Kreislauffähigkeit, Saubere Luft & Klimaschutz, Wasser- & Bodenschutz und Soziale Fairness. Dabei wurde auch die Unternehmensstrategie zur kontinuierlichen und durchgängigen Weiterentwicklung von Produkt und Unternehmen im Sinne von C2C auf den Prüfstand gestellt. Die Zertifizierung (Gesamtergebnis) erfolgt auf Basis des niedrigsten Einzelergebnisses. Im Bereich Saubere Luft & Klimaschutz wurde jedoch sogar eine Silber-Bewertung erreicht.

	BRONZE	SILVER	GOLD	PLATINUM
MATERIAL HEALTH	●			
PRODUCT CIRCULARITY	●			
CLEAN AIR & CLIMATE PROTECTION		●		
WATER & SOIL STEWARDSHIP	●			
SOCIAL FAIRNESS	●			

Abbildung 27: Zertifizierungsergebnis BluRoX-Gerät (FNXa 522i) in Einzelkategorien

Im Einzelnen sind die Aspekte Recycling und Reparierbarkeit im Hinblick auf die Kreislauffähigkeit von besonderer Bedeutung, die auch im Rahmen des Vorhabens als Ziele definiert waren. Mit den eingesetzten Materialien und der modularen Bauweise der BluRoX-Geräte hat Liebherr bereits in der Gerätedesignphase alle Voraussetzungen geschaffen, um die verwendeten Stoffe wieder in den technischen Kreislauf zurückzuführen.

Recycling

Erste BluRoX-Geräte werden erst ab Anfang 2026 am Markt verfügbar sein. Das Recycling von Altgeräten zum Ende der Nutzungsdauer liegt daher noch weit über 10 Jahre in der Zukunft und eine konkrete Planung des Umgangs mit solchen Geräten steht noch aus, da diese auch die Kooperation der Aufbereitungsunternehmen voraussetzt. Folgendes kann aber zum aktuellen Zeitpunkt bereits berichtet werden:

LHG ist bereits im Jahr 2022 begleitend zur IFA 2022 mit einem Informationsschreiben an alle recyclinganlagenbetreibenden Unternehmen in Deutschland, Österreich und der Schweiz wie auch an den Europäischen Recyclingverband EERA (European Electronics Recyclers Association) herangetreten, um über die Vakuum-Perlit-Technologie und deren Implikationen auf das Recycling zu informieren.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) und der Montanuniversität Leoben wurde an verschiedenen Recyclinganlagen untersucht, ob sich die bereits am Markt befindlichen Türen mit Vakuum-Perlit-Isolation in mit Mehrwellenbrechern und Querstromzerspanern ausgestatteten Recyclinganlagen zerlegen lassen. Das Ergebnis war positiv. Die Berichte sind auf der I4R-Plattform (Information for Recycler) veröffentlicht. Diese Plattform dient dazu, recyclinganlagenbetreibenden Unternehmen die gemäß Richtlinie 2012/19/EU (WEEE-Richtlinie) verpflichtenden Herstellerinformationen für jeden in Verkehr gebrachten Typ von Elektro- und Elektronikgeräten über die Vorbereitung zur Wiederverwendung und die Behandlung kostenlos bereitzustellen. Die Plattform wurde u. a. von APPLiA gegründet, um den Bedürfnissen der Recyclingbranche gerecht zu werden. APPLiA ist der Branchenverband der europäischen Hausgeräteindustrie.

Seit 2019 setzen führende europäische Hausgerätehersteller (Arçelik, BSH, Candy, Electrolux, LG, Liebherr, Miele, Panasonic, Samsung, Vestel, Whirlpool and V-ZUG Kühltechnik) im Rahmen des APPLiA-Verhaltenskodex eine gemeinsame Kennzeichnung von Kühl- und Gefriergeräten, in denen Vakuumisolationspaneele (VIPs) zum Einsatz kommen, ein. Die Kennzeichnung wird auf der Rückseite der Geräte angebracht und liefert wichtige Informationen über die eingesetzten Materialien und den betroffenen Geräteteil der Produkte (z. B. VIP / P-DC = Vacuum Insulation Panel / Powder – Door/Cabinet). Die Kennzeichnung ermöglicht eine visuelle Identifizierung bei der Sortierung bestimmter Arten von Großgeräten für eine ordnungsgemäße Behandlung, gibt Hinweise auf den künftigen Bedarf an Recyclingtechnologien und sorgt für eine angemessene Sicherheit der Recyclinganlagen und der Beschäftigten. Aufgrund der bisher geringen Mengen an Geräten mit VIPs und da die Geräte ansonsten über denselben Aufbau wie konventionelle Geräte verfügen, findet keine gesonderte Behandlung statt. Seit 2023 sind einzelne Liebherr-Gefriergeräte am Markt, die mit Türen mit Vakuum-Perlit-Technik ausgestattet sind (nicht Teil des geförderten Vorhabens). Es handelt sich dabei um Geräte in hohen Energieeffizienzklassen, deren Gerätekörper durch PU-Schaum ergänzt mit VIPs isoliert wird. Diese Geräte sind ebenfalls bereits mit APPLiA-konformen Aufklebern versehen (s. Abbildung 28). Eine entsprechend angepasste Kennzeichnung ist für die BluRoX-Geräte ebenfalls vorgesehen.



Abbildung 28: Genormte Kennzeichnung PU-Schaum/VIP-Geräte mit BluRoX-Tür

Die BluRoX-Geräte ermöglichen durch die konsequent umgesetzte Modulbauweise mit zentraler Bündelung der Kühltechnik im Gerätesockel ein signifikant besseres Recycling, da das Kühltechnikmodul leicht vom Gerätekörper trennbar ist. Diese Modulbauweise sowie der Verzicht auf PU-Hartschaum als Kälteisolationmaterial vereinfachen das Recycling der Geräte im Vergleich zu konventionellen Kühl- und Gefriergeräten um ein Vielfaches. Im Einzelnen:

- Das Kühltechnikmodul kann entnommen, repariert oder durch ein neues ersetzt werden.

- Die aufwendige Schadstoff- und Sonderbehandlung bei der Aufbereitung herkömmlicher Kühl- und Gefriergeräte bedingt durch den PU-Schaum wird vermieden. Die aufwendige Schadstoff- und Sonderbehandlung bei der Aufbereitung herkömmlicher Kühl- und Gefriergeräte hinsichtlich der Kältetechnik wird erleichtert. Der Vakuum-Perlit-Isolationskörper ist nicht unumkehrbar mit den umliegenden Komponenten verbunden, wodurch auch die Außenhülle und die Innenausstattung einfach aufbereitet und wiederverwendet werden können. Die Deckschicht des Gerätekorpus kann nach dem Entfernen des Zubehörs vom Korpus getrennt und als Blech der Stahlherstellung zugeführt werden. Der Innenbehälter kann als Kunststoff-Rezyklat weiterverwendet werden.
- Perlit kann – das geforderte Eigenschaftsprofil vorausgesetzt – wieder in den Herstellprozess zurückgeführt werden (s. nachfolgende Punkte). Ist dies nicht möglich, kann er in verschiedensten Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen. So wird er bereits heute in Bereichen wie Gärtnerei und Landwirtschaft, Bauindustrie oder Getränkeindustrie eingesetzt. Bereits verwendeter und im Speziellen aus Vakuumverpackungen stammender Perlit findet derzeit primär als Binde- und Verdickungsmittel in der Klärschlammaufbereitung Verwendung.

LHG strebt an, den als Isolationsmaterial eingesetzten Perlit wiederzugewinnen und im Kreislauf erneut für Kühl-/Gefriergeräte zu verwenden. Für die Beurteilung der Kreislauffähigkeit von Perlit wurden zunächst Proben unter Laborbedingungen analysiert. Erste Laborergebnisse anhand von Materialproben aus bisherigen Verarbeitungszyklen bestätigten, dass die Anforderungen an die Materialeigenschaften, wie bspw. Partikelgrößenverteilung, Wärmeleitfähigkeit und Fließverhalten, erfüllt werden. Aus materialtechnischer Sicht ist eine Wiederverwendbarkeit gegeben, sodass Investitionen getätigt wurden, um den Perlit aus Ausschussgehäusen und -türen in den Prozess zurückzuführen. In der Vorserienphase wurden weitere Versuche durchgeführt, indem Perlit als Pulver abgesaugt und in den Fertigungsprozess zurückgeführt wurde. Analysen zeigten keine Beeinträchtigung der Isolationswirkung, seit Dezember 2024 werden versuchsweise Gerätetüren mit recyceltem Perlit gefertigt und verkauft. Kann eine Kompromittierung des Perlits ausgeschlossen werden und bestätigen die Erkenntnisse aus fortlaufenden Versuchsreihen, dass auch der Einsatz des Perlits aus Geräten, die z. B. im Garantiefall zur LHG zurückkommen, uneingeschränkt möglich ist, soll auch hier eine Rückführung des wareneingangsgeprüften Perlits in den Fertigungsprozess erfolgen. Ein besonderes Augenmerk liegt hier auf Verschmutzungen und dem Feuchtegehalt, der bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten darf, damit der Perlit in Kühl- und Gefriergeräten als Isolationsmaterial eingesetzt werden kann.

Zur Rückgewinnung des Perlits werden aktuell Ausschussgehäuse und -türen zerlegt und der Perlit über eine spezielle Rückgewinnungsanlage mit Saugsystem abgesaugt und wieder in einen Big Bag gefördert. Das Rezyklat im Big Bag wird im Wareneingang geprüft, bevor es verwendet wird. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Aufschneiden eines Gerätegehäuses (Abbildung 29), das Absaugen des Perlits aus dem aufgeschnittenen Folienbeutel (Abbildung 30) und die Perlit-Rückgewinnungsanlage mit einem Big Bag (Abbildung 31).



Abbildung 29: Aufschneiden eines Gerätegehäuses zur Perlitabsaugung



Abbildung 30: Absaugen des Perlits aus dem aufgeschnittenen Folienbeutel



Abbildung 31: Perlit-Rückgewinnungsanlage mit Big Bag

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Aktivitäten und bisherigen Erkenntnisse wird erwartet, dass die Aufbereitung der BluRoX-Geräte nach Ablauf der Nutzungsphase nach Etablierung einer Recyclingroute bei einer Vielzahl von Recyclinganlagen möglich ist und nicht auf einige wenige spezialisierte Betreibende von Recyclinganlagen beschränkt bleibt. Bei einem Markteintritt 2026 und einer Lebensdauer von weit über 10 Jahren liegen etwaige Aktivitäten weit in der Zukunft.

Reparierbarkeit / Eigenrücknahme

Grundsätzlich nimmt die Reparierbarkeit einen hohen Stellenwert im Gesamtkonzept des nachhaltigen Produktlebenszyklus der mit der BluRoX-Technologie hergestellten Geräte ein. Repariert bzw. ausgetauscht werden können alle kältetechnischen, elektronischen, mechanischen und ausstattungsrelevanten Komponenten der BluRoX-Geräte.

Die realisierte Modulbauweise ermöglicht wie beschrieben ein leichtes Entfernen und Austauschen des im Gerätesockel befindlichen Kühltechnikmoduls. Nach der Markteinführung des ersten BluRoX-Geräts Anfang 2026 wird erstmals am Markt ein neuartiges Kundenservicekonzept umgesetzt. Dies sieht vor, defekte Kühltechnikmodule im Rahmen der Garantie durch Werks-, Vertrags- oder Händlerkundendienst an Liebherr zurückzusenden, um sie durch neue, gleichwertige Module zu ersetzen. Wo möglich, sollen die Kühltechnikmodule repariert und dem Markt generalüberholt (refurbished) wieder zur Verfügung gestellt werden. Nach Ablauf der Garantie kann der Kunde erstmals am Markt zwischen einem neuen und einem generalüberholten Kühltechnikmodul wählen.



Abbildung 32: Austauschbares Kühltechnikmodul im Gerätesockel

In welchem Umfang generalüberholte Kühltechnikmodule in den Markt gebracht werden können, wird im Wesentlichen davon abhängen, wie gut diese Möglichkeit vom Markt angenommen wird. Zukünftig ist es auch denkbar, technische Upgrades unter Weiterverwendung des Gerätekorpus auszuliefern. Konkrete Schritte sind nach Analyse der Marktresonanz auf die Modulbauweise und auf den Einsatz von aufbereiteten (refurbished) Kühltechnikmodulen generell angedacht. Neben dem Kühltechnikmodul können zudem auch Elektronik- und Mechanikkomponenten einzeln ausgetauscht werden.

3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Umsetzung des Vorhabens stellt einen Paradigmenwechsel in der Hausgerätetechnologie dar. Die neue umweltfreundliche Technologie für eine neue Produktgeneration mit einer vollkommen neuartigen Isoliertechnik umfasst einen neuen Prozess, neue Anlagen und neue Materialien. Der hohe Innovationsgrad bedingte eine hohe Komplexität und hohe Risiken des Vorhabens.

Demgegenüber stehen hohe Umwelteffekte – vor dem Hintergrund dieser Gründe wurde das Vorhaben dankenswerterweise im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms gefördert. Aufgrund der seit Beginn des Vorhabens kontinuierlich andauernden geopolitischen und wirtschaftlichen Krisen haben sich die Vorhabenskosten gegenüber der Planung lt. Antragstellung höher entwickelt. LHG glaubt an die Technologie und sieht ihr hohes Potenzial insbesondere hinsichtlich Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft und war bereit diese Mehrkosten zu tragen. Auf Basis der aktuell prognostizierten Stückzahlen bei hoher Technologieakzeptanz, verbesserter Konjunktur und hoher Investitionsbereitschaft geht LHG unter Berücksichtigung erzielbarer Einsparungen (siehe Abbildung 33) und zusätzlicher Erlöse in der angenommenen betriebsüblichen Nutzungsdauer der Anlage von 10 Jahren von einer Amortisation der initialen Investition in rd. 5 bis 6 Jahren (mit und ohne UIP-Förderung) aus.

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die hohen Umwelteffekte des Vorhabens ausführlich dargestellt. Neben diesen Umwelteffekten bringt die neuartige BluRoX-Technologie beachtliche wirtschaftliche Vorteile gegenüber der konventionellen Isolationstechnologien mit sich. Möchte man mit konventionellen Isolationsverfahren eine mit BluRoX annähernd vergleichbare Isolationswirkung erreichen, würde man z. B. den Weg wählen, die VIP-Belegung auf ein Maximum zu erhöhen. Dafür müsste ein Vielfaches an Materialkosten aufgewendet werden. Um diese wirtschaftlichen Vorteile zu verdeutlichen, werden im Folgenden die Kosten für die Isolierung des BluRoX-Geräts den Kosten des bereits bekannten Referenzgeräts ergänzt um eine maximale VIP-Belegung (im Folgenden Referenz+ genannt) gegenübergestellt. Zwar lässt sich auch mit technisch maximal machbarer VIP-Belegung voraussichtlich nur die Energieeffizienzklasse B erreichen, dennoch ist es die qualitativ beste Isolierung die – jenseits der BluRoX-Technologie – mit konventionellen Isolationstechnologien darstellbar ist.

	Referenzgerät+ (maximale VIP-Belegung)	BluRoX-Gerät
Energieeffizienzklasse	B	A
Isolationstechnologie	Polyurethanschaum mit einem eingebrachten Vakuumisulationspaneel in der Gerätetür Außenhülle (Blech) PU-Schaum Vakuum-Isulations-Paneel (VIP) Innenverkleidung (Kunststoff)	Vakuum-Perlit-Technologie (BluRoX-Technologie) Außenhülle (Blech) Hochbarrierefolie Evakuierter Perlit Innenverkleidung (Kunststoff)
Materialeinsatz	~ 14 kg PU-Schaum	~ 68 kg expandierter Perlit
Isolierung	~ 17 kg VIPs	~ 13 m ² Hochbarrierefolie

Tabelle 11: Vergleich Materialeinsatz BluRoX und Referenzgerät mit maximaler VIP-Belegung

Unter Berücksichtigung des angenommenen Materialeinsatzes für die Isolierung aus der obenstehenden Tabelle 11 ergibt sich durch die BluRoX-Technologie pro Gerät eine Kosteneinsparung gegenüber dem Referenzgerät+ mit maximaler VIP-Belegung von 93 Euro.

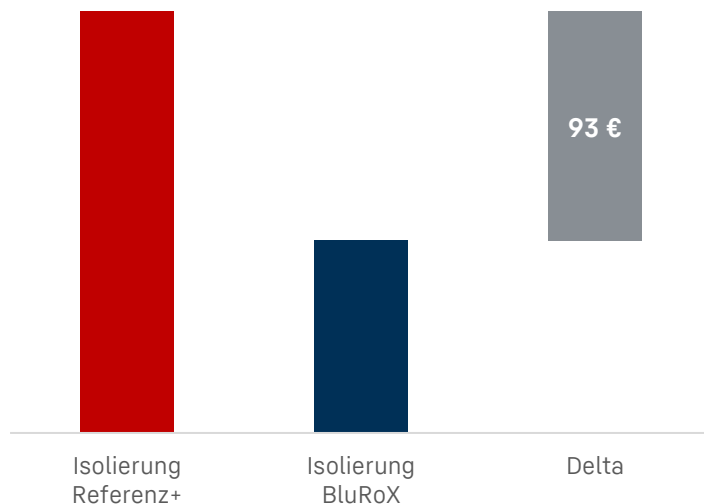


Abbildung 33: Mehrkosten für die Isolierung pro Gerät mit maximaler VIP-Belegung (Referenz+)

Im Kapitel 4.2 wird im Detail auf den Modellcharakter des Vorhabens und seine Übertragbarkeit auf andere Anwendungen eingegangen, um die wirtschaftlichen und umweltrelevanten Vorteile der Technologie auch dort heben zu können.

3.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Die Vakuum-Perlit-Technologie ist nicht mit konventionellen Verfahren zur Herstellung von Kühl-/Gefriergeräten vergleichbar. Ausgehend von der Zielsetzung maximale Energieeffizienz mit einer langanhaltenden Isolationswirkung zu erreichen, wendet Liebherr das Prinzip der Vakuumwärmedämmung an und überträgt es auf ein neuartiges Konstruktionsprinzip für Kühl-/Gefriergeräte, welches ein vollkommen neuartiges Fertigungsverfahren erfordert. Innovativer Kern dieses Fertigungsverfahrens ist die Herstellung eines Gerätekorpus aus einem Folienbeutel (Klotzbodenbeutel) gefüllt mit Perlit, der gezielt kompaktiert und geformt wird und dem schließlich über die im Folienbeutel eingebrachte Sorptionspumpe über mehrere Stunden Luft entzogen wird (Evakuierung).

Während im konventionellen Prozess eine aus hohlen Formteilen geformte Hülle (Gerätekorpus oder Tür) mit Isolationsmaterial ausgefüllt wird, wird bei der Vakuum-Perlit-Technologie ein Gerätekorpus bzw. eine Tür direkt aus Isolationsmaterial geformt. Die Formteile aus Blech und tiefgezogenem Kunststoff geben im konventionellen Ver-

fahren Korpus und Gerätetür die erforderliche Stabilität. Bei der Vakuum-Perlit-Technologie ermöglicht der Sandwichverbund aus Vakuumkörper, Innenbehälter und Außenhülle in Verbindung mit der gegenüber PU-Schaum vierfach höheren Materialsteifigkeit des Perlits die Realisierung eines neuartigen Konstruktionsprinzips, dass der Gerätestruktur des Gehäuses die erforderliche Steifigkeit verleiht. Im Einzelnen erfolgt die Fertigung konventionell in folgenden wesentlichen Schritten:

Prozessschritt	Vergleich zu Vakuum-Perlit-Technologie
1. Abwicklung Blech vom Coil 2. Zuschneiden und Profilierung der Blechteile	Beide Schritte sind im konventionellen und im Vakuum-Perlit-Verfahren gleich. Konventionell dienen die Bleche strukturgebend zur Bildung eines Sandwichverbundes. Im Vakuum-Perlit-Verfahren dienen sie zusätzlich als Deckschicht zum Schutz der Hochbarrierefolie, die die aus Dämmmaterial geformten Bauteile umgibt.
3. Tiefziehen Kunststoffplatten zur Formung von Innenbehälter bzw. Innentür	Dieser Schritt fällt in beiden Verfahren gleichermaßen an.
4. Einlegen von Blech- und Kunststoffteilen in Schaumform 5. Aufkleben VIP auf Blechgehäuse/-tür, anschließend Ausschäumen Gehäuse- bzw. Gerätetürform und Aushärten der durch PU-Schaum zum Sandwich verbundenen Bauteile	Im Vakuum-Perlit-Verfahren werden diese beiden Prozessschritte des konventionellen Herstellprozesses durch den Formgebungsprozess des Vakuum-Perlit-Körpers (Gehäuse bzw. Tür), wie in Kapitel 2.2 beschrieben, ersetzt.

Tabelle 12: Wesentliche Fertigungsschritte konventioneller Kühl- und Gefriergeräte

4 Übertragbarkeit

4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Die Entwicklung und nun im Rahmen des Vorhabens erfolgte erste Umsetzung der BluRoX-Technologie hat 10 Jahre in Anspruch genommen und stellt einen Paradigmenwechsel hinsichtlich Materialeinsatz, Konstruktion und Fertigung von Kühl-/Gefriergeräten dar. Die Firma Liebherr glaubt an die Technologie und hat sie mit Blick auf eine kreislauffähige Wirtschaft entwickelt. Im Fokus stehen Energie- und Ressourceneinsparung, einfache Reparierbarkeit und Wiederverwendung von Materialien sowie die Unterstützung eines verantwortungsvollen und nachhaltigeren Lebenszyklus.

Die Projektumsetzung der ersten großtechnischen Anwendung der BluRoX-Technologie ist als technischer Erfolg zu werten. Die erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens erforderte ein profundes integriertes Material- sowie Fertigungswissen und einen kontinuierlichen Lern- und Verbesserungsprozess, der auch nach Abschluss des Förderprojekts andauern wird. Es handelte sich um ein Projekt des Sondermaschinenbaus. Dies, die hohe Anlagenkomplexität und die sehr hohen Qualitätsanforderungen an die herzustellenden Produkte ließen von Beginn an Unwägbarkeiten und technische Risiken erwarten, die es zu beherrschen galt. Eine enge Zusammenarbeit und konsequente Steuerung der Lieferunternehmen sowie eine kontinuierliche Qualitätssicherung sind in solchen Projekten eine Grundvoraussetzung, um diese zum Erfolg zu führen. Wesentliche Erfolgsfaktoren:

- Komplexitätsreduzierung durch Aufteilung in mehrere beherrschbare Teilvorhaben unter kontinuierlicher Betrachtung der Schnittstellen für die Integration zur Gesamtanlage;
- Dedizierte zentrale Projektorganisation unter enger Einbindung der Fertigungsfachleute bereits in der Planungsphase bis zur Inbetriebnahme der Anlage;
- Größenbedingt idealerweise eine dedizierte Produktionshalle;
- Sicherstellung der Skalierbarkeit der Anlagenbestandteile;
- Detaillierte und stark überwachte Test- und Produktionsanlaufphase, die dazu dient, den Prozess ausführlich zu analysieren und mögliche Problemstellungen zu beheben;
- Hohes Vakuum-, Prozess- und Material-Know-how erforderlich, um in einem kontinuierlichen Lern- und Verbesserungsprozess eine hochqualitative Fertigung zu erreichen;
- Kontinuierliches Qualitäts- und Risikomanagement inkl. Messmittel/Messsystematik und deren Komplexität, um eine reibungslose Integration in die Fertigungsabläufe zu gewährleisten;

- Frühe Betrachtung weiterer potenzieller Anwendungsbereiche, um die Wirtschaftlichkeit stabil aufzustellen.

Darüber hinaus ist bei solchen Großprojekten immer mit Verzögerungen zu rechnen. Diese fielen bei der Vorhabensumsetzung besonders schwer ins Gewicht, da die Corona-Pandemie und der Krieg Russlands gegen die Ukraine Lieferengpässe, Lieferverzögerungen und massive Kostensteigerungen nach sich zogen, die nicht vorhersehbar waren.

Wie bereits dargestellt, wies das Vorhaben einen hohen Innovationsgrad hinsichtlich Herstellprozess, Materialien und Anlagentechnik auf, die in ein Kühl- und Gefriergerät mit vollkommen neuartigem Isolationsprinzip münden. Erkenntnisse aus dem laufenden Anlagenbetrieb, der Materialforschung wie auch die Resonanz aus dem Markt, vom Kundendienst und von Recyclingbetrieben werden dazu dienen, Herstellprozess, Materialien und auch die gefertigten Produkte in künftigen Produktgenerationen kontinuierlich weiter zu optimieren. Wesentliche Produktänderungen hinsichtlich des Gerätegrundprinzips und -aufbaus sind jedoch nicht zu erwarten.

4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)

Die BluRoX-Technologie lässt über den Bereich der Haushaltsgroßgeräte hinaus einen hohen Multiplikatoreffekt erwarten.

Eines der einzigartigen Merkmale der Vakuum-Perlit-Isolationstechnologie besteht darin, dass das folienbasierte System mit Perlitfüllung beliebige Formen wie Rohre, Paneele, Boxen und Kessel kosteneffizient umhüllen und mit Vakuum isolieren kann – egal ob zur Wärme- oder Kälte­dämmung.

Das vakuumtechnologiebasierte Fertigungsverfahren mit seinen flexiblen Formgebungsmöglichkeiten erleichtert den Technologietransfer auf Anwendungen in andere Branchen und Märkte, wie z. B.:

- Baubereich: Fertighäuser, Sandwichplatten, etc.
- Energietechnik: Warmwasserspeicher, Boiler, Saisonspeicher, Rohrleitungssysteme, etc.
- Logistik: Transportcontainer (Tiefkühltransporte) für temperaturempfindliche Güter der Lebensmittel- und Chemieindustrie, temperaturgeführte Industrielogistik (Flüssiggase, Zwischenprodukte der chemischen Industrie), etc.
- Fahrzeugbau: Isolation von Batterien in E-Fahrzeugen, elektronischen Bauteilen, Komponenten der Klimaanlage, Wasserspeicher, etc.
- Schienenfahrzeuge: Isolierung von Decke, Boden und Seitenwänden

Um die positiven Effekte und das profunde Wissen im Zusammenhang mit der Vakuum-Perlit-Isolationstechnologie über die Hausgeräteindustrie hinaus früh in die Breite zu tragen, wurde von Liebherr vorhabensbegleitend die TerraVac GmbH (<https://terravac.eu>) gegründet, die intensiv an der Übertragbarkeit der Technologie auf andere Anwendungsbereiche arbeitet. Zu nennen sind hier insbesondere Anwendungen zur Warmwasserspeicherung. Hier gibt es bereits erste Demonstratoren für potenzielle Kund:innen, welche aufgebaut und mit positivem Ergebnis vermessen wurden.

4.3 Kommunikation der Projektergebnisse

Bei der Kommunikation ist zwischen produkt- und technologiebezogener Kommunikation zu unterscheiden. Die vollkommen neuartige Vakuumkühltechnologie fußt auf einer neuartigen Fertigungstechnologie, die im Fokus des geförderten Vorhabens stand. Die neuartige Kühltechnologie daraus resultierender Produkte stand für Liebherr bereits sehr früh im Fokus seiner Kommunikationsmaßnahmen, um den Markt vorzubereiten und neugierig zu machen. Die Vakuumkühltechnologie wird unter dem Namen BluRoX-Technologie vermarktet.

Die Kommunikationsmaßnahmen zu Fertigungs- und Vakuumkühltechnologie gehen Hand in Hand und sind daher nicht trennscharf. Im Folgenden wird daher beides kombiniert dargestellt. Wobei festzuhalten ist, dass die Maßnahmen mit fortschreitendem Projektstand und insbesondere im Zusammenhang mit der erreichten Cradle-to-Cradle-Certified®-Zertifizierung detaillierter werden und zunehmend auch den Fertigungsprozess beinhalten.

4.3.1 Umgesetzte Maßnahmen

Umgesetzte Kommunikationsmaßnahmen

LIEBHERR

Laufend aktualisierte Information im Rahmen der Internetpräsenz / Veröffentlichungen des Unternehmens, z. B.

Aktuelles: <https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/aktuelles.html>

News und Pressemitteilungen: [News und Pressemitteilungen - Liebherr](#)

Portal Kühl- und Gefriergeräte

<https://home.liebherr.com/de/deu/produkte/hausgeraete/hausgeraete.html>

Warum Liebherr? Spezial Energiesparen

<https://home.liebherr.com/de/deu/warum-liebherr/energiesparen/special-energiesparen.html>

Liebherr-Hausgeräte Corporate Responsibility

<https://www.liebherr.com/de-de/gefrier-kuehlschraenke/verantwortung-2451709>

Liebherr Firmengruppe Corporate Responsibility

[Liebherr Corporate Responsibility](#)

Liebherr Firmengruppe Geschäftsberichte

<https://www.liebherr.com/de-de/firmengruppe/%C3%BCber-liebherr/gesch%C3%A4ftsberichte/gesch%C3%A4ftsberichte-3704415>



Veröffentlichungen auf den verschiedenen Social-Media-Plattformen

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/company/liebherr-home-appliances/>

YouTube: <https://www.youtube.com/user/LiebherrHausgeraete>



Facebook: <https://www.facebook.com/LiebherrHausgeraeteDE>

Instagram: <https://www.instagram.com/liebherrhausgeraete/>

Präsenz und Vorstellung auf wichtigen industrierelevanten Messen, insbesondere



IFA in Berlin, weltweit führende Messe für Consumer Electronics und Home Appliances

- Jahr 2022: Weltpremiere der BluRoX-Technologie, Präsentation eines Prototyps im Händlerbereich, Technologiekommunikation im offenen Publikumsbereich
 - Jahr 2023: Präsentation des FNb 6055 mit BluRoX-Technologie in der Tür, BluRoX als Proof Point für die Corporate-Responsibility-Strategie von Liebherr-Hausgeräte, mit Fokus auf das vulkanische Gestein Perlit
 - Jahr 2024: Präsentation des ersten Cradle-to-Cradle-Certified®-Gefrierschranks, FNxa 522i, im Publikumsbereich, Start der C2C-Kommunikation am Produkt sowie an separater Messewand, Besuch des Bundeskanzlers Olaf Scholz
-



Küchenmeile Architekturwerkstatt in Löhne, Ausstellung qualitativ hochwertiger Küchengeräte ausgewählter Hersteller, u. a. Liebherr-Hausgeräte

- Jahr 2022: Analog IFA
- Jahr 2023: Analog IFA



Präsenz und Vorstellung im Rahmen von sonstigen Veranstaltungen

- Impulsvortrag
Kreislauffähig im Design: Der neu erfundene C2C-Gefrierschrank
- Vorstellung der Vakuum-Perlit-Technologie sowie der Vorteile für Mensch und Umwelt
- Der C2C-Gedanke und die Verknüpfung zur Nachhaltigkeitsstrategie von Liebherr-Hausgeräte



- Vakuum-Perlit-Technologie unter dem Motto “Hands on the future“ im Innovation Lab von Liebherr

- Best Practice innerhalb der Firmengruppe zum Thema “Material Technology“
- C2C-Film und verschiedene Perlitproben zur Wissensvermittlung



- Ergebnispräsentation von TerraVac zur Anwendung der BluRoX-Technologie im Temperaturbereich von -196 °C

- Große Potenziale für die Anwendung der Technologie in der Rohr- und Behälterdämmung

4.3.2 Geplante Maßnahmen



2025: Fortführung der Kommunikation zu Produkt und Technologie

Für den geplanten Verkaufsstart des BluRoX-Geräts FNx 522i zum 01.01.2026 werden zudem verschiedene Markteinführungsaktivitäten vorbereitet.

5 Zusammenfassung

5.1 Einleitung

Die Liebherr-Hausgeräte Ochsenhausen GmbH (im Folgenden LHG) beschäftigt rd. 2.000 Mitarbeiter:innen, ist die deutsche Produktionsgesellschaft der Sparte Hausgeräte mit Sitz in Ochsenhausen und gehört zur familiengeführten Liebherr-Unternehmensgruppe. Liebherr-Hausgeräte zählt als Spezialist im Bereich Kühlen und Gefrieren zu den europäischen Marktführern. Die Sparte entwickelt, produziert und vertreibt weltweit Kühl- und Gefriergeräte und trug 2024 mit rd. 1,1 Mrd. € zum Umsatz der Liebherr-Unternehmensgruppe bei. Rd. 75 % des Umsatzes wurden in der Europäischen Union erzielt.

Über 90 % des Energieverbrauchs von Kühl- und Gefriergeräten werden zur Aufrechterhaltung der Temperaturdifferenz zwischen Geräteinnenraum und Geräteumgebung aufgebracht. Zur Reduzierung des Energieverbrauchs ist daher die Verbesserung der thermischen Isolierung ein wesentlicher Ansatzpunkt. Darüber hinaus steht für Liebherr im Fokus, von der Entwicklung, über die Produktion entlang der gesamten Prozesskette nach ökologischen Aspekten zu arbeiten. Mit dem Vorhaben sollte der von der LHG beschrittene Weg der Energieeinsparung, Umweltschonung und Nachhaltigkeit von der Entwicklung über die Produktion bis hin zum Recycling konsequent fortgesetzt werden.

5.2 Vorhabensumsetzung

Das Vorhaben zielte auf die erstmalige großtechnische Umsetzung eines vollkommen neuartigen Fertigungsprozesses für Kühl- und Gefriergeräte. Die Anlage sollte eine hohe Ressourcen- und Energieeffizienz im Fertigungsprozess wie auch einen gegenüber dem Stand der Technik signifikant niedrigeren Energieverbrauch in der Geräte Nutzung über die gesamte Lebensdauer ermöglichen. Weiterhin sollten eine verbesserte Reparierbarkeit und Recycelbarkeit der Geräte erreicht werden.

Der Lösungsansatz umfasste im Kern einen neuartigen, technisch komplexen, hochautomatisierten Struktur- und Formgebungsprozess zur Umsetzung eines neuartigen Konstruktionsprinzips zur thermischen Isolation von Kühl- und Gefriergeräten. Unter innovativer Anwendung des Prinzips der Vakuumwärmedämmung (BluRoX-Technologie) wird dabei – dem Aufbau und dem Funktionsprinzip herkömmlicher Vakuumisulationspaneele (VIP) folgend – ein geometrisch komplexer, thermisch hocheffizient isolierender Vakuumgerätekörper nebst Vakuumgerätetür aufgebaut. Die Außenhülle der Vakuumkörper besteht aus einer Hochbarrierefolie, die das Vakuum inklusive des als Kernmaterial eingesetzten Perlit umschließt. Der entstehende Sandwichverbund aus Vakuumkörper, Innenbehälter (Kunststoff) und Außenhülle (Stahlblech) verleiht der Gehäusestruktur in Verbindung mit der Materialsteifigkeit des Perlits die erforderliche Steifigkeit. Die umgesetzte Fertigungsanlage umfasst die Prozessschritte Formgebung, Deckschichtanbringung und Evakuierung und ist auf eine Produktion von 50.000 Geräten pro Jahr ausgelegt. Die BluRoX-Geräte erreichen die Energieeffizienzklasse A.



Abbildung 34: Aufbau Vakuumisolation BluRoX

5.3 Ergebnisse

Das Vorhaben wurde technisch erfolgreich umgesetzt und die erwarteten Umwelteffekte erreicht. PU-Schaum als Dämmstoff entfällt ebenso wie ergänzende VIPs auf Kieselsäurebasis, die in herkömmlichen sehr energieeffizienten Geräten zur Verbesserung der thermischen Isolation zum Einsatz kommen. Dies, in Verbindung mit einer modularen Kapselung der Kühltechnik, ermöglicht gegenüber dem Stand der Technik eine deutlich verbesserte Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit. Die Ergebnisse des Messprogramms zeigen auf, dass gegenüber einem repräsentativen Referenzgerät über Herstellung und mindestens 17-jähriger Nutzungsphase pro Gerät insgesamt rd. 1,6 MWh Energie und 800 kg Treibhausgas-Emissionen (THG-Faktor: 0,498 kg/kWh) eingespart werden.

Über eine angenommene 10-jährige Nutzungsdauer der Anlage und die – durch die mindestens 17-jährige Lebensdauer der Geräte – lange Wirkungsdauer der Energieeffizienzeffekte lässt sich auf Basis aktueller Stückzahlenprognosen eine kumulierte Energieeinsparung von mindestens 450 GWh und eine Reduzierung von Treibhausgas-Emissionen in Höhe von mindestens 224 kt durch das Vorhaben erzielen. 33 % der Einsparungen entfallen auf die Herstellung und 67 % auf die Nutzungsphase der Geräte.

5.4 Ausblick

Das Vorhaben weist einen hohen Innovationsgrad hinsichtlich Herstellprozess, Materialien, Produkt und Anlagentechnik auf. Es handelte sich um ein Projekt des Sondermaschinenbaus. Diese Faktoren, gepaart mit einer hohen Anlagenkomplexität und sehr hohen Qualitätsanforderungen an die herzustellenden Produkte ließen von Beginn an Unwägbarkeiten und technische Risiken erwarten, die es zu beherrschen galt. Die enge Zusammenarbeit und konsequente Steuerung der Lieferunternehmen sowie eine kontinuierliche Qualitätssicherung sind in solchen Projekten eine Grundvoraussetzung, um sie zum Erfolg zu führen. Wesentliche Erfolgsfaktoren waren zudem ein integriertes Material- und Fertigungswissen sowie ein kontinuierlicher Lern- und Verbesserungsprozess, der auch nach Abschluss des Förderprojekts andauert. Eine ausgedehnte, stark überwachte Test- und Produktionsanlaufphase war zwingend erforderlich, um den Prozess ausführlich zu analysieren, Problemstellungen zu beheben und Verbesserungen umzusetzen.

Die BluRoX-Technologie lässt über den Bereich der Haushaltsgroßgeräte hinaus einen hohen Multiplikatoreffekt erwarten. Eines der einzigartigen Merkmale der Vakuum-Perlit-Isolationstechnologie besteht darin, dass das folienbasierte System mit Perlitfüllung beliebige Formen wie Rohre, Paneele, Boxen und Kessel kosteneffizient umhüllen und mit Vakuum isolieren kann – egal ob zur Wärme- oder Kälte-dämmung. Das vakuumtechnologiebasierte Fertigungsverfahren mit seinen flexiblen Formgebungsmöglichkeiten erleichtert den Technologietransfer auf Anwendungen in andere Branchen und Märkte, wie Bauindustrie, Energietechnik, Logistik, Fahrzeugbau und Schienenfahrzeuge. Um die positiven Effekte und das profunde Wissen im Zusammenhang mit der Vakuum-Perlit-Isolationstechnologie über die Hausgeräteindustrie hinaus früh in die Breite zu tragen, wurde von Liebherr vorhabensbegleitend die TerraVac GmbH (<https://terravac.eu>) gegründet, die intensiv an der Übertragbarkeit der Technologie auf andere Anwendungsbereiche arbeitet.

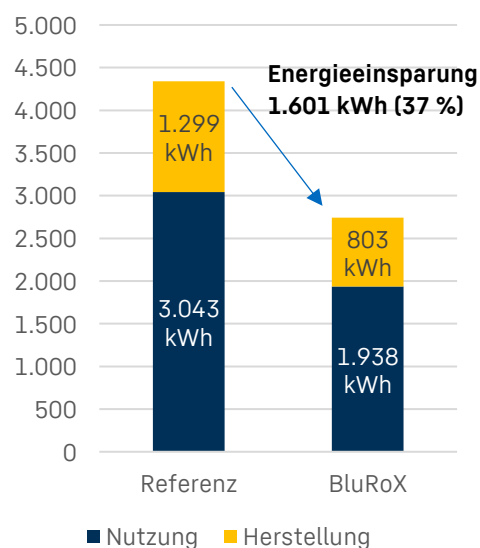


Abbildung 35: Zielerreichung des Vorhabens pro Gerät über Herstellung und Nutzungsphase

6 Summary

6.1 Introduction

Liebherr-Hausgeräte Ochsenhausen GmbH (hereinafter referred to as LHG) employs approx. 2.000 people, is the German production company of the Appliances division based in Ochsenhausen and is part of the family-run Liebherr Group. As a specialist in the refrigeration and freezing, Liebherr-Hausgeräte is one of the European market leaders. The division develops, produces, and sells fridges and freezers worldwide and contributed approx. 1.1 billion euros to the turnover of the Liebherr Group. Around 75 % of sales were generated in the European Union.

Over 90 % of the energy consumed by fridges and freezers is used to maintain the temperature difference between the appliance interior and the surrounding environment. Improving thermal insulation is therefore a key approach to reducing energy consumption. In addition, Liebherr focuses on working in accordance with ecological aspects along the entire process chain, from development to production. The aim of the project was to consistently continue the path taken by LHG towards energy saving, environmental protection, and sustainability, from development through production to recycling.

6.2 Project implementation

The project aimed to implement a completely new manufacturing process for fridges and freezers on an industrial scale for the first time. The system was designed to enable a high level of resource and energy efficiency in the production process, as well as significantly lower energy consumption in appliance use over the entire service life compared to the state of the art. Furthermore, improved reparability and recyclability of the appliances was to be achieved.

The approach essentially comprised an innovative, technically complex, highly automated structuring and shaping process for implementing a new construction principle for the thermal insulation of fridges and freezers. Using the innovative principle of vacuum thermal insulation (BluRoX technology), a geometrically complex, thermally highly efficient insulating vacuum appliance body and vacuum appliance door are constructed based on the structure and functional principle of conventional vacuum insulation panels (VIP). The outer shell of the vacuum body consists of a high-barrier foil that encloses the vacuum, including the perlite used as the core material. The resulting sandwich composite of vacuum body, inner container (plastic) and outer shell (sheet steel) gives the housing structure the necessary rigidity in combination with the material rigidity of the perlite. The implemented production system comprises the process steps of shaping, applying the top layer and vacuuming, and is designed for a production of 50,000 appliances per year. The BluRoX appliances achieve energy efficiency class A.



Figure 36: Structure of BluRoX vacuum insulation

6.3 Project results

The project was successfully implemented from a technical perspective and achieved the expected environmental effects. PU foam is no longer used as an insulating material, nor are supplementary silica-based VIPs, which are used in conventional, highly energy-efficient appliances to improve thermal insulation. This, in conjunction with modular encapsulation of the cooling technology, enables significantly improved repairability and recyclability compared to the state of the art. The results of the measurement programme show that, compared to a representative reference appliance, a total of approx. 1.6 MWh of energy and 800 kg of greenhouse gas emissions (GHG factor: 0.498 kg/kWh) are saved.

Over an assumed 10-year service life of the system and the long duration of the energy efficiency effects - due to the appliances' service life of at least 17 years - a cumulative energy saving of at least 450 GWh and a reduction in greenhouse gas emissions of at least 224 kt can be achieved through the project on the basis of current unit volume forecasts. 33% of the savings are attributable to production and 67% to the use phase of the appliances.

6.4 Prospects

The project is highly innovative in terms of the manufacturing process, materials, product, and system technology. This was a project in special machine construction. These factors, coupled with the high complexity of the system and the very high quality requirements for the products to be manufactured, meant that imponderables and technical risks had to be mastered from the outset. Close cooperation and consistent management of the supplier companies as well as continuous quality assurance are a basic prerequisite for the success of such projects. Other key success factors were integrated material and production expertise as well as a continuous learning and improvement process that continues even after the subsidised project has been completed. An extended, closely monitored test and production start-up phase was essential in order to analyse the process in detail, resolve problems and implement improvements.

BluRoX technology is expected to have a high multiplier effect beyond the area of large domestic appliances. One of the unique features of vacuum perlite insulation technology is that the foil-based system with perlite filling can cost-effectively wrap and vacuum insulate any shape such as pipes, panels, boxes, and boilers - whether for heat or cold insulation. The vacuum technology-based manufacturing process with its flexible shaping options facilitates technology transfer to applications in other sectors and markets, such as the construction industry, energy technology, logistics, vehicle construction and rail vehicles. In order to spread the positive effects and in-depth knowledge of vacuum perlite insulation technology beyond the appliance industry at an early stage, Liebherr founded TerraVac GmbH (<https://terravac.eu>) during the project, which is working intensively on the transferability of the technology to other areas of application.

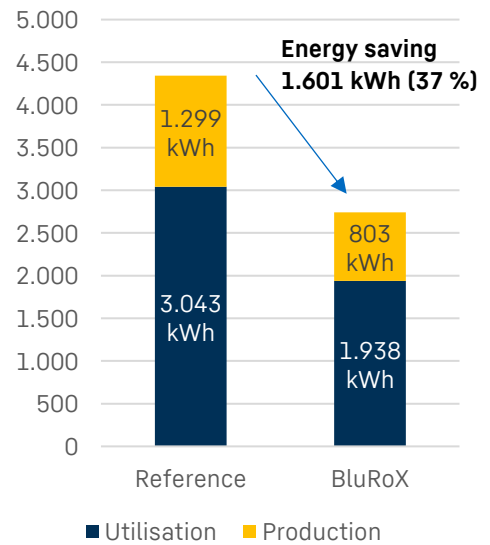


Figure 37: Target achievement of the project per appliance over the production and use phase