BMUKN-UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

Abschlussbericht

Zum Vorhaben

Prozesstiefkühlung mittels Luft-Kältemaschine für Austenitumwandlung

Zuwendungsempfänger/-in

Rudolf Rieker GmbH

Umweltbereich

Klimaschutz, Ressourceneffizienz, Energie

Laufzeit des Vorhabens

15.02.2023 – 31.12.2025

Autor

Michael Rieker

Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Datum der Erstellung

29.06.2026

Berichts-Kennblatt

<table>
<tr><td>Aktenzeichen UBA: 90 030/186</td><td>Projekt-Nr.: 3715</td></tr>
<tr><td colspan="2">Titel des Vorhabens:
Prozesstiefkühlung mittels Luft-Kältemaschine für Austenitumwandlung</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Autor/-en (Name, Vorname):

Michael Rieker</td><td>Vorhabenbeginn:
15.02.2023</td></tr>
<tr><td>Vorhabenende:
(Abschlussdatum)
31.12.2025</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Zuwendungsempfänger/in (Name, Anschrift):

Rudolf Rieker GmbH
Induktionshärterei
Daimlerstrasse 55
74211 Leingarten b. Heilbronn</td><td>Veröffentlichungsdatum:
29.06.2026</td></tr>
<tr><td>Seitenzahl:
23</td></tr>
<tr><td colspan="2">Gefördert im BMUV-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz</td></tr>
<tr><td colspan="2">Kurzfassung:
Im Rahmen des Vorhabens wurde bei der Rudolf Rieker GmbH eine innovative, luftbasierte Tiefkältekammer zur Restaustenitumwandlung in der Wärmebehandlung entwickelt, aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Ziel war es, den Einsatz von flüssigem Stickstoff (LN_2) durch eine energieeffiziente und betriebssichere Alternative zu ersetzen. Die Anlage erreicht reproduzierbar Temperaturen bis −85 °C und verfügt über ein integriertes Rekuperationssystem, das die in bereits gekühlten Chargen gespeicherte Kälte zur Vorkühlung nachfolgender Chargen nutzt. Dadurch konnte der Energieverbrauch gegenüber konventionellen LN_2-basierten Verfahren um rund 50 % reduziert werden. Gleichzeitig werden Treibhausgasemissionen sowie betriebliche Risiken durch den Umgang mit kryogenen Flüssigkeiten deutlich verringert. Die Anlage zeigte im Dauerbetrieb eine hohe Zuverlässigkeit und Bedienerakzeptanz. Aufgrund ihres modularen Aufbaus ist die Technologie auf weitere Härtereien und industrielle Wärmebehandlungsprozesse mit Tiefkühlanforderungen übertragbar.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Schlagwörter:
Luftbasierte Tiefkühltechnik, Restaustenitumwandlung, Energieeffizienz, Wärmerückgewinnung, Flüssigstickstoff-Substitution, Treibhausgasminderung, Industrielle Kältetechnik, Wärmebehandlung, Nachhaltige Produktion, Prozessinnovation</td></tr>
<tr><td>Anzahl der gelieferten Berichte
Papierform: 1
Elektronischer Datenträger: 0</td><td>Sonstige Medien: Regionalzeitung, Instagram
Veröffentlichung im Internet geplant auf der Webseite:
www.umweltinnovationsprogramm.de
www.haerterei-rieker.de</td></tr>
</table>

Report Coversheet

<table>
<tr><td>Reference-No. Federal Environment Agency:
90 030/186</td><td>Project-No.: 3715</td></tr>
<tr><td colspan="2">Report Title:
Process freezing using an air-cooled chiller for austenite transformation</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Author/Authors (Family Name, First Name):

Michael Rieker</td><td>Start of project:
February 15, 2023</td></tr>
<tr><td>End of project:
December 31, 2025</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Performing Organisation (Name, Address):

Rudolf Rieker GmbH
Induktionshärterei
Daimlerstrasse 55
74211 Leingarten b. Heilbronn</td><td>Publication Date:
June 29, 2026</td></tr>
<tr><td>No. of Pages:
23</td></tr>
<tr><td colspan="2">Funded in the Environmental Innovation Programme ofthe Federal Ministry forthe Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection</td></tr>
<tr><td colspan="2">Summary:
As part of the project, an innovative, air-based cryogenic chamber for residual austenite transformation in heat treatment was developed, installed, and successfully commissioned at Rudolf Rieker GmbH. The goal was to replace the use of liquid nitrogen (LN_2) with an energy-efficient and reliable alternative. The system consistently achieves temperatures as low as −85 °C and features an integrated heat recovery system that uses the cold stored in previously cooled batches to pre-cool subsequent batches. This has reduced energy consumption by approximately 50% compared to conventional LN_2-based processes. At the same time, greenhouse gas emissions and operational risks associated with handling cryogenic liquids are significantly reduced. The system demonstrated high reliability and operator acceptance during continuous operation. Due to its modular design, the technology can be adapted for use in other hardening facilities and industrial heat treatment processes with deep-freezing requirements.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Keywords:
Air-based deep-freezing technology, residual oxygen conversion, energy efficiency, heat recovery, liquid nitrogen substitution, greenhouse gas reduction, industrial refrigeration, heat treatment, sustainable production, process innovation</td></tr>
</table>

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 5

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens und der Projektpartner 5

1.2 Ausgangssituation 5

2. Vorhabenumsetzung 5

2.1 Ziel des Vorhabens 5

2.2 Technische Lösung 6

2.3 Umsetzung des Vorhabens 8

2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen) 8

2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten 9

3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung 9

3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung 9

3.2 Stoff- und Energiebilanz 10

3.3. Umweltbilanz 13

3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse 14

3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren 15

4. Übertragbarkeit 17

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung 17

4.2 Modellcharakter und Übertragbarkeit 18

4.3 Kommunikation der Projektergebnisse 19

5. Zusammenfassung / Summary 20

5.1 Zusammenfassung (Deutsch) 20

5.2. Summary (English) 22

6. Anhang 23

1. Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens und der Projektpartner

Die Rudolf Rieker GmbH aus Leingarten (Baden-Württemberg) ist ein mittelständischer Fachbetrieb für die Induktionshärtung von Stahlwerkstücken mit über 100 Beschäftigten. Das im Jahr 1978 von Rudolf Rieker gegründete Unternehmen deckt als eine der größten Induktionshärtereien Europas mit seinem Maschinenpark nahezu jegliche Art der induktiven Wärmebehandlung ab.
Das Härten von Stahlerzeugnissen und -werkstücken ist ein wichtiger Arbeitsschritt in der Stahlproduktion. Beim Induktionshärten werden im Werkstück Wirbelströme zwecks Erhitzung induziert, mit der ein Übergang in der Gitterstruktur des Stahls zu einem austenitischen Gefüge verbunden ist. Im Anschluss muss das Werkstück sehr schnell heruntergekühlt werden. Dies wandelt das austenitische Gefüge in ein martensitisches Gefüge um, wodurch die gewünschten Härten erzielt werden.

Rieker
Induktivhärten · Richten · Kalibrieren

- Rudolf Rieker GmbH: Projektinitiator, Anwendungspartner, Betrieb und Validierung
- Refolution Industriekälte GmbH: Entwicklung und Lieferung der Kälteanlage (Luftkältemaschine + Kältekammer)

1.2 Ausgangssituation

Eine Sonderanwendung der Wärmebehandlung ist die Tiefkühlbehandlung zur Verringerung des Restaustenitanteils im Werkstück. Stand der Technik hierfür ist der Einsatz von Flüssigstickstoff, sodass die Flüssigstickstofftechnik als Referenztechnologie herangezogen wird. Die Bereitstellung von Flüssigstickstoff ist jedoch mit einem erheblichen Energieaufwand für Herstellung, Transport und Lagerung verbunden. Darüber hinaus sind beim Umgang mit kryogenen Medien besondere Sicherheitsanforderungen zu beachten.

2. Vorhabenumsetzung

2.1 Ziel des Vorhabens

Die Zielsetzung des Vorhabens ist die Entwicklung und Inbetriebnahme einer industrietauglichen, luftbasierten Kältekammer zur präzisen und reproduzierbaren Erzeugung von Temperaturen bis −85 °C für die Restaustenitumwandlung.

Anforderungen:

- Ersetzen oder Reduzieren des Einsatzes von flüssigem Stickstoff
- Minimierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen
- Integration von Wärmerückgewinnung zur Erhöhung der Energieeffizienz
- Sichere, bedienerfreundliche und betriebstaugliche Lösung für den täglichen Einsatz

Mit dem entwickelten Verfahren sollen erstmals Temperaturen von bis zu −85 °C im Bereich der Restaustenitumwandlung durch eine luftbasierte Kältemaschine erreicht werden. Damit wird eine technologisch neuartige und ressourcenschonende Alternative zu konventionellen kryogenen Verfahren geschaffen. Den gegenüber herkömmlichen Verfahren höheren Investitionskosten stehen erhebliche Einsparpotenziale beim Energieverbrauch sowie bei den Treibhausgasemissionen (THG) gegenüber.

Zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz ist die Implementierung eines innovativen Rekuperationskonzepts vorgesehen. Dabei wird vor der Entnahme einer behandelten Charge bereits die nachfolgende Charge in die Kältekammer eingebracht. Durch eine gezielte Luftumwälzung wird die in der ersten Charge gespeicherte Kälteenergie auf die zweite Charge übertragen. Erst nach diesem Energieaustausch erfolgt die Entnahme der behandelten Charge. Auf diese Weise wird die vorhandene Kälteenergie effizient genutzt und der Energiebedarf des Gesamtprozesses reduziert.

2.2 Technische Lösung

Zur Substitution der konventionellen Flüssigstickstofftechnik wurde eine Tiefkühlanlage auf Basis einer elektrisch betriebenen Luft-Kältemaschine entwickelt. Die Anlage ermöglicht die für die Restaustenitumwandlung erforderlichen Tiefkühltemperaturen bis −85 °C ohne Einsatz kryogener Betriebsmittel.

Die entwickelte Anlage besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

- Luft-Kältemaschine zur Erzeugung und Stabilisierung von Temperaturen bis −85 °C im Kammervolumen,
- hochisolierte Tiefkühlkammer zur Aufnahme der Werkstückchargen,
- Luftumwälzungssystem mit Ventilatoren und optimierter Strömungsführung zur Gewährleistung einer homogenen Temperaturverteilung,
- Steuerungs- und Bedienoberfläche zur Regelung der Prozessparameter, Ablaufsteuerung und Prozessüberwachung,
- Sicherheitseinrichtungen wie Temperaturüberwachung, Notabschaltungen und Zugangssicherungen.

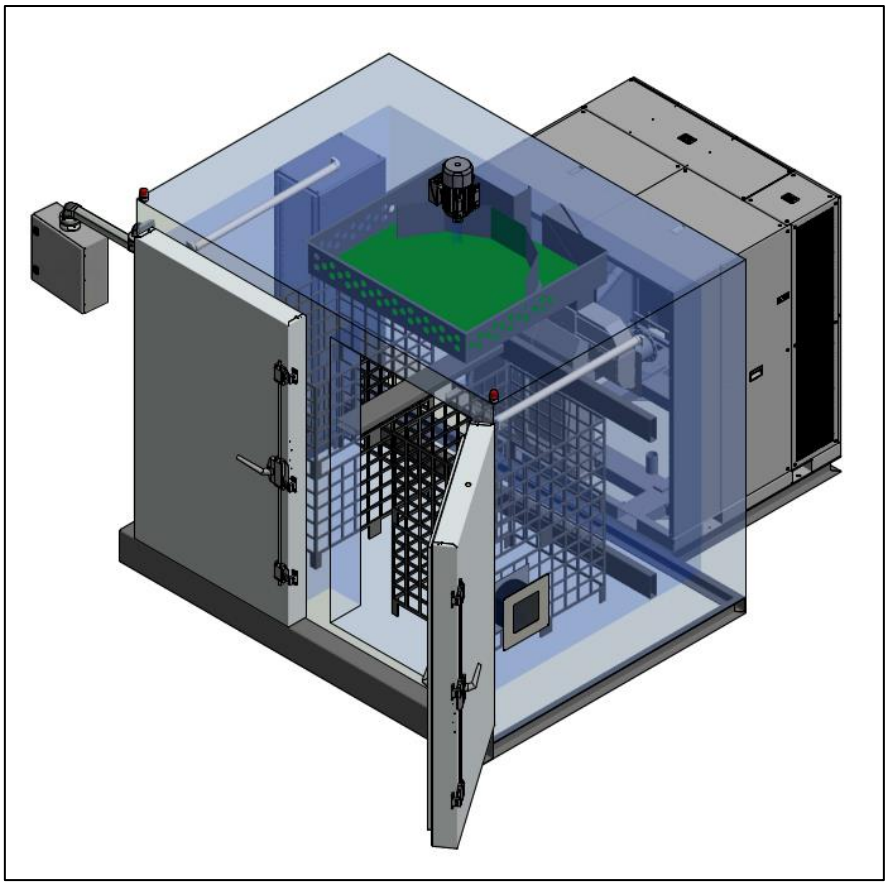


Abbildung 1: Tiefkühlkammer mit Luft-Kältemaschine

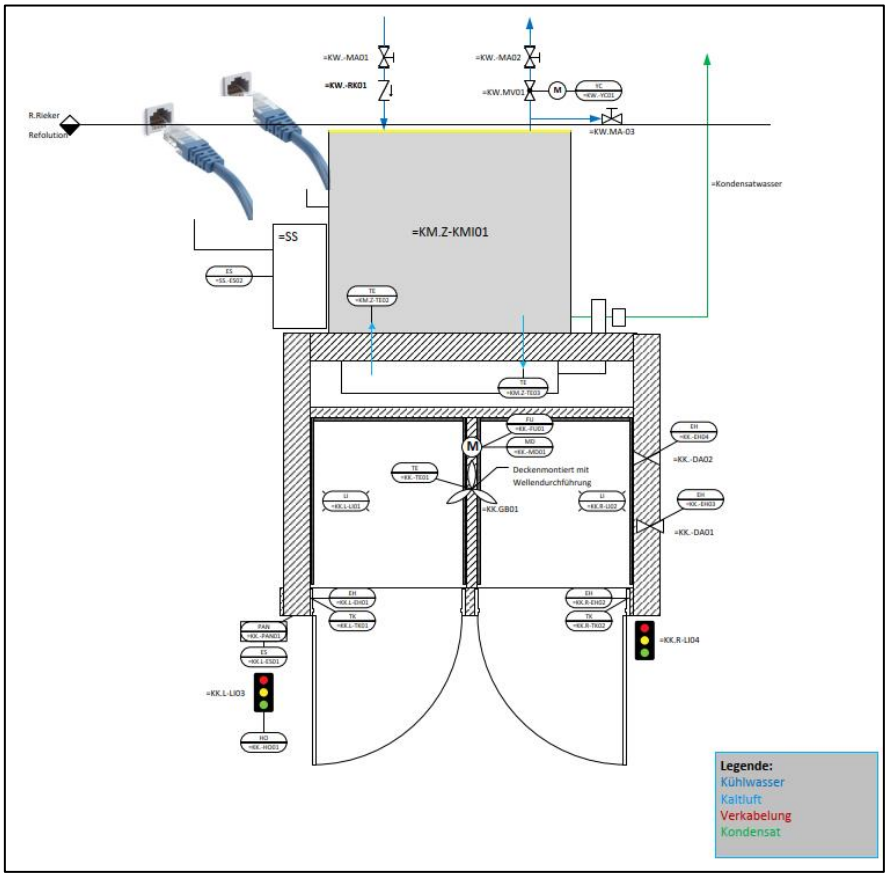


Abbildung 2: Technik Fließbild

Rekuperationskonzept

Ein wesentlicher innovativer Bestandteil der Anlage ist die integrierte Rekuperationsfunktion zur Nutzung der in einer bereits behandelten Charge gespeicherten Kälteenergie.

Hierzu wird vor der Entnahme der fertig behandelten Charge eine neue Charge in die Tiefkühlkammer eingebracht. Über das Luftumwälzungssystem erfolgt ein kontrollierter Kälteübergang von der bereits abgekühlten Charge auf die neu eingebrachte Charge. Dadurch wird der Energiebedarf des anschließenden Tiefkühlprozesses reduziert.

Die Rekuperation wird derzeit durch definierte Bedienerschritte unterstützt und über die Anlagensteuerung überwacht. Die Temperaturverläufe werden kontinuierlich erfasst und dokumentiert.

Sicherheits- und Wartungskonzept

Für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb wurden Temperaturüberwachungen, Notabschaltungen und Zugangssicherungen integriert. Ergänzend erfolgen regelmäßige Inspektionen der Kältekreisläufe, Ventilatoren und Isolationssysteme sowie Kalibrierungen der Temperaturmesstechnik. Die Bediener werden hinsichtlich Anlagenbetrieb, Rekuperationsablauf und Notfallmaßnahmen geschult.

2.3 Umsetzung des Vorhabens

Die nachfolgende Tabelle beschreibt den zeitlichen Ablauf des Projektes

Vorgang	Mai 23	Jun 23	Jul 23	Aug 23	Sep 23	Okt 23	Nov 23	Dez 23	Jan 24
Planungsphase									
Beschaffungsphase									
Ventilator Finalisierung									
Finalisieren der Kammer									
Anlieferungen									
Montage Zelle									
Montage Elektrik									
Inbetriebnahme 1. Kammer									
Inbetriebnahme 2. Kammer									
Abnahme									

Abbildung 3: Projektplan

2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Zur Errichtung der Anlage war keine behördliche Genehmigung erforderlich. Die Anlagen wurden sicherheitstechnisch abgenommen.

2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Zur Erfolgskontrolle des Vorhabens wurden kontinuierlich Betriebs- und Verbrauchsdaten der Tiefkühlanlage erfasst und ausgewertet. Im Mittelpunkt der Datenerhebung standen der elektrische Energieverbrauch der Anlage, die Produktionsmengen, die Chargenauslastung sowie die behandelten Werkstückgewichte.

Die Verbrauchsdaten wurden chargenbezogen erfasst. Hierzu wurde der elektrische Energiebedarf der Tiefkühlanlage für einzelne Produktionschargen aufgezeichnet und dokumentiert. Im Rahmen der Untersuchung wurden Referenzchargen ohne Nutzung der Rekuperationsfunktion und Chargen mit aktivierter Wärmerückgewinnung verglichen. Die Messungen erfolgten unter vergleichbaren Betriebsbedingungen und bei ähnlicher Anlagenbeladung.

Parallel zur Erfassung der Energieverbräuche wurden Produktionsdaten aufgenommen. Hierzu gehörten die Anzahl der durchgeführten Chargen, die Stückzahlen je Charge sowie die behandelten Gewichte. Die Datenerfassung erfolgte über den gesamten Betrachtungszeitraum im regulären Produktionsbetrieb.

Für die Auswertung wurden die erfassten Rohdaten zusammengeführt und hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Energieeinsatz und Produktionsleistung analysiert. Die Verbrauchswerte wurden den jeweiligen Chargen und Produktionsmengen zugeordnet. Auf dieser Grundlage konnten spezifische Energiekennzahlen in Bezug auf Stückzahl und Materialeinsatz ermittelt sowie die energetische Effizienz des Verfahrens bewertet werden.

Die aufbereiteten Betriebsdaten bilden die Grundlage für die in Kapitel 3 dargestellte Erfolgskontrolle, die Stoff- und Energiebilanz sowie die Bewertung der erreichten Energieeinsparungen.

3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung

Im laufenden Betrieb hat sich die Anlage als sicher, zuverlässig und anwenderfreundlich erwiesen. Geringfügige Störungen oder Beeinträchtigungen des Betriebs traten nach der Inbetriebnahme auf, die jedoch in kürzester Zeit in Zusammenarbeit mit unserem Projektpartner behoben werden konnten. Die benutzerfreundliche Steuerungsoberfläche mit Touchscreen ermöglicht eine intuitive Bedienung, sodass sich die Anwender schnell mit dem System vertraut machen können. Die Anlage ist daher für den täglichen Einsatz sehr gut geeignet und wird von den Mitarbeitern positiv angenommen.

Lediglich der Rekuperationsprozess erfordert einen erhöhten Schulungsaufwand, da dieser manuell durchgeführt wird. Für eine sichere und effiziente Durchführung ist eine gezielte Einweisung der Bediener erforderlich.

3.2 Stoff- und Energiebilanz

Ausgangssituation (Referenztechnologie)

Stand der Technik zur Tiefkühlbehandlung von Werkstücken für die Restaustenitumwandlung ist der Einsatz von Flüssigstickstoff (LN_2). Die erforderlichen Tiefkühltemperaturen werden dabei durch die Verdampfung von Flüssigstickstoff erzeugt.

Für eine typische Tiefkühlcharge mit einem Chargengewicht von 536 kg wurde ein Stickstoffverbrauch von ca. 210 kg LN_2 ermittelt. Bei 63 vergleichbaren Chargen (im Durchschnitt 156 Werkstücke/Charge) ergibt sich ein Gesamtverbrauch von 13.230 kg Flüssigstickstoff.

Innovationslösung

Im Rahmen des Vorhabens wurde gemeinsam mit dem Projektpartner Refolution eine Tiefkühlanlage auf Basis einer elektrisch betriebenen Luft-Kältemaschine entwickelt und in den Produktionsprozess integriert. Die Anlage erzeugt die erforderlichen Tiefkühltemperaturen ohne den Einsatz von Flüssigstickstoff und nutzt ausschließlich Umgebungsluft als Kältemedium.

Stoffbilanz

Der wesentliche stoffliche Unterschied zwischen Referenztechnologie und Innovationslösung besteht im vollständigen Verzicht auf Flüssigstickstoff.

Stoffstrom	Referenztechnologie (LN_2)	Innovationslösung
Flüssigstickstoff	13.230 kg*	0 kg*
Kältemedium	Flüssigstickstoff	Umgebungsluft

*Bedarf an Flüssigstickstoff unter der Annahme von 9984 zu tiefkühlenden Werkstücken in 63 Chargen im Betrachtungszeitraum 02.12.24 – 20.12.24.

Damit konnte der Einsatz des Betriebsmittels Flüssigstickstoff vollständig ersetzt werden.

Energiebilanz

Zur Erfolgskontrolle wurden im Zeitraum Februar bis Dezember 2025 kontinuierliche Energieverbrauchsmessungen durchgeführt.

Im diesem Berichtszeitraum wurden

- 178.827 Werkstücke mit
- 615.864 kg, aufgeteilt auf
- 1.149 Chargen

kältebehandelt. Hierfür wurden 71.007 kWh elektrische Energie für die Tiefkühlung aufgewendet.

Hieraus ergeben sich folgende Kennzahlen:

Kennzahl	Wert
Energieverbrauch gesamt	71.007 kWh/a
Energieverbrauch je Werkstück	0,397 kWh/Stk.
Energieverbrauch je kg Werkstück	0,115 kWh/kg

Die Anlage arbeitete über den gesamten Messzeitraum stabil. Der Energieverbrauch blieb über den Betrachtungszeitraum hinweg weitgehend konstant.

Wärmerückgewinnung

Zusätzlich wurde die Wirkung der integrierten Wärmerückgewinnung im Zeitraum vom 02.12.2024 bis 16.12.2024 untersucht.

Betriebszustand	Energieverbrauch je Charge bei 50% Beladung
Standardbetrieb	64–65 kWh
Mit Wärmerückgewinnung	58–59 kWh

Die gemessene durchschnittliche Energieeinsparung durch die Wärmerückgewinnung beträgt 9,27 %.

Referenz vs. Innovation - Vergleich

Für die Referenztechnologie wurde auf Basis des Flüssigstickstoffverbrauchs ein Stromäquivalent von 0,742 kWh je Werkstück ermittelt.

Kennzahl	Flüssigstickstofftechnik	Luft-Kältemaschine
Energieverbrauch je Werkstück	0,742 kWh/Stk.	0,397 kWh/Stk.
Energieverbrauch je kg Werkstück	0,216 kWh/kg	0,115 kWh/kg
Flüssigstickstoffverbrauch	13.230 kg	0 kg

Der spezifische Energieverbrauch konnte gegenüber der Referenztechnologie um 46,5 % reduziert werden.

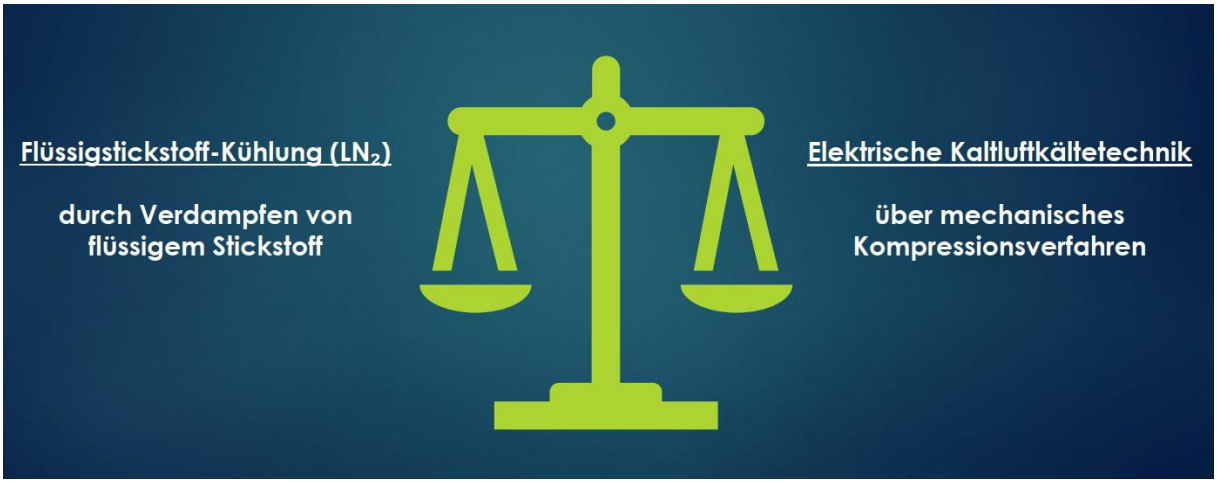


Abbildung 4: Vergleich Flüssigstickstoff-Kühlung zu elektrische Kaltluftkältetechnik

Vergleich mit dem Stand der Technik

Die Flüssigstickstofftechnik stellt den derzeit üblichen Stand der Technik für die Tiefkühlbehandlung von Werkstücken dar. Die entwickelte Luft-Kältemaschine erreicht die erforderlichen Behandlungstemperaturen ohne den Einsatz kryogener Betriebsmittel und weist gleichzeitig einen deutlich geringeren spezifischen Energieverbrauch auf.

Vergleich mit den Projektzielen

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer energieeffizienten Alternative zur Flüssigstickstofftechnik. Die betrieblichen Messungen bestätigen die erfolgreiche Umsetzung dieses Ziels. Die Flüssigstickstofftechnik konnte vollständig substituiert und der spezifische Energieverbrauch um 46,5 % reduziert werden. Darüber hinaus konnte durch die Wärmerückgewinnung bei einer Beladung von 50 % eine zusätzliche Verbrauchsreduzierung von 9,27 % erzielt werden. Bei einer Beladung von 100 % ist aufgrund der höheren Wärmerückgewinnung sowie der geringeren Transmissionsverluste von einer noch größeren Verbrauchsreduzierung auszugehen.

3.3.Umweltbilanz

Umweltentlastung und Beitrag zum Ressourcen- und Klimaschutz

Auf Grundlage der in Kapitel 3.2 dargestellten Stoff- und Energiebilanzen ergibt sich eine deutliche Umweltentlastung gegenüber der Flüssigstickstofftechnik.

Beitrag zum Ressourcenschutz

Durch die Einführung der Luft-Kältemaschine konnte der Einsatz von Flüssigstickstoff vollständig vermieden werden. Im Vergleich zur Referenztechnologie entfällt damit der Bedarf von 13.230 kg Flüssigstickstoff für die betrachtete Produktionsmenge vom 02.12.-20.12.24.

Die Umweltentlastung ergibt sich insbesondere aus:

- dem vollständigen Verzicht auf Flüssigstickstoff als Betriebsmittel,
- dem Wegfall der energieintensiven Luftzerlegung zur Stickstoffgewinnung,
- dem Wegfall der Verflüssigung des Stickstoffs bei -196 °C,
- dem Wegfall von Transport-, Lager- und Verdampfungsverlusten,
- der Nutzung von Umgebungsluft als natürlichem und unbegrenzt verfügbarem Kältemedium,
- der Verringerung der Abhängigkeit von externen Lieferketten.

Beitrag zum Klimaschutz

Durch die Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs von 0,742 kWh je Werkstück auf 0,397 kWh je Werkstück konnte eine Energieeinsparung von 46,5 % erreicht werden.

Für die im Berichtsjahr 2025 behandelten 178.827 Werkstücke ergibt sich daraus eine absolute Energieeinsparung von rund 65.977 kWh pro Jahr. Die Umweltziele des Vorhabens wurden damit erreicht.

Kennzahl	Wert
Energieeinsparung pro Werkstück	0,345 kWh/Stk.
Energieeinsparung pro kg Werkstück	0,101 kWh/kg
Energieeinsparung gesamt	61.695 kWh/a
Relative Energieeinsparung	46,5 %

Zusätzlich entfallen die energiebedingten Vorkettenaufwendungen für Transport und Lagerung des Flüssigstickstoffs.

3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Wirtschaftliche Bewertung der Innovation

Neben den positiven Umweltwirkungen führt die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Tiefkühlanlage auf Basis einer elektrisch betriebenen Luft-Kältemaschine auch zu wirtschaftlichen Vorteilen gegenüber der konventionellen Flüssigstickstofftechnik.

Während bei der Referenztechnologie kontinuierlich Kosten für die Beschaffung, den Transport und die Lagerung von Flüssigstickstoff anfallen, erfolgt die Kälteerzeugung bei der Innovationslösung ausschließlich durch elektrische Energie. Dadurch entfallen die laufenden Kosten für den Bezug des Betriebsmittels Flüssigstickstoff vollständig.

Die im Projekt ermittelten Betriebskosten zeigen deutliche wirtschaftliche Vorteile:

Kennzahl	Flüssigstickstofftechnik	Luft-Kältemaschine
Betriebskosten je Charge	ca. 84 €	ca. 14,50 – 17,00 €
Energieträger	Flüssigstickstoff	Elektrische Energie
Externe Medienversorgung	erforderlich	nicht erforderlich

Die Betriebskosten der Tiefkühlbehandlung konnten somit erheblich reduziert werden. Gleichzeitig erhöht die Eigenversorgung mit Kälte die Unabhängigkeit von Preisentwicklungen und Lieferengpässen bei Flüssigstickstoff.

Einfluss der Wärmerückgewinnung

Zusätzlich wurde eine Wärmerückgewinnung in die Anlage integriert. Die durchgeführten Messungen zeigen eine durchschnittliche Reduzierung des Energieverbrauchs von 9,27 % bei einer Beladung von 50% gegenüber dem Standardbetrieb. Bei einer Beladung von 100 % ist aufgrund der höheren Wärmerückgewinnung sowie der geringeren Transmissionsverluste von einer noch größeren Verbrauchsreduzierung auszugehen. Dadurch werden die laufenden Betriebskosten weiter gesenkt.

Betriebserfahrungen und Anlagenverfügbarkeit

Die Anlage wurde im Zeitraum der Erfolgskontrolle unter Produktionsbedingungen betrieben. Während des gesamten Beobachtungszeitraums traten lediglich geringfügige Störungen auf. Technische Gesamtausfälle wurden nicht festgestellt.

Die hohe Anlagenverfügbarkeit führte zu einer zuverlässigen Integration in den Produktionsablauf und minimierte ungeplante Stillstandzeiten.

Wirtschaftliche Zielerreichung

Ziel des Vorhabens war neben der Verbesserung der Energieeffizienz die Entwicklung einer wirtschaftlich tragfähigen Alternative zur Flüssigstickstofftechnik.

Die im Betrieb ermittelten Energieverbräuche bestätigen die erwarteten Einsparungen. Durch den Wegfall des Flüssigstickstoffbezugs, die geringeren Betriebskosten sowie die zusätzliche Energieeinsparung durch die Wärmerückgewinnung konnten die wirtschaftlichen Zielsetzungen erreicht werden.

Die Investition hat sich entsprechend den ursprünglichen Wirtschaftlichkeitsberechnungen amortisiert. Die Anlage erfüllt die Erwartungen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Betriebssicherheit und Prozessintegration.

3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Ausgangssituation und Stand der Technik

Zur Tiefkühlbehandlung von Werkstücken im Rahmen der Restaustenitumwandlung wird im industriellen Umfeld üblicherweise Flüssigstickstoff (LN_2) eingesetzt. Die erforderlichen Tiefkühltemperaturen werden dabei durch die Verdampfung von Flüssigstickstoff erzeugt. Dieses Verfahren stellt derzeit den etablierten Stand der Technik dar.

Die Flüssigstickstofftechnik zeichnet sich durch die Erreichung sehr niedriger Temperaturen aus, erfordert jedoch eine kontinuierliche Versorgung mit kryogenem Stickstoff, entsprechende Lagertechnik sowie besondere Sicherheitsmaßnahmen beim Umgang mit dem Medium.

Innovative Technologie

Im Rahmen des Vorhabens wurde gemeinsam mit dem Projektpartner Refolution eine neuartige Tiefkühlkammer entwickelt, die die erforderlichen Behandlungstemperaturen ohne

Flüssigstickstoff erzeugt. Die Kältebereitstellung erfolgt ausschließlich durch eine elektrisch betriebene Luft-Kältemaschine auf Basis eines mechanischen Kompressionsprozesses.

Der innovative Charakter des Projekts besteht insbesondere in der erstmaligen Übertragung dieser Kältetechnologie auf die industrielle Tiefkühlbehandlung von gehärteten Stahlwerkstücken zur Restaustenitumwandlung. Dabei wurde die Kältetechnik speziell an die Anforderungen des Wärmebehandlungsprozesses angepasst und in den Produktionsablauf integriert.

Technischer Vergleich

Kriterium	Flüssigstickstofftechnik	Luft-Kältemaschine
Kälteerzeugung	Verdampfung von Flüssigstickstoff	Mechanische Kälteerzeugung
Kältemedium	Flüssigstickstoff	Umgebungsluft
Externe Medienversorgung	erforderlich	nicht erforderlich
Lagerung kryogener Medien	erforderlich	nicht erforderlich
Prozessintegration	begrenzt durch Stickstoffversorgung	direkte Integration in den Produktionsprozess
Betriebssicherheit	Umgang mit kryogenen Medien erforderlich	Betrieb ohne kryogene Stoffe
Energieversorgung	indirekt über Stickstoffbereitstellung	direkte elektrische Versorgung
Wärmerückgewinnung	üblicherweise nicht möglich	integriert und nutzbar
Automatisierungspotenzial	begrenzt	hoch

Leistungsfähigkeit des Verfahrens

Die betrieblichen Erfahrungen zeigen, dass die entwickelte Luft-Kältemaschine die für die Restaustenitumwandlung erforderlichen Prozessbedingungen zuverlässig bereitstellt. Die behandelten Werkstücke erfüllen die geforderten metallurgischen Eigenschaften und Qualitätsanforderungen.

Damit konnte nachgewiesen werden, dass die innovative Technik den Anforderungen ebenso gerecht wird wie die konventionelle Flüssigstickstofftechnik und gleichzeitig eine deutlich einfachere Prozessintegration ermöglicht.

Technische Vorteile der Innovation

Gegenüber der konventionellen Flüssigstickstofftechnik ergeben sich folgende technische Vorteile:

- vollständiger Verzicht auf kryogene Betriebsmittel,
- keine externe Stickstoffversorgung erforderlich,
- keine Lager- und Verdampfungseinrichtungen notwendig,
- höhere Unabhängigkeit von Lieferketten und Versorgungsengpässen,
- einfache Integration in bestehende Produktionsabläufe,
- Möglichkeit der Wärmerückgewinnung,
- hoher Automatisierungsgrad,
- hohe Anlagenverfügbarkeit und geringer Wartungsaufwand,
- stabile und reproduzierbare Prozessführung.

4. Übertragbarkeit

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Tiefkühlanlage wurde erfolgreich in den Produktionsprozess der R. Rieker GmbH integriert und unter realen Produktionsbedingungen betrieben. Die Praxiserfahrungen zeigen, dass die Anlage die Anforderungen hinsichtlich Prozesssicherheit, Energieeffizienz und Produktqualität vollständig erfüllt.

Während des gesamten Beobachtungszeitraums traten nahezu keine technischen Störungen auf. Totalausfälle oder nennenswerte Stillstände wurden nicht festgestellt. Die hohe Anlagenverfügbarkeit ermöglichte einen zuverlässigen und stabilen Betrieb über den gesamten Messzeitraum.

Die durchgeführten Messungen bestätigten die prognostizierten Energieeinsparungen sowie die zuverlässige Erreichung der für die Restaustenitumwandlung erforderlichen Tiefkühltemperaturen. Die Anlage konnte problemlos in den bestehenden Produktionsablauf integriert werden und zeigte eine konstante Leistungsfähigkeit auch bei unterschiedlichen Auslastungen.

Als Erkenntnis aus dem Praxiseinsatz hat sich gezeigt, dass die Bedienung der Anlage einen entsprechenden Schulungsstand des Bedienpersonals voraussetzt. Darüber hinaus bestehen Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Anlagenauslegung für unterschiedliche Produktionsanforderungen. Insbesondere eine noch stärkere Anpassung der Kammergröße an die jeweiligen Chargenmengen sowie weitere Verbesserungen der thermischen Isolierung können zukünftig zusätzliche Effizienzpotenziale erschließen.

Insgesamt sind die Erfahrungen aus der Praxiseinführung als sehr positiv zu bewerten. Die Anlage erfüllt die Erwartungen hinsichtlich Energieverbrauch, Betriebssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Prozessintegration.

4.2 Modellcharakter und Übertragbarkeit

Das Vorhaben besitzt einen hohen Modellcharakter, da erstmals gezeigt werden konnte, dass die für die Restaustenitumwandlung erforderlichen Tiefkühltemperaturen bis −85 °C mittels einer elektrisch betriebenen Luft-Kältemaschine zuverlässig und wirtschaftlich erzeugt werden können. Die bislang übliche Flüssigstickstofftechnik kann damit technisch gleichwertig ersetzt werden.

Die entwickelte Anlage ist modular aufgebaut und kann an unterschiedliche betriebliche Anforderungen angepasst werden. Dadurch ist eine Übertragung auf zahlreiche weitere Anwendungen der industriellen Wärmebehandlung möglich.

Für die Übertragung auf andere Unternehmen sind im Wesentlichen Anpassungen an die jeweiligen Chargengrößen, Produktionsmengen, Durchsatzraten und innerbetrieblichen Logistikabläufe erforderlich. Das technische Grundkonzept bleibt dabei unverändert.

Förderlich für die weitere Verbreitung der Technologie wirken insbesondere:

- steigende Energie- und Betriebsmittelkosten,
- zunehmende Anforderungen an Energieeffizienz und Klimaschutz,
- die Unabhängigkeit von Flüssigstickstofflieferungen,
- die hohe Betriebssicherheit der Anlage,
- der geringe Wartungsaufwand sowie
- die einfache Integration in bestehende Produktionsprozesse.

Hemmende Faktoren können insbesondere sein:

- Investitionskosten für die Umstellung bestehender Anlagen,
- betriebliche Anpassungen während der Implementierungsphase,
- Schulungsaufwand für Bedien- und Wartungspersonal,
- eine teilweise noch geringe Bekanntheit der Technologie im Markt.

Aus heutiger Sicht ist die Übertragbarkeit auf einen großen Teil der Wärmebehandlungsbranche in Deutschland und Europa gegeben. Insbesondere Unternehmen, die derzeit Flüssigstickstoff für Tiefkühlprozesse einsetzen, stellen ein erhebliches Anwendungspotenzial dar. Aufgrund des modularen Anlagenkonzeptes kann die Technologie sowohl in kleineren Lohnhärtereien als auch in größeren industriellen Produktionsbetrieben eingesetzt werden.

Die entwickelte Anlage besitzt damit den Charakter einer Referenzanlage und kann als Modell für zukünftige Anwendungen energieeffizienter Tiefkühltechnik in der industriellen Wärmebehandlung dienen.

4.3 Kommunikation der Projektergebnisse

Die im Rahmen des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse wurden sowohl innerhalb des Unternehmens als auch gegenüber externen Fachkreisen kommuniziert. Ziel war es, die technische Machbarkeit und die Vorteile der neu entwickelten Tiefkühltechnologie auf Basis einer Luft-Kältemaschine bekannt zu machen und den Demonstrationscharakter des Vorhabens hervorzuheben.

Im Rahmen der Projektumsetzung wurden die Projektergebnisse fortlaufend dokumentiert und im Zuge der Berichterstattung gegenüber dem Fördermittelgeber dargestellt. Darüber hinaus wurde die Anlage als Demonstrationsobjekt genutzt, um die praktische Umsetzbarkeit einer energieeffizienten Alternative zur Flüssigstickstofftechnik aufzuzeigen.

Besondere Aufmerksamkeit erhielt das Vorhaben durch die Bewilligung von Fördergeldern des Umweltinnovationsprogramms. Die damit verbundene öffentliche Wahrnehmung trug zur Bekanntmachung des Projekts und der entwickelten Technologie bei.

- Auf dem Härtereikongress HK 2024, der vom 08.10. bis 10.10.2024 stattfand, präsentierte unser Partner, die Refolution Industriekälte GmbH, erfolgreich die Tiefkühltechnologie auf Basis einer Luft-Kältemaschine und stellte deren Potenzial für industrielle Anwendungen vor.

- Vom 1. bis 5. Dezember 2025 fand in Deutschland eine Studienreise zum Thema „Energieeffizienz und Klimaschutz in kälteintensiven Sektoren“ statt. Teilnehmer waren Vertreter des ASEAN-Sekretariats, des ASEAN-Energiezentrums, wichtiger nationaler Behörden aus dem Energie- und Industriesektor sowie Wirtschaftsverbände aus den ASEAN-Mitgliedstaaten. Die Reise wurde von der GIZ im Rahmen des Projekts „ASEAN Cooling“ mit Mitteln des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) organisiert. Der Besuch am 04.12.25 bei der Rieker GmbH diente der Besichtigung unserer innovativen und ausgezeichneten Kaltlufttechnologie in Kombination mit R290-Chillern sowie der Gewinnung von Einblicken in unsere Fertigungs- und Verarbeitungsprozesse.



Abbildung 5: Study Visit 04.12.25 bei Rieker - Energy Efficiency and Climate Mitigation in Cooling-Intensive Sectors

5. Zusammenfassung / Summary

5.1 Zusammenfassung (Deutsch)

Einleitung

Die Rudolf Rieker GmbH mit Sitz in Leingarten bei Heilbronn zählt zu den größten Induktionshärtereien Europas und bietet ein breites Spektrum induktiver Wärmebehandlungsverfahren an. Im Rahmen der Wärmebehandlung von Stählen entsteht insbesondere bei hochlegierten Werkstoffen wie 100Cr6 Restaustenit, der zur Erreichung der geforderten Werkstoffeigenschaften durch eine nachgelagerte Tiefkühlbehandlung reduziert werden muss.

Der Stand der Technik basiert hierfür auf dem Einsatz von Flüssigstickstoff. Die Bereitstellung, Verflüssigung, Lagerung und der Transport von Flüssigstickstoff sind jedoch mit einem hohen Energieaufwand verbunden. Ziel des Vorhabens war daher die Entwicklung einer energieeffizienten und ressourcenschonenden Alternative zur konventionellen Flüssigstickstofftechnik.

Vorhabenumsetzung

Gemeinsam mit dem Projektpartner Refolution wurde eine innovative Tiefkühlanlage auf Basis einer elektrisch betriebenen Luft-Kältemaschine entwickelt und in den Produktionsprozess integriert. Die Anlage erzeugt die für die Restaustenitumwandlung erforderlichen Tiefkühltemperaturen bis −85 °C ohne den Einsatz von Flüssigstickstoff oder halogenierten Kältemitteln.

Hierzu wurde eine speziell für industrielle Anwendungen ausgelegte Tiefkühlkammer entwickelt. Zusätzlich wurde eine Wärmerückgewinnung implementiert. Dabei wird die Kälte einer bereits behandelten Charge auf eine neu eingebrachte Charge übertragen, wodurch der Energiebedarf des Prozesses weiter reduziert wird.

Ergebnisse

Die Anlage wurde im Zeitraum Februar bis Dezember 2025 unter Produktionsbedingungen betrieben. Insgesamt wurden 178.827 Werkstücke mit einem Gesamt-Bruttogewicht von 615.864 kg behandelt.

Der gemessene Energieverbrauch betrug 71.007 kWh. Daraus ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch von 0,397 kWh pro Werkstück beziehungsweise 0,115 kWh pro Kilogramm behandelten Materials.

Im Vergleich zur konventionellen Flüssigstickstofftechnik konnte der spezifische Energieverbrauch um 46,5 % reduziert werden. Zusätzlich wurde durch die integrierte Wärmerückgewinnung eine weitere Energieeinsparung von durchschnittlich 9,27 % bei einer Beladung von 50% gegenüber dem Standardbetrieb erzielt. Bei einer Beladung von 100 % ist aufgrund der höheren Wärmerückgewinnung sowie der geringeren Transmissionsverluste von einer noch größeren Verbrauchsreduzierung auszugehen.

Durch die neue Technologie konnte der Einsatz von Flüssigstickstoff vollständig ersetzt werden. Damit entfallen die energieintensive Stickstofferzeugung, die Verflüssigung bei −196 °C, Transportaufwendungen sowie Lagerverluste.

Auch wirtschaftlich erwies sich das Verfahren als erfolgreich. Die Betriebskosten der Tiefkühlbehandlung konnten gegenüber der Flüssigstickstofftechnik deutlich reduziert werden. Gleichzeitig zeigte die Anlage eine hohe Verfügbarkeit und einen störungsarmen Betrieb. Die Investition hat sich entsprechend den ursprünglichen Berechnungen amortisiert.

Ausblick

Die Praxiserfahrungen bestätigen die technische Eignung der Luft-Kältemaschine für industrielle Tiefkühlprozesse.

Aufgrund des modularen Anlagenkonzeptes besteht eine hohe Übertragbarkeit auf weitere Wärmebehandlungsbetriebe sowie industrielle Fertigungsunternehmen mit Anforderungen an reproduzierbare Tiefkühlprozesse bis −85 °C. Anpassungen sind insbesondere hinsichtlich Chargengröße, Durchsatz und betrieblicher Logistik erforderlich.

Die Projektergebnisse zeigen, dass die entwickelte Technologie das Potenzial besitzt, die bisher übliche Flüssigstickstofftechnik in zahlreichen Anwendungsbereichen der industriellen Wärmebehandlung zu ersetzen und dadurch einen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz und Ressourcenschonung zu leisten.

5.2. Summary (English)

Introduction

Rudolf Rieker GmbH, located in Leingarten near Heilbronn, is one of the largest induction hardening companies in Europe and provides a wide range of induction heat treatment services. During the hardening of alloyed steels such as 100Cr6, retained austenite is formed and must be reduced by deep cryogenic treatment to achieve the required material properties.

The conventional state-of-the-art process uses liquid nitrogen (LN_2). However, production, liquefaction, storage and transportation of liquid nitrogen require significant amounts of energy. The objective of the project was therefore to develop an energy-efficient and environmentally friendly alternative to conventional liquid nitrogen-based cryogenic treatment.

Project Implementation

Together with the project partner Refolution, an innovative deep-freezing system based on an electrically driven air refrigeration machine was developed and integrated into the production process. The system achieves temperatures down to −85 °C without the use of liquid nitrogen or halogenated refrigerants.

A specially designed industrial freezing chamber was developed for this purpose. In addition, a heat recovery concept was implemented. Before unloading a treated batch, a new batch is inserted and cooled using the residual cold energy from the previous batch, thereby reducing overall energy consumption.

Project Results

The system was operated under real production conditions from February to December 2025. During this period, 178,827 components with a total weight of 615,864 kg were processed.

The measured electricity consumption amounted to 71,007 kWh, corresponding to a specific energy consumption of 0.397 kWh per component and 0.115 kWh per kilogram of treated material.

Compared with conventional liquid nitrogen technology, the specific energy consumption was reduced by 46.5 %. In addition, the integrated heat recovery system achieved an average energy savings of 9.27% at 50% load compared to standard operation. At 100% load, an even greater reduction in energy consumption is expected due to the higher heat recovery rate and lower transmission losses.

The new technology completely eliminates the need for liquid nitrogen. As a result, energy-intensive nitrogen production, liquefaction, transportation and storage losses are avoided.

The project also proved economically successful. Operating costs were significantly reduced compared with liquid nitrogen-based treatment, while the system demonstrated high availability and reliable operation. The investment achieved the expected payback.

Prospects

The practical operating experience confirms the technical suitability of the air refrigeration technology for industrial cryogenic treatment processes.

Due to its modular design, the technology can be transferred to other heat treatment companies and manufacturing industries requiring reproducible cryogenic treatment processes down to −85 °C. Adaptations may be required regarding batch size, throughput and plant logistics.

The project demonstrates that air-based refrigeration technology has the potential to replace conventional liquid nitrogen systems in many industrial heat treatment applications, thereby contributing to improved energy efficiency and resource conservation.

6. Anhang

- Anlage 1 zum Abschlussbericht Juli - Dezember 2024 – Berechnung Stickstoffverbrauch
- Anlage 2 zum Abschlussbericht Juli-Dezember 2024
- Anlage 3 zum Abschlussbericht Februar-Dezember 2025