

Technologiesouveränität innovative Energietechnologien

Photovoltaik, Windkraft, Energiespeicher, Wärmepumpen und
Elektrolyseure

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 83/2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren:

DI (FH) Christina Krenn, Dr. Johannes Fresner (Stenum Unternehmensberatung und
Forschungsgesellschaft für Umweltfragen mbH)

Wien, Graz, 2025

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
iii3@bmimi.gv.at.

Disclaimer:

Dieser Ergebnisbericht wurde von der Fördernehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die Fördernehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die Fördernehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die Fördernehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG	8
2	EINLEITUNG	11
2.1	Aufgabenstellung	11
2.2	Leistungsumfang	11
2.3	Definition von „Technologiesouveränität“	12
2.4	Aspekte von Technologiesouveränität	12
2.5	Technologiesouveränität in der europäischen Strategie	14
2.5.1	Strategien in Europa	14
2.5.2	The future of European competitiveness	14
2.5.3	CBAM, CSDDD, Taxonomieverordnung	15
2.5.4	Net Zero Industry Act	16
2.5.5	European solar charta	16
2.5.6	Österreichische Photovoltaikstrategie	17
2.5.7	Zusammenfassende Analyse der europäischen Rahmenbedingungen und Zielvorgaben.....	18
2.6	Zielvorgaben für erneuerbare Energietechnologien in Österreich	18
2.6.1	Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan	18
2.6.2	Ziele in der österreichischen Photovoltaikstrategie.....	19
2.6.3	Erneuerbare Energien Ausbau Gesetz – Solarbonus	19
2.6.4	Wasserstoffstrategie für Österreich.....	20
2.7	Wirtschaftliche Relevanz von Technologiesouveränität	20
2.8	Arbeitsmarkteffekte.....	21
2.9	Inhaltliche Abgrenzung dieser Studie	23
2.10	Übersicht der betrachteten Aspekte der ausgewählten Technologien	26
3	TECHNOLOGIEN UND WERTSCHÖPFUNGSKETTEN	27
3.1	Einleitung.....	27
3.2	Photovoltaik	27
3.2.1	Wertschöpfungskette Photovoltaik.....	27
3.2.2	End of life - Kreislaufwirtschaftsoptionen	39
3.2.3	Zukünftige Technologien	40
3.2.4	Stakeholder in Österreich.....	41
3.2.5	Chancen und Risiken für potentielle österreichische Hersteller	45
3.3	Windkraft.....	49
3.3.1	Wertschöpfungskette Windkraft.....	49
3.3.2	End of life - Kreislaufwirtschaftsoptionen	59
3.3.3	Zukünftige Technologien	59
3.3.4	Stakeholder im Bereich Windkraft	60
3.3.5	Chancen und Risiken für potentielle österreichische Hersteller	61
3.4	Energiespeicher.....	65
3.4.1	Wertschöpfungskette Energiespeicher	65
3.4.2	End of life – Kreislaufwirtschaftsoptionen	75
3.4.3	Zukünftige Technologien	76
3.4.4	Stakeholder im Bereich Energiespeicher.....	76
3.4.5	Chancen und Risiken für potentielle österreichische Hersteller	77
3.5	Elektrolyseure	81
3.5.1	Wertschöpfungskette Elektrolyse	81

3.5.2	End of life – Kreislaufwirtschaftsoptionen	87
3.5.3	Zukünftige Technologien	88
3.5.4	Stakeholder im Bereich Elektrolyse	89
3.5.5	Chancen und Risiken für potentielle österreichische Hersteller	92
3.6	Wärmepumpen.....	96
3.6.1	Wertschöpfungskette Wärmepumpen.....	96
3.6.2	End of life – Kreislaufwirtschaftsoptionen	105
3.6.3	Zukünftige Technologien	105
3.6.4	Stakeholder im Bereich Wärmepumpen	107
3.6.5	Chancen und Risiken für potentielle österreichische Hersteller	110
4	ANSÄTZE ZUR STRATEGIEENTWICKLUNG.....	114
4.1	Übergreifende Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	114
4.2	Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	124
4.2.1	Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Photovoltaik	124
4.2.2	Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Energiespeicher	126
4.2.3	Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Elektrolyseure.....	128
4.2.4	Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Wärmepumpen	129
4.2.5	Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Windkraft.....	129
4.2.6	Technologiespezifisch Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Kreislaufwirtschaft.....	130
5	OFFENE FRAGEN.....	132
6	LITERATUR.....	133

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ziel, Aktionsfelder und Maßnahmen für den Photovoltaik Ausbau in Österreich bis 2040	19
Abbildung 2: Bruttoinlandsverbrauch nach Energieträgern in Österreich in Petajoule [PJ] von 2005 bis 2022	24
Abbildung 3: Grafische Darstellung der in dieser Studie betrachteten Aspekte.....	26
Abbildung 4: Kostenstruktur von PV-Modulen nach Prozessen.....	37
Abbildung 5: Kostenstruktur von PV-Anlagen	38
Abbildung 6: Potenziale für Materialeffizienz	41
Abbildung 7: Photovoltaik Akteure in Österreich.....	42
Abbildung 8: Aufschlüsselung der Kapitalkosten bestehender Windenergieanlagen in Prozent.....	58
Abbildung 9: Systemkosten von Lithiumionenbatterien.....	73
Abbildung 10: Kostenstruktur von Komponenten von Li-Ionen Batterien.....	74
Abbildung 11: Kosten von Komponenten.....	86
Abbildung 12: Zusammensetzung der Kosten von Wärmepumpen	102
Abbildung 13: Zusammensetzung der Kosten von Komponenten von Wärmepumpen.....	103

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Marktpotentiale erneuerbarer Energietechnologien bis 2050 in Deutschland und Österreich	21
Tabelle 2: Arbeitsmarkteffekt von erneuerbaren Energietechnologien	22
Tabelle 3: Volkswirtschaftliche Auswirkungen durch Wertschöpfung in Österreich.....	23
Tabelle 4: Abgrenzung dieser Studie	25
Tabelle 5: Komponenten einer PV-Anlage	28
Tabelle 6: Materialien Photovoltaik	29
Tabelle 7: Komponenten von PV-Anlagen und österreichische Hersteller	34
Tabelle 8: Hauptkomponenten von PV-Anlagen und potentielle österreichische Hersteller	35
Tabelle 9: Forschungsinstitutionen zu Photovoltaik in Österreich.....	43
Tabelle 10: SWOT Analyse Photovoltaikanlagen.....	46
Tabelle 11: Materialien Windkraftanlagen [überprüfen]	50
Tabelle 12: Komponenten von Windkraftanlagen und österreichische Hersteller.....	52
Tabelle 13: Komponenten von Windkraftanlagen und potentielle österreichische Hersteller	57
Tabelle 14: SWOT Analyse Windkraftanlagen	62
Tabelle 15: Materialien und Prozesse Energiespeicher.....	67
Tabelle 16: Komponenten von Energiespeichern und österreichische Hersteller.....	69
Tabelle 17: Komponenten von Batteriespeichern und potentielle österreichische Hersteller	72
Tabelle 18: SWOT Analyse Energiespeicher	78
Tabelle 19: Materialien und Prozesse Elektrolyseanlagen.....	81
Tabelle 20: Komponenten von Elektrolyseuren und österreichische Hersteller.....	83
Tabelle 21: Komponenten von Elektrolyseuren und potentielle österreichische Hersteller	85
Tabelle 22: SWOT Analyse Elektrolyseure.....	93
Tabelle 23: Materialien und Prozesse Wärmepumpen.....	97
Tabelle 24: Komponenten von Wärmepumpen und österreichische Hersteller	98
Tabelle 25: SWOT Analyse Wärmepumpen	111
Tabelle 26: SWOT Analyse für die Herstellung von erneuerbaren Energietechnologien in Österreich.....	114
Tabelle 27: Aktionsfelder Technologiesouveränität.....	123
Tabelle 28: Wertströme erneuerbarer Energietechnologien.....	130

Glossar

\$	US-Dollar
€ct	Eurocent
a	Jahr
AIT	Austrian Institute of Technology
AWS	Austria Wirtschaftsservice
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMAW	Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BOS	Balance of System
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCS	Carbon capture and storage
CdTe	Cadmiumtellurid
CF	Carbon Footprint
CKF	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CO _{2e}	CO ₂ -Äquivalent
CSDDD	Corporate Sustainability Due Diligence Directive
DACH	Deutschland-Österreich-Schweiz
EAG	Erneuerbare-Ausbaugesetz
EGG	Erneuerbares Gas Gesetz
ESG	Environmental Social Governance
EU	Europäische Union
EUR	Euro
EVA	Ethylvinylacetat
F&E	Forschung und Entwicklung
FFG	Forschungsförderungsgesellschaft
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GW	GigaWatt
HTE	Hochtemperatur-Elektrolyseure
IEA	Internationale Energie Agentur
IRA	Inflation Reduction Act
IRENA	Internationalen Agentur für Erneuerbare Energien
KI	Künstliche Intelligenz
kWh	Kilowattstunde
KWp	Kilowatt Peak
LFP	Lithium-Ferrophosphat
LIB	Lithium-Ionen-Batteriespeicher
MWp	Megawatt Peak
NMC	Nickel-Mangan-Cobalt
NZIA	Net-Zero Industry Act
ÖPUL	Österreichische Agrarumweltprogramm
PEM	Protonenaustauschmembran Elektrolyseure
PJ	Petajoule
PV	Photovoltaik
RFB	Redox-Flow-Batterie
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SMR	Small modular reactor
SOEC	Solid oxide electrolyzer cell
SWOT	Strength, Weaknesses, Opportunities, Threats
t	Tonne

TWh	Terrawattstunde
USD	US-Dollar
UST	Umsatzsteuer

1 Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat sich die Diskussion um erneuerbare Energien in Österreich intensiviert. Diese Studie untersucht, welche Technologien zur Bereitstellung erneuerbarer Energien österreichische Unternehmen künftig selbst herstellen können. Um dies zu beantworten, wird die Produktionslandschaft in Österreich detailliert analysiert. Dabei werden die Stärken und Schwächen der aktuellen Situation beschrieben sowie gezielte Maßnahmen zur Unterstützung und Koordination entwickelt. Zentrale Forschungsfragen sind, welche neuen Technologien die besten Erfolgchancen bieten und wie die Produktionseffizienz gesteigert werden kann.

Die Untersuchung macht deutlich, dass Österreich seine Wettbewerbsfähigkeit im Bereich erneuerbarer Energietechnologien auf lange Sicht verbessern kann, indem es auf Spezialisierung, strategische Partnerschaften, Zusammenarbeit, die Förderung von Fachkräften und gezielte Investitionen setzt. Eine Schlüsselrolle spielen dabei nachhaltige und widerstandsfähige Wertschöpfungsketten. Internationale Netzwerke bieten Unternehmen Zugang zu Wissen, Technologien und Märkten und fördern die Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Durch die Integration in europäische und globale Netzwerke können österreichische Unternehmen ihre Innovationskraft stärken und ihre Marktposition festigen. Netzwerke ermöglichen schnellen Zugang zu neuen Technologien und unterstützen Forschung und Entwicklung. Beispiele wie AVL und Andritz zeigen, wie Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette technologische Fortschritte und industrielle Stärke fördern. Zusammenarbeit mit internationalen Akteuren und europäischen Herstellern zur Stärkung der Wertschöpfungskette tragen zur Versorgungssicherheit bei, reduzieren Abhängigkeiten von asiatischen Lieferketten und minimieren Risiken.

Die steigende Nachfrage nach Fachkräften in den Bereichen erneuerbare Energien und Recycling erfordert Investitionen in Aus- und Weiterbildungsprogramme. Kooperationen mit Hochschulen wie der TU Wien können Talente fördern und innovative Technologien entwickeln.

Österreich ist nicht wettbewerbsfähig bei Standardprodukten wie PV-Modulen, da diese auf Skaleneffekte und kostengünstige Massenproduktion angewiesen sind. Österreichische Unternehmen sollten spezialisierte Produkte für Nischenmärkte entwickeln, um sich durch Innovation und Qualität vom Wettbewerb abzuheben. Österreichische Unternehmen haben sich auf Hochleistungsmodule, Carports, fassadenintegrierte Anlagen und bifaziale Module spezialisiert. Unternehmen wie Kioto und Fronius entwickeln hochwertige Module, fortschrittliche Wechselrichter sowie Speichersysteme. Österreichische Firmen bieten maßgeschneiderte PV-Lösungen für Haushalte, Gewerbe und Landwirtschaft und können von der steigenden Nachfrage nach dezentraler Energieerzeugung profitieren. Potentiell relevante Nischen sind Ausbau von gebäudeintegrierten PV-Systemen, Carports, Agri-Photovoltaik und Solaranlagen entlang von Autobahnen und Bahnstrecken, Energiemanagementsysteme, Smart-Home kompatible Lösungen, Entwicklung von Sensoren, Regeltechnik und smarten PV-Systemen.

Investitionen in Automatisierung und Digitalisierung können Produktionskosten senken und Effizienz steigern. Big Data und KI verbessern Produktivität und fördern datenbasierte Entscheidungen.

Die Produktion von Silizium-Wafern erfolgt heute fast ausschließlich in Asien. Eine europäische Fertigung ist nötig, aber nur durch internationale Kooperationen wie mit Siltronic erfolgversprechend. Installations-, Planungs- und Vertriebskosten machen in Österreich bis zu 50% der Gesamtkosten aus, was regionale Wertschöpfung bedeutet, aber den Endpreis für Verbraucher erhöht.

Investitionen in Forschung und Entwicklung sollten aufgrund strategischer Schwerpunktsetzungen erfolgen. Gezielte Subventionen und Investitionen in die Fertigungskapazitäten für spezialisierte PV-Komponenten mit Skalierungspotential könnten Österreichs Wettbewerbsfähigkeit stärken.

Europa ist führend bei Batteriespeicherlösungen für erneuerbare Energien. Österreichische Unternehmen wie Kreisel Electric spezialisieren sich auf Nischen wie marine Anwendungen und Off-highway-Lösungen. Die Nachfrage nach Ladeinfrastrukturen steigt durch Elektromobilität.

Innovative Speichertechnologien mit Entwicklungspotential sind Feststoffbatterien, NaCl-Batterien, Redox-Flow- und Sauerstoff-Ionen-Batterien vor allem für stationäre Anwendungen. Die Schaffung rechtlicher Grundlagen und die Förderung dezentraler Speicherlösungen (bidirektionales Laden, PV-Integration) können einen Heimmarkt für österreichische Lösungen aufbereiten.

Österreichische Unternehmen (z. B. AVL, Andritz) entwickeln fortschrittliche Lösungen zur Herstellung von grünem Wasserstoff. Die Nutzung bestehender Erdgasinfrastruktur für Wasserstoffspeicherung stellt ein zukünftiges Potential für österreichische Aktivitäten dar. Der Aufbau industrieller Fertigung, Förderung von Partnerschaften und Technologietransfer und Materialinnovationen für leistungsfähigere und günstigere Elektrolyseure sind weitere Ansatzpunkte.

Zur Weiterentwicklung von Wärmepumpen ergeben sich Handlungsfelder zur Steigerung Effizienz und Flexibilität in Hochtemperatur-Wärmepumpen für ältere Gebäude, durch KI-gestützte Steuerung und Smart-Home-Integration, intelligente Netzintegration und durch optimierte Komponentenfertigung (Kompressoren, Bodensonden, elektronische Komponenten).

Zur Verstärkung der technologischen Kompetenz in Windkraft bietet sich die Förderung dezentraler kleiner Anlagen, insbesondere für ländliche Gebiete. Weiters besteht Bedarf an innovativen Lösungen für Rotoren und Direktantriebe, Sensorik und Software und Paketlösungen zum Re-Powering bestehender Anlagen.

Der wachsende Bedarf an Rohstoffen durch saubere Technologien wie Photovoltaik und Batteriespeicher erfordert verstärkte Recyclinganstrengungen, um die Rohstoffversorgung sicherzustellen und Umweltbelastungen zu minimieren. Die Kreislaufwirtschaft bietet relevante Potenziale zur Stärkung der nachhaltigen Rohstoffversorgung und Wettbewerbsfähigkeit. Zielgerichtete Investitionen in innovative Recyclingtechnologien, Kooperationen und Skaleneffekte sind entscheidend, um globale Marktchancen zu nutzen und ökologische Ziele zu erreichen. Recycling wird strategisch wichtig für die Rückgewinnung wertvoller Materialien (z. B. Lithium, Nickel, Kobalt, Silber, Silizium) und die Schaffung geschlossener Materialkreisläufe.

Eine lokale Produktion kritischer Rohstoffe und Komponenten wie seltene Erden reduziert Importabhängigkeiten. Recyclingtechnologien wie Wechsel von Pyrometallurgie zu Hydrometallurgie unter Einhaltung von ESG-Standards sollten gefördert werden, um eine nachhaltige Wertschöpfungskette zu schaffen. Ein Ansatz ist der Aufbau von Anlagen zur Wiederverwendung von Silizium und anderen Komponenten. Dies ist langfristig für Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit relevant.

Dazu sind wahrscheinlich spezialisierte Wertschöpfungsketten mit dezentraler Vorbehandlung (Speichen) und zentralisierter Hauptbehandlung (Hubs) aufzubauen. Große Mengen an Photovoltaikmodulen erwartet man ab 2040 (nach dem Installationsboom von 2020). Größere Mengen an Wechselrichtern werden früher anfallen.

Querschnittsthemen zum Setzen von Impulsen zur Technologieentwicklung sind:

- Ausbau der öffentlichen Infrastruktur durch Ladeparks und die Erzeugung und Speicherung von grünem Wasserstoff.
- Initiierung eines längerfristigen Innovationsprogramm durch die Schwerpunktsetzung in Zusammenarbeit mit Unternehmen und Experten zur Identifikation und Förderung von Schlüsseltechnologien, Zielformulierung, Monitoring und Controlling
- Fokus auf wissensintensive, materialeffiziente Technologien.

- Kooperationen mit großen Unternehmen und Investoren zum Aufbau international wettbewerbsfähiger Strukturen.
- Entwicklung globaler Partnerschaften, um Wissenstransfer und Marktchancen zu nutzen.
- Investitionen in Forschung und Entwicklung (Recyclingprozesse, ausgewählte Batterietechnologien, Anwendung von KI zur Optimierung der Herstellprozesse, Sensorik und Regeltechnik).
- Förderung von Standards und Regelungen, die Kreislaufwirtschaft erleichtern (Abfallbehandlung, bidirektionales Laden).
- Förderung von Startups und Automatisierungsprojekten durch Risikokapital.

Generell sollten Unternehmen, die in erneuerbaren Technologien tätig sind, mindestens 3 % ihres Umsatzes in Forschung und Entwicklung investieren. Dies sollte zu entsprechenden steuerlichen Entlastungen führen. Ein klar definierter Innovationsprozess, unterstützt durch Open-Innovation-Ansätze, Anwendung von künstlicher Intelligenz und Kooperationen mit Forschungseinrichtungen, stärkt die Wettbewerbsfähigkeit. Kooperationen mit Universitäten und Forschungsinstitutionen wie der Montanuniversität Leoben, TU Wien, TU Graz oder AIT können Grundlagenforschung und technologische Entwicklung stärken. Förderung von Start-ups und KMUs durch Risikokapital und Netzwerke kann die Entwicklung bahnbrechend neuer Technologien vorantreiben. Förderprogramme und politische Unterstützung durch Institutionen wie FFG und KPC ermöglichen die Finanzierung von Forschung, Pilotprojekten und Technologien wie Wasserstoffherzeugung und Recycling.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Österreich über die notwendigen Ressourcen und Technologien verfügt, um in der Herstellung von erneuerbaren Energien eine Vorreiterrolle einzunehmen. Durch gezielte Maßnahmen und Kooperationen können die Unternehmen die Herausforderungen meistern und die Chancen der Zukunft nutzen. Die nächsten Schritte müssen sorgfältig langfristig geplant und koordiniert umgesetzt werden, um eine nachhaltige und erfolgreiche Produktion von erneuerbaren Energien zu gewährleisten.

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie plant eine nationale Technologiestrategie für Energie- und Umwelttechnologien zu entwickeln und hat hierfür externe Unterstützung angefragt.

Es geht dabei primär um zwei Fragen, die in weitere Folge miteinander verschränkt werden sollen:

- Welche Technologie-Komponenten werden in Zukunft auf den globalen Märkten oder ausgewählten Exportmärkten auf Basis der österreichischen und internationalen Klima- und Energieziele sowie der ggf. abweichenden Zielen und zu ihrer möglichst selbstbestimmten Umsetzung benötigt?
- Wie sieht die aktuelle Produktionslandschaft in Österreich diesbezüglich aus?

Daraus soll folgende Fragestellung adressiert werden:

- Welche Komponenten könnten österreichische Unternehmen auf den zukünftigen globalen Märkten bereitstellen?
- Was braucht es hier an Unterstützung, Koordination und Wissen?

2.2 Leistungsumfang

Um die einleitend beschriebenen Fragestellungen zu bearbeiten, wurde im Rahmen dieser explorativen Studie folgendermaßen vorgegangen:

Schritt 1: Auswahl von Technologien und Produkten für die Studie. Als Vorschlag und Basis der weiteren Planung werden zunächst Photovoltaik, Windturbinen, Elektrolyseure, Energiespeicher, Wärmepumpen angenommen.

- Schritt 2: Quick & Dirty Datenanalyse von vorhandenen und frei zugänglichen Daten zu den in Schritt 1 ausgewählten Technologien.
- Nutzen von Datenbanken, Fachartikeln, Berichten, um Informationen zu Technologiekomponenten, Produktionsverfahren und relevanten Betrieben zu erhalten.
- Zusammenführen der verfügbaren Daten zu aktuellen Technologietrends, Marktprognosen, zur Erreichung der österreichischen Klima- und Energieziele.
- Identifikation von Trends, Stärken, Schwächen, Herausforderungen und Chancen

Schritt 3: Konzept für einen Prozess, der zu einer Technologiestrategie führt:

- Definition von Zielen und Meilensteinen für den Prozess.
- Berücksichtigen der österreichischen Klima- und Energieziele sowie die globalen Marktanforderungen aus Schritt 2
- Detaillierte Darstellung der relevanten Technologien, Komponenten, Wertschöpfungsketten aus Schritt 2
- Abgleich mit relevanten potentiellen nationalen Anbietern und Zulieferern
- Durchführen von Interviews und Fokusgruppen mit Branchenexperten, Unternehmensführern und anderen Stakeholdern, um Einblicke und Feedback zu erhalten.

- Organisieren von Workshops mit relevanten Interessengruppen, um Daten zu sammeln, Perspektiven zu teilen und Lösungen zu entwickeln.
- Durchführen von weiteren Literaturrecherchen, um Lücken in den vorhandenen Daten zu füllen und zusätzliche Einblicke zu gewinnen.
- Erstellung einer Roadmap zum gezielten Aufbau von Anbietern und Zulieferern als Basis der Bildung von Kompetenz zum Anbieten relevanter Technologie zur Umsetzung der Klimastrategie
- Integrieren von Feedbackschleifen, um den Prozess iterativ anzupassen und zu verbessern.

Durch diese Schritte wird eine fundierte Technologiestrategie entwickelt, die die Bedürfnisse und Ziele Österreichs berücksichtigt und österreichischen Unternehmen hilft, sich auf den globalen Märkten zu positionieren.

2.3 Definition von „Technologiesouveränität“

Technologiesouveränität bezeichnet die Fähigkeit eines Staates, kritische Technologien unabhängig zu entwickeln und zu kontrollieren. Demokratie beruht auf der Selbstbestimmung der Bevölkerung, die Entscheidungen über ihr Leben trifft. Abhängigkeiten von externen Akteuren in der technologischen Entwicklung können diese Selbstbestimmung einschränken.

Laut EU-Kommissionspräsidentin Ursula von der Leyen beschreibt Technologiesouveränität die Fähigkeit, über die Europa verfügen muss, um im Einklang mit den eigenen Werten und Regeln eigene Entscheidungen treffen zu können¹.

Fraunhofer² definiert Technologiesouveränität in einer Studie als die Fähigkeit eines Staates, die Technologien, die er für sich als wesentlich für die staatliche Handlungsfähigkeit definiert, selbst ohne einseitige strukturelle Abhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen zur Verfügung zu haben.

Technologiesouveränität bedeutet also keinesfalls umfassende technologische Autarkie, welche die internationale Arbeitsteilung oder die Globalisierung in Frage stellt und anstrebt, jegliche als kritisch eingestufte Technologie selbst vorzuhalten. Sie bezeichnet den Aufbau und Erhalt eigener Fähigkeiten und die Vermeidung einseitiger Abhängigkeiten. Technologiesouveränität ist damit eine notwendige, aber keinesfalls hinreichende Bedingung für die selbstbestimmte Erstellung und Diffusion von kritischen Innovationen und damit für selbstbestimmtes wirtschaftliches Handeln.

2.4 Aspekte von Technologiesouveränität

Im Kontext der erneuerbaren Energieversorgung gewinnt Technologiesouveränität an Bedeutung, da die Kontrolle über technologische Ressourcen und Prozesse entscheidend für eine nachhaltige und unabhängige Energiezukunft ist.

Technologiesouveränität umfasst:

- Souveränität bei der Entwicklung und Produktion von Technologien zur Energieerzeugung wie Solarzellen, Windturbinen, Wasserkraftanlagen und Biomassekraftwerken ist entscheidend. Die Fähigkeit, diese Technologien lokal zu entwickeln und herzustellen, verringert die Abhängigkeit von Importen und externen Anbietern.

¹ EU-Kommission, 2020 https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ac_20_260 abgerufen am 30. Dezember 2024

² Fraunhofer ISI, Technologiesouveränität: Von der Forderung zum Konzept, 2020

- Die Kontrolle über Technologien zur Energiespeicherung, insbesondere Batterien, Pumpspeicherkraftwerke und innovative Speicherlösungen wie Wasserstoff, ist zentral, um eine stabile und kontinuierliche Energieversorgung sicherzustellen.
- Die Entwicklung und Implementierung von intelligenten Stromnetzen erfordert fortschrittliche IT- und Kommunikationstechnologien. Souveränität in diesem Bereich ermöglicht es, die Integration erneuerbarer Energien in das bestehende Stromnetz effizient und sicher zu gestalten.
- Die Förderung von dezentralen Energieversorgungssystemen, wie Mikronetzen, die lokal betrieben und gewartet werden können, stärkt die Resilienz und Unabhängigkeit von externen Energieversorgungsnetzen.

Zentrale Aspekte sind die Identifikation von Ansatzpunkten und die Beschreibung von wirtschaftlichen Potentialen für österreichische Unternehmen.

Grundlagen zur Erreichung der Technologiesouveränität werden geschaffen durch:

- Systematische Analyse der einzelnen Technologien samt ihrer Produktions- und Subsysteme sowie Identifikation von Potentialfeldern in diesen Systemen und Mapping mit Fähigkeiten der Österreichischen Unternehmenslandschaft, auch "branchenfremder" Betriebe.
- Investitionen in F&E, um technologische Fortschritte in erneuerbaren Energien zu erzielen. Dies umfasst die Verbesserung der Effizienz von Solar- und Windenergie, die Entwicklung neuer Materialien und die Optimierung von Speicherlösungen.
- Lokale Technologieförderung an nationalen Forschungsinstituten und Universitäten im Bereich erneuerbare Energien kann dazu beitragen, technologische Souveränität zu stärken und internationale Abhängigkeiten zu verringern.
- Viele erneuerbare Energietechnologien benötigen seltene Erden und andere kritische Rohstoffe, deren Abbau und Verarbeitung oft von wenigen Ländern dominiert wird. Die Sicherstellung des Zugangs zu diesen Materialien sowie die Entwicklung von Recycling- und Ersatzmaterialien sind entscheidend.
- Aufbau und Kontrolle über nachhaltige, transparente, resiliente Wertschöpfungsketten nach den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft³ für die Produktion und Wartung von erneuerbaren Energietechnologien sind wichtig, um die Abhängigkeit von unsicheren oder ethisch problematischen Lieferanten zu minimieren.
- Die Digitalisierung der Energiewirtschaft führt zu einer zunehmenden Menge an Daten, die für die Steuerung und Optimierung der Energieerzeugung und -verteilung genutzt werden. Die Souveränität über diese Daten ist entscheidend, um sie vor unbefugtem Zugriff zu schützen und sicherzustellen, dass sie den nationalen Interessen dienen.
- Der Schutz der Energieinfrastruktur vor Cyberangriffen ist eine zentrale Herausforderung. Souveränität in der Entwicklung und Implementierung von Cybersicherheitslösungen für die Energiewirtschaft ist entscheidend, um die nationale Sicherheit zu gewährleisten.

Entsprechende politische Maßnahmen sind:

³ Kreislaufwirtschaft, kann man sie als einen fortlaufenden Kreislauf von Ressourcen betrachten, ähnlich wie in der Natur. In der Natur wird nichts verschwendet – abgefallene Blätter werden zu Nährstoffen für neue Pflanzen, und Wasser zirkuliert durch Verdunstung und Regen in einem beständigen Zyklus. Die Kreislaufwirtschaft strebt an, dieses natürliche Modell nachzuahmen, indem sie versucht, folgende Prinzipien umzusetzen:

- Vermeidung von Abfall durch Design und Innovation
- Maximierung der Wiederverwendung, Reparatur, Renovierung und Recycling von Produkten und Materialien

- Ein wichtiger Aspekt der Technologiesouveränität ist die Fähigkeit die, nationale Energiepolitik autonom zu gestalten, um die Transformation zu einer nachhaltigen Energieversorgung zu steuern., ist ein wichtiger Aspekt der Technologiesouveränität. Dies schließt die Festlegung von Standards, Subventionen und Anreizen zur Förderung erneuerbarer Energien ein.
- Ein stabiles, förderndes rechtliches Rahmenwerk mit reduzierter Bürokratie ermöglicht Planungssicherheit und die Formulierung von Business Cases.
- Eine diversifizierte Handelsstrategie, die Abhängigkeiten von wenigen Lieferanten oder Ländern reduziert, ist entscheidend, um die Versorgungssicherheit und die Stabilität der erneuerbaren Energieversorgung zu gewährleisten.
- Die aktive Teilnahme an europäischen Netzwerken, die Gestaltung internationaler Normen und Standards für erneuerbare Energien kann helfen, die eigenen technologischen Interessen zu schützen und zu fördern.
- Internationale Zusammenarbeit in Forschung, Entwicklung und Handel, um technologische Fortschritte zu teilen und globale Herausforderungen wie den Klimawandel zu bewältigen.

Technologiesouveränität im Bereich der erneuerbaren Energien ist entscheidend, um eine unabhängige, nachhaltige und sichere Energiezukunft zu gewährleisten. Sie erfordert eine strategische Kombination aus technologischer Unabhängigkeit, regulatorischer Kontrolle und internationaler Zusammenarbeit.⁴

2.5 Technologiesouveränität in der europäischen Strategie

2.5.1 Strategien in Europa

In den letzten Jahren wurden Strategien auf EU und nationalstaatlicher Ebene definiert, um in Europa Anreize die zur Energiewende benötigten Technologien zu entwickeln, herzustellen und marktfähig zu verkaufen. Das beinhaltet

- Anreize für die Forschung und für die Ausbildung
- Die (Weiter-)Entwicklung von Schlüsseltechnologien
- Strategische Partnerschaften
- Rechtliche Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden diese Strategien beschrieben und ihre Auswirkungen auf potentielle österreichische Hersteller diskutiert.

2.5.2 The future of European competitiveness

Der von Mario Draghi erstellte Bericht zur europäischen Technologiesouveränität wurde 2022 veröffentlicht. Er befasst sich mit der wirtschaftlichen Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit Europas im globalen Technologiewettbewerb. Technologiesouveränität wird dabei als die Fähigkeit definiert, über entscheidende Technologien unabhängig zu verfügen und diese mitzugestalten, besonders in strategisch wichtigen Sektoren. Der Bericht warnt vor Europas Abhängigkeit von Drittstaaten wie den USA und China in Bereichen wie Halbleiter, Künstliche Intelligenz, Cloud-Infrastrukturen und Batterietechnologien. Diese Abhängigkeit birgt Risiken für die wirtschaftliche und sicherheitspolitische Stabilität Europas.

⁴ Winkler, J., 2020 Finanzierungsmechanismus für erneuerbare Energien, 2020

Zu den Schlüsseltechnologien, in denen Europa Technologiesouveränität anstreben muss, gehören:

- Halbleiter: Europa ist stark auf Importe aus Asien angewiesen, was seine technologische Unabhängigkeit gefährdet.
- Künstliche Intelligenz: Die USA und China dominieren, weshalb Europa mehr in Künstliche Intelligenz (KI)-Innovationen investieren muss.
- Grüne Technologien: Europa ist zwar führend bei erneuerbaren Energien und Elektromobilität, muss jedoch seine Position langfristig sichern.

Der Bericht fordert verstärkte Investitionen in Forschung und Entwicklung (F&E), die Förderung europäischer Industrie-Champions sowie den Ausbau der digitalen Infrastruktur, um die Wettbewerbsfähigkeit Europas zu stärken. Europa gibt im Vergleich zu den USA und China zu wenig für technologische Forschung aus und muss Innovationscluster und die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie fördern.

Die Studie plädiert nicht für eine Isolation Europas, sondern für strategische Partnerschaften mit gleichgesinnten Staaten und eine Diversifizierung der Lieferketten, insbesondere in den Bereichen Rohstoffe und Halbleiter. Politische Rahmenbedingungen wie die Vereinheitlichung europäischer Märkte und öffentliche Investitionen in Schlüsseltechnologien sind entscheidend.

Ein weiterer Schwerpunkt ist der Aufbau einer unabhängigen digitalen Infrastruktur, um die Abhängigkeit von außereuropäischen Cloud-Anbietern zu reduzieren und Datensouveränität sowie Cybersicherheit zu gewährleisten. Der Bericht schlägt vor, ein europäisches digitales Ökosystem zu schaffen.

Die Draghi-Studie fordert eine strategische Technologiepolitik, die langfristige Unabhängigkeit und technologische Führungsposition Europas sichert. Dazu gehören erhebliche Investitionen, stärkere Zusammenarbeit der EU-Mitgliedstaaten und die Förderung von europäischen Industrie-Champions.

2.5.3 CBAM, CSDDD, Taxonomieverordnung

Der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), die Corporate Sustainability Due Diligence Directive (CSDDD) und die Taxonomie-Verordnung sind entscheidend für die Technologiesouveränität Europas im Bereich der erneuerbaren Energien. Sie schaffen einen klaren Rahmen zur Förderung nachhaltigen Wirtschaftens sowie zur Stärkung der Innovationsfähigkeit Europas.

Der CBAM gewährleistet, dass in der EU produzierte erneuerbare Technologien im Wettbewerb mit importierten Produkten bestehen können. Durch die Bepreisung von CO₂-Emissionen aus Nicht-EU-Ländern wird ein unfairer Kostenvorteil aus Regionen mit geringeren Umweltstandards vermieden. Dies schützt europäische Hersteller und fördert Investitionen in grüne Technologien.

Die CSDDD-Richtlinie verpflichtet Unternehmen zur Transparenz hinsichtlich ethischer und umweltgerechter Produktionsprozesse entlang der Lieferkette. Dies ist besonders relevant für Komponenten erneuerbarer Energien. Hohe Standards in der Wertschöpfungskette fördern nachhaltige Technologien und minimieren die Abhängigkeit von problematischen Lieferketten.

CSDDD verpflichtet europäische Unternehmen, die sozialen und ökologischen Auswirkungen ihrer Lieferketten zu berücksichtigen. Dies fördert die Beschaffung von Rohstoffen unter fairen Bedingungen und hilft, ethisch fragwürdige Lieferketten zu vermeiden.

Die Taxonomie-Verordnung legt klare Kriterien für Investitionen in nachhaltige Technologien fest, wodurch es einfacher wird, Kapital für erneuerbare Energien zu mobilisieren. Dies unterstützt die Entwicklung heimischer Innovationskapazitäten und reduziert die Abhängigkeit von Importen.

Insgesamt fördern diese Regelungen einen fairen Wettbewerb und die Entwicklung eines starken Technologiestandorts in Europa. Durch den Schutz des Wettbewerbs, ethische Verantwortung und nachhaltige Lieferketten kann die EU ihre Rolle als führende Kraft im Bereich erneuerbare Energien und technologische Innovation ausbauen.

2.5.4 Net Zero Industry Act

Der European Net-Zero Industry Act (NZIA) wurde 2023 als Teil des Green Deal Industrial Plans eingeführt. Ziel ist es, Europas Technologiesouveränität in grünen Technologien und strategischen Industrien zu stärken und Europa als globalen Technologieführer zu etablieren, insbesondere in Bereichen, die zur Klimaneutralität und wirtschaftlichen Unabhängigkeit beitragen.

Der NZIA zielt darauf ab, Europas Industriesouveränität und technologische Unabhängigkeit im Bereich der grünen Technologien zu stärken. Er konzentriert sich auf Schlüsseltechnologien wie Solarenergie, Windkraft, Batterietechnologien, grünen Wasserstoff, CO₂-Abscheidung und -Speicherung sowie energieeffiziente Gebäudetechnologien. Durch den Ausbau der Produktionskapazitäten soll Europa bis 2030 mindestens 40% seines Bedarfs an strategischen Technologien im Inland decken.

Um dieses Ziel zu erreichen, fördert der NZIA Investitionen in europäische Produktionsanlagen, finanziert durch öffentliche und private Mittel, und erleichtert den Zugang zu Kapital, unter anderem durch den European Sovereignty Fund. Zudem werden staatliche Beihilfen flexibler gestaltet, um Investitionen in strategische Industrien zu erleichtern und neue High-Tech-Unternehmen anzuziehen.

Ein weiteres Ziel des NZIA ist die Reduktion der Abhängigkeit Europas von außereuropäischen Märkten, insbesondere von China, durch die Diversifizierung von Lieferketten und die Wiederverwertung kritischer Rohstoffe wie Lithium, Nickel und Kobalt. Dazu sollen Genehmigungsverfahren für Produktionsstätten beschleunigt und Projekte zur Erreichung der Netto-Null-Emissionen priorisiert werden.

Bildung und Qualifizierung sind ebenfalls Schwerpunkte des NZIA. Es werden Programme zur Förderung von MINT-Fächern und spezialisierte Ausbildungen für die grüne Technologieindustrie unterstützt, um sicherzustellen, dass Europa über die nötigen Fachkräfte verfügt. Zusätzlich sollen verstärkte Investitionen in Forschung und Entwicklung in Bereichen wie Batterien, Wasserstoff und nachhaltige Energien vorangetrieben werden.

Trotz der starken Betonung der europäischen Autarkie fördert der NZIA auch internationale Zusammenarbeit mit gleichgesinnten Staaten, um Zugang zu Technologien und Rohstoffen sicherzustellen.

Die Entwicklung einer widerstandsfähigen Solarindustrie ist ein wichtiges Beispiel für die Umsetzung dieser Strategie. Initiativen wie die European Solar PV Industry Alliance unterstützen den Ausbau einer europäischen Wertschöpfungskette für Solartechnologien. Trotz erheblicher Investitionen und neuer Projekte in der EU bleiben jedoch Herausforderungen bestehen, insbesondere der Preisdruck durch chinesische Hersteller und die Konkurrenz durch Förderprogramme wie den US-amerikanischen Inflation Reduction Act (IRA), der Unternehmen zur Verlagerung ihrer Produktionsstandorte in die USA veranlasst, wie z. B. jüngst Meyer Burger.

Beobachtung: Die Europäische Solar-Allianz bietet Chancen für Kooperation und Integration.

2.5.5 European solar charta

Die im April 2024 vorgestellte Europäische Solarcharta ist eine wichtige Initiative, um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Solarindustrie zu stärken. Die von der Europäischen Kommission

und Vertretern aus 23 EU-Ländern unterzeichnete Charta umfasst freiwillige Maßnahmen zur Förderung der lokalen Photovoltaik-Produktion.

Die Charta konzentriert sich auf mehrere Schlüsselpunkte:⁵

1. Sie fördert die Schaffung eines Marktes für Solarprodukte „Made in Europe“ und betont Nachhaltigkeit und Widerstandsfähigkeit im Einklang mit den Energie- und Klimazielen der EU.
2. Die Europäische Kommission will die Genehmigungen für Solarprojekte straffen und den Zugang zu EU-Mitteln für Solarproduktionsanlagen verbessern, um Innovationen in Bereichen wie Agro-Photovoltaik und fahrzeugintegrierte Photovoltaik zu fördern.
3. Die Charta umreißt die Notwendigkeit von Nachhaltigkeit und Innovation in der Solarproduktion und führt nicht-preisliche Kriterien bei der öffentlichen Auftragsvergabe und bei Auktionen für erneuerbare Energien ein, um Qualitäts- und Umweltstandards zu gewährleisten.

2.5.6 Österreichische Photovoltaikstrategie

Ein zentrales Anliegen ist der Ausbau der PV-Produktion in Österreich, wobei Unternehmen in der Elektro- und Elektronikbranche, Halbleiterindustrie sowie im Bereich Digitalisierung und Handwerk große Chancen haben, sich im PV-Markt zu positionieren. Dies wird laut dem Papier zur Schaffung von vielen neuen Arbeitsplätzen führen.

Nach Schätzung des Verbandes Photovoltaik Austria waren in Österreich 2021 zwischen 3.000 und 4.000 Menschen in der Photovoltaik-Branche beschäftigt. Bis 2030 könnten bis zu 60.000 neue Arbeitsplätze entstehen.⁶

Österreichische Unternehmen sind heute schon Technologieführer in einigen Bereichen der PV-Wertschöpfungskette und exportieren ihre Produkte weltweit.

Österreich beteiligt sich aktiv an europäischen Initiativen zur Stärkung der PV-Industrie, wie der EU Solar PV Industry Alliance und der Solar-Charta. Ein „Made in Europe-Bonus“, der Förderungen für PV-Projekte mit europäisch hergestellten Komponenten erhöht, soll die Abhängigkeit von Drittstaaten verringern und die europäische Energiesouveränität stärken. Diese Maßnahmen tragen zur Wettbewerbsfähigkeit der österreichischen und europäischen PV-Industrie bei.

Die Strategie fördert auch die Ausbildung und Qualifizierung von Fachkräften im Bereich Photovoltaik, um den notwendigen Personalbedarf für den Ausbau zu decken. Durch gezielte Bildungsinitiativen, wie die „Just Transition“-Ausbildungsinitiative, werden insbesondere Berufe in den Bereichen Elektrotechnik und Dachdeckerhandwerk unterstützt.

Forschung und Innovation spielen ebenfalls eine zentrale Rolle, insbesondere im Bereich der Effizienzsteigerung von PV-Anlagen, neuen Technologien und der Kreislaufwirtschaft. Österreich ist stark in der internationalen PV-Forschung verankert und beteiligt sich an Programmen der Internationalen Energieagentur (IEA) und EU-Initiativen. Ziel ist es, neue Lösungen zu entwickeln und die heimische PV-Industrie auf dem internationalen Markt wettbewerbsfähig zu machen.

Die PV-Strategie zielt darauf ab, durch den Ausbau der heimischen Produktion, verstärkte Forschung und die Einbindung der Bevölkerung Österreich auf den Weg zur Klimaneutralität zu führen und gleichzeitig die europäische Energiesouveränität zu stärken.

⁵ <https://www.pv-magazine.de/2024/04/16/eu-verabschiedet-solarcharta-photovoltaik-industrie-fordert-schnelles-handeln/>

⁶ Ortner, M., Grüne Jobs durch Photovoltaik-Forschung, Wiener Zeitung, 26. 4. 2021

2.5.7 Zusammenfassende Analyse der europäischen Rahmenbedingungen und Zielvorgaben

Die in diesem Kapitel beschriebenen europäischen Strategien und rechtlichen Rahmenbedingungen beschreiben den Bedarf nach einer gemeinsamen europäischen Vorgehensweise zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft im Bereich erneuerbarer Energietechnologien. Das beinhaltet folgende Schwerpunkte:

- Betonung der Notwendigkeit von Innovation
- Betonung der Wichtigkeit von Ausbildung
- Schutz europäischer Hersteller durch Gesetzgebung, Ausgleichzahlungen und Zölle
- Förderung von Produktionskapazität durch staatliche Förderungen und Beihilfen
- Ansprache von Abhängigkeiten bezüglich Rohstoffe, Chips, Wafern und Batteriezellen
- Entbürokratisierung

2.6 Zielvorgaben für erneuerbare Energietechnologien in Österreich

2.6.1 Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan

Der „Integrierte Nationale Energie- und Klimaplan für Österreich“ enthält zahlreiche Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2040 und zur Reduzierung von Emissionen. Im Verkehrsbereich werden Infrastrukturprojekte wie der ÖBB-Rahmenplan, Regionalbahnen und Förderungen für E-Mobilität sowie Güterverkehr auf Schiene hervorgehoben.

Im Gebäudebereich liegt der Fokus auf dem Ausstieg aus fossilen Brennstoffen und der Förderung von Fernwärme und thermischer Sanierung. Industrieprojekte beinhalten Förderungen zur Transformation und Emissionshandelssysteme. Landwirtschaftliche Maßnahmen umfassen das österreichische Agrarumweltprogramm (ÖPUL) und Investitionen in emissionsreduzierende Technologien.

Ein weiteres Ziel ist die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energie auf mindestens 57% bis 2030, wobei der gesamte Stromverbrauch aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden soll. Zudem wird auf Wasserstoffförderung und Energieeffizienzmaßnahmen gesetzt, um den Endenergieverbrauch bis 2030 zu senken.

Zusätzlich werden Forschungs- und Innovationsmaßnahmen gefördert, um die grüne und digitale Transformation voranzutreiben. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Mobilitätswende, der Energiewende und der Kreislaufwirtschaft.

Im Bereich der Dekarbonisierung wurden u.a. folgende Ziele definiert:

- Anteil an erneuerbarem Gas bis 2030 von mindestens 9,75% (EGG auf Basis der Regierungsvorlage, EGG (251/ME))
- Beschleunigungsgebiete für PV- und Windkraftanlagen
- 1 GW Elektrolysekapazität bis 2030 zur Produktion von erneuerbarem Wasserstoff (BMK & BMAW)
- Klimaneutralen Wasserstoff zum Ersatz von mindestens 80% des Verbrauchs von fossil erzeugtem Wasserstoff in der energieintensiven Industrie bis 2030

2.6.2 Ziele in der österreichischen Photovoltaikstrategie

Im Jahr 2040 wird PV rund 20% des Energiebedarfs in Österreich decken und eine zentrale Rolle in der Klimaneutralität des Landes spielen. Die österreichische PV-Strategie⁷ definiert klare Aktionsfelder und Maßnahmen, um dieses Ziel zu erreichen. Dabei sind eine enge Zusammenarbeit von Akteuren auf Bundes-, Landes- und Gemeindeebene sowie aus Wirtschaft, Wissenschaft und der Bevölkerung entscheidend. Die PV-Strategie umfasst unter anderem rechtliche Rahmenbedingungen, den Ausbau der Energieinfrastruktur, die Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen, die Akzeptanz in der Bevölkerung, Forschung und Innovation sowie die Stärkung der heimischen PV-Industrie. In Abbildung 1 werden das Ziel, die Aktionsfelder und Maßnahmen für den Photovoltaik Ausbau in Österreich bis 2040 dargestellt.

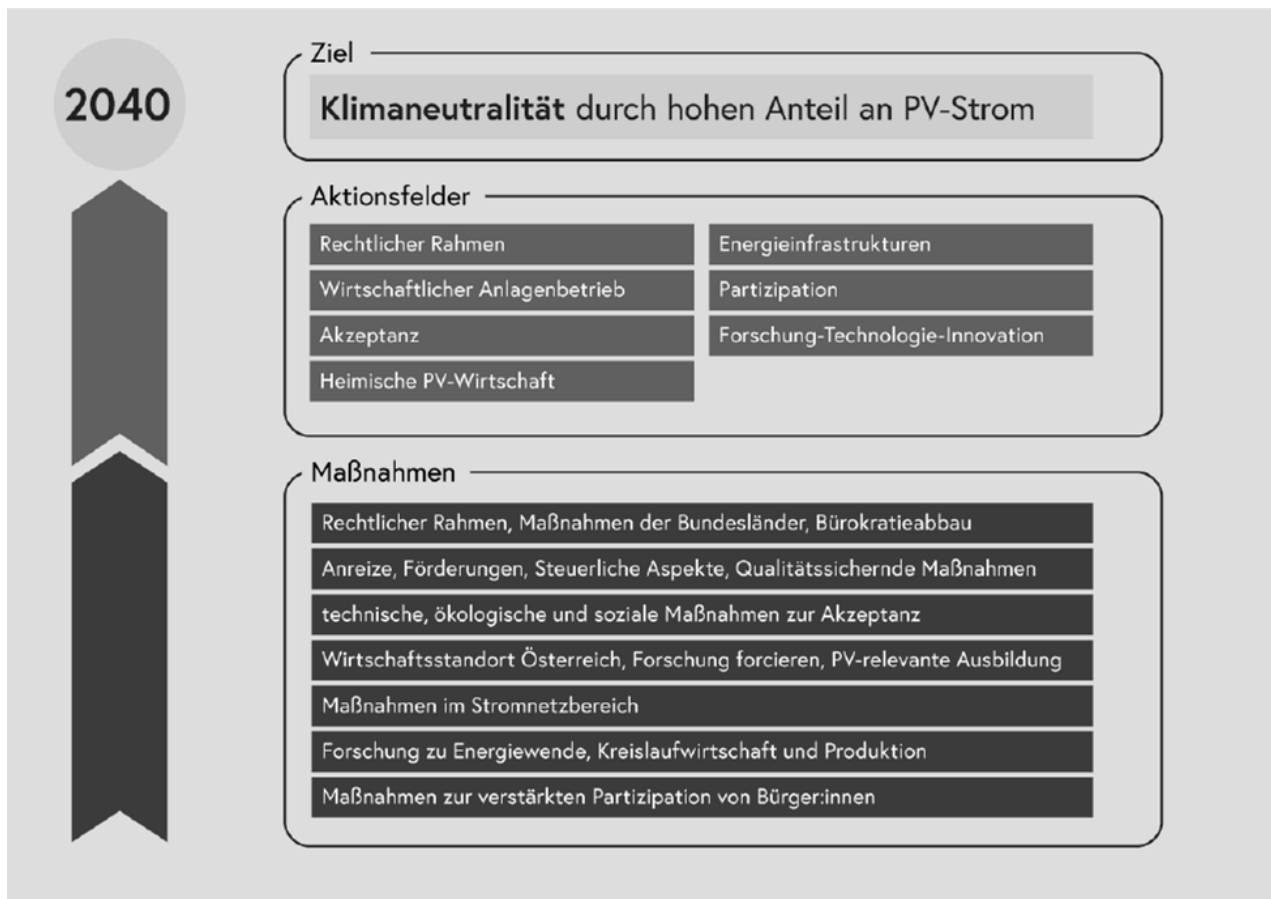


Abbildung 1: Ziel, Aktionsfelder und Maßnahmen für den Photovoltaik Ausbau in Österreich bis 2040

2.6.3 Erneuerbare Energien Ausbau Gesetz – Solarbonus

Das Erneuerbare-Energien-Ausbaugesetz (EAG) beinhaltet einen Bonus für in Europa produzierte Anlagen. Dieser Bonus bietet einen zusätzlichen Investitionszuschuss von bis zu 20% für PV Anlagen ab 35 kW und zugehörige Speicher, sofern sie Komponenten aus europäischer Produktion verwenden. Zu den förderfähigen Komponenten gehören Solarmodule, Wechselrichter und Montagestrukturen. Mit der Prämie soll die europäische Fertigung unterstützt und die Nutzung europäischer Technologie gefördert werden, um die Abhängigkeit von Einfuhren aus Nicht-EU-Ländern zu verringern.⁸

⁷ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024, Österreichische Photovoltaik-Strategie

⁸ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024: Made in Europe: Höhere Förderung für Photovoltaik-Anlagen mit europäischen Komponenten

Die genaue Höhe der Prämie wird auf der Grundlage des Anteils der in Europa hergestellten Komponenten berechnet, die in der Installation verwendet werden. Das österreichische Bundesministerium für Energie und Umwelt kann dies in Abstimmung mit dem Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft per Dekret anpassen.

Dieser Bonus ist Teil der umfassenderen Strategie Österreichs, die lokale Produktion zu unterstützen, die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern und nachhaltige Energiequellen zu fördern und gleichzeitig dem Druck des globalen Marktes, insbesondere durch billigere Importe, zu begegnen.

2.6.4 Wasserstoffstrategie für Österreich

Das Ziel der österreichischen Bundesregierung ist es, bis 2040 Klimaneutralität zu erreichen. Dafür muss das Energiesystem umfassend transformiert werden, wobei der Ausbau erneuerbarer Energien und die direkte Elektrifizierung vieler Anwendungen zentrale Rollen spielen. Bis 2030 soll die Stromversorgung in Österreich bilanziell zu 100% aus erneuerbaren Quellen gedeckt sein, unterstützt durch Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und Kreislaufwirtschaft.

Für Bereiche, in denen die Elektrifizierung nicht praktikabel ist, wird klimaneutraler Wasserstoff eine Schlüsselrolle übernehmen. Wasserstoff dient nicht nur als Ersatz für fossile Energieträger, sondern auch als Energiespeicher, der die Versorgungssicherheit unterstützt. Dabei wird auf klimaneutralen Wasserstoff gesetzt, der hauptsächlich aus erneuerbaren Quellen oder durch CO₂-Abscheidung (blauer oder türkiser Wasserstoff) hergestellt wird.

Die Elektrolyse, als wichtige Technologie zur Wasserstoffproduktion, ermöglicht die Sektorkopplung, indem sie erneuerbaren Strom speichert und nicht elektrifizierten Sektoren zuführt. In der Industrie, insbesondere in der Stahl- und Chemieindustrie sowie in Hochtemperaturprozessen, ist Wasserstoff unverzichtbar für die Dekarbonisierung. Auch im Langstreckenverkehr, Luft- und Schiffsverkehr kann Wasserstoff fossile Brennstoffe ersetzen.

Um Wasserstoff effizient zu nutzen, muss eine gezielte Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut werden, vor allem durch die Umnutzung bestehender Erdgasnetze. Österreich wird sich zudem in eine europäische und internationale Wasserstoffwirtschaft integrieren, um den Bedarf an erneuerbarem Wasserstoff zu decken und von internationalen Kooperationen zu profitieren.

2.7 Wirtschaftliche Relevanz von Technologiesouveränität

Österreichische Aktivitäten zur Technologiesouveränität im Bereich erneuerbarer Energietechnologien würden einen sehr großen Markt eröffnen. Die kumulierten Investitionskosten von Schlüsseltechnologien des Energiesystems für Deutschland werden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt wie folgt angegeben (Deutschland, 2020-2050, Tabelle 1)⁹.

⁹ Bett, A., et al: Erneuerbare Energie – Chancen einer industriellen Wertschöpfung in Europa, FVEE – Jahrestagung 2020: Forschung für den European Green Deal

Tabelle 1: Marktpotentiale erneuerbarer Energietechnologien bis 2050 in Deutschland und Österreich

Energietechnologie	GWp in Deutschland	Mrd. EUR in Deutschland	GWp in Österreich	Mrd. EUR in Österreich ¹⁰
Biomasse	70	40		
Photovoltaik	500	200	30	12
Stationäre Batteriespeicher	150	15	15	2
Wasserstoff-Elektrolyse	45	20	5	2
Windenergie	260	500	20	38

Die Marktpotentiale ausgewählter Energietechnologien in Österreich bis 2050 wurden anhand der Investitionskosten und Kapazitäten, die teilweise aus Deutschland abgeleitet wurden, eingeschätzt. Für Österreich ergeben sich folgende Schätzungen:

- Photovoltaik: Ein Ausbau auf 20–30 GW bis 2050 ist möglich, wodurch bis zu 40% des Strombedarfs gedeckt werden könnten. Dies wird durch die Dezentralisierung, technologische Fortschritte und Eigenverbrauchsanlagen angetrieben.
- Windenergie: Günstige Bedingungen im Osten und Alpenvorland könnten bis 2050 eine Kapazität von 15–20 GW ermöglichen. Etwa 20–25% des Strombedarfs könnten durch Wind gedeckt werden, begünstigt durch größere Rotoren und Re-Powering älterer Anlagen.
- Wasserstoff: Grüner Wasserstoff wird voraussichtlich eine wichtige Rolle in der Industrie und im Schwerlastverkehr spielen. Das Marktpotenzial für Wasserstoff könnte erheblich wachsen, insbesondere durch Power-to-X-Technologien.
- Energiespeicher: Das Potenzial für stationäre Batteriespeicher wurde anhand der Einwohnerzahlen abgeleitet und auf 15 GW geschätzt.
- Biomasse: Der Beitrag von Biomasse wurde in Österreich nicht weiter quantifiziert, allerdings spielt diese Technologie ebenfalls eine Rolle in der Energiewende.

Wärmepumpen, Solarthermie und die Exportquote dieser Technologien sind ebenfalls bedeutend für den Inlandsmarkt. Forschung, Ausbildung und technologische Fortschritte sowie die Unterstützung durch politische Maßnahmen sind entscheidend für den weiteren Ausbau und die Marktchancen österreichischer Unternehmen. Weltweit entwickeln sich hierbei die südostasiatischen Länder zu wichtigen Produktionsstandorten für Photovoltaik.

2.8 Arbeitsmarkteffekte

Die Anzahl der Arbeitsplätze, die in Österreich durch die Fertigung von erneuerbaren Energietechnologien entstehen könnten, hängt von mehreren Faktoren ab. Dazu zählen: Investitionen, Marktgröße, Exportpotenziale und politische Rahmenbedingungen. Hier sind einige Überlegungen, die eine Schätzung ermöglichen:

Laut Studien der Internationalen Agentur für Erneuerbare Energien (IRENA) schafft jede investierte Million Euro in erneuerbare Energien durchschnittlich 10 bis 15 direkte Arbeitsplätze.¹¹ Wenn Österreich

¹⁰ Geschätzt anhand des Verhältnisses der Leistungen im Verhältnis zu Deutschland; Werte später im Text sind etwas niedriger für Windkraft und höher für Photovoltaik

¹¹ Renewable energy and jobs: Annual review 2024, <https://www.irena.org/Publications/2024/Oct/Renewable-energy-and-jobs-Annual-review-2024> abgerufen am 30 Dezember 2024

beispielsweise 5 Milliarden EUR jährlich in erneuerbare Energien investiert, könnten allein dadurch zwischen 50 000 und 75 000 Arbeitsplätze direkt und indirekt entstehen.

Pro Gigawatt installierter PV-Leistung entstehen laut IRENA in der Fertigung und Installation etwa 20 000 Arbeitsplätze.

In der Studie „Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung“ wurden 2022 auf Basis der Befragung von Anlagenplanern und -errichtern, die ca. 20% der neu installierten PV-Leistung in Österreich repräsentieren, durchschnittlich 4,2 Arbeitsplätze pro installiertem MWp ermittelt. Dies ergab bei der neu installierten Leistung von 1 009,1 MWp insgesamt 4 236 Arbeitsplätze. Die PV-Planer und -errichter sind für 69,7 % der Arbeitsplätze in der PV-Branche verantwortlich. Weitere 1 051 Arbeitsplätze (17,3%) entfallen auf Hersteller von Wechselrichtern und PV-Komponenten, während 471 (7,7%) in Forschung und Entwicklung und 317 (5,2%) bei Modulproduzenten beschäftigt sind. Insgesamt gab es 2022 in der PV-Branche 6 075 Arbeitsplätze, ein Zuwachs von 34,1% gegenüber 2021.

In der österreichischen Windenergiebranche waren 2023 etwa 8 000 Personen beschäftigt, davon ca. 4 000 in Errichtung, Rückbau, Wartung und Service, sowie 680 bei Windkraftbetreibern. Aus der zuliefernden Industrie kamen rund 4 500 Beschäftigte, wobei der Exportanteil hier bei 89% liegt. Für 1 MW installierter Leistung sind etwa 3 bis 10 Mitarbeiter in Produktion und Montage beteiligt.

Durch den Ausbau der Fertigung von Windkraftanlagen und -komponenten (z. B. Rotorblätter, Türme) könnten bis zu 10 000 neue Arbeitsplätze entstehen, insbesondere wenn Österreich stärker in den Export einsteigt. Die Fertigung von erneuerbaren Energietechnologien zieht eine breite Palette an Zulieferern nach sich (z. B. Elektronik, Maschinenbau), die indirekt Arbeitsplätze schaffen. Für jede installierte Einheit von PV, Windkraft oder Wärmepumpen entstehen zusätzliche Arbeitsplätze in der Installation und Wartung.

Die F&E in Technologien wie Wasserstoff, Batterien oder Smart Grids könnte weitere 3 000 bis 5 000 hochqualifizierte Jobs generieren.

Im Bereich Wärmepumpen waren 2023 insgesamt 2 715 Vollzeitäquivalente beschäftigt, davon 685 in der Produktion, 926 im Handel und 1 104 in Installation und Inbetriebnahme.

Das ergibt folgende Gesamtschätzung inklusive Wasserkraft und Biomasse für Österreich:

- Kurzfristig (1–3 Jahre): 20 000 bis 30 000 Arbeitsplätze, abhängig von der Höhe der Investitionen.
- Mittelfristig (5–10 Jahre): 50 000 bis 70 000 Arbeitsplätze in Fertigung, Installation, Wartung und F&E.
- Langfristig (>10 Jahre): Bis zu 100 000 Arbeitsplätze, insbesondere wenn Österreich sich als Exporteur von Technologien etabliert.

In Tabelle 2 werden die Arbeitsmarkteffekte durch erneuerbare Energien dargestellt.

Tabelle 2: Arbeitsmarkteffekt von erneuerbaren Energietechnologien

Technologie	Arbeitsmarktauswirkung [VZÄ/MWp]
Photovoltaik	0,15 ¹² - 4,2 (20)
Windkraft	3 – 10 (24)
Wärmepumpen	4,8 ¹³

¹² 600 MA zur Herstellung von 4 000 MWp (Meyer Burger Technology AG); Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2023 inklusive gesamten Arbeitsmarkteffekt der Installation

¹³ Zahlen bezogen auf eine Wärmeleistung von 30 kW pro Einheit. Exportquote 30%, Bezugsgröße Inlandsmarkt

2020 ermittelten Goer et al. In der Studie „Wirtschaftswachstum und Beschäftigung durch Investitionen in Erneuerbare Energien - Volkswirtschaftliche Effekte durch Investitionen in ausgewählte Produktions- und Speichertechnologien“ unter Berücksichtigung von Biogas, Biomassewärme, Biomasse-KWK, Geothermie – oberflächennah (Wärmepumpen), Geothermie tief, Photovoltaik, Pumpspeicherkraftwerke, Solarthermie, Wasserkraft und Windkraft ein Potential von bis zu 100 000 pro Jahr neu geschaffenen Arbeitsplätzen bis 2030, wovon auf Photovoltaik, Windkraft und Wärmepumpen über 40 000 entfallen.

In Tabelle 3 werden die volkswirtschaftlichen Auswirkungen durch die Wertschöpfung in Österreich dargestellt.

Tabelle 3: Volkswirtschaftliche Auswirkungen durch Wertschöpfung in Österreich¹⁴

	Sachgütererzeugung		Bau		Dienstleistungen	
	Anteil [%]	Anteil Österreich [%]	Anteil [%]	Anteil Österreich [%]	Anteil [%]	Anteil Österreich [%]
Photovoltaik	70	50	29	70	1	100
Windkraft	75	20	15	85	10	90

Die Marktpotentiale ausgewählter Energietechnologien in Österreich bis 2050 wurden anhand der Investitionskosten und Kapazitäten, die teilweise aus Deutschland abgeleitet wurden, eingeschätzt. Für Österreich lassen sich folgende Prognosen ableiten:

- Photovoltaik: Ein Ausbau auf 20–30 GW bis 2050 ist möglich, wodurch bis zu 40 % des Strombedarfs gedeckt werden könnten. Dies wird durch die Dezentralisierung, technologische Fortschritte und Eigenverbrauchsanlagen angetrieben.
- Windenergie: Günstige Bedingungen im Osten und Alpenvorland könnten bis 2050 eine Kapazität von 15–20 GW ermöglichen. Etwa 20–25% des Strombedarfs könnten durch Wind gedeckt werden, begünstigt durch größere Rotoren und Re-Powering älterer Anlagen.
- Wasserstoff: Grüner Wasserstoff wird voraussichtlich eine wichtige Rolle in der Industrie und im Schwerlastverkehr spielen. Das Marktpotenzial für Wasserstoff könnte erheblich wachsen, insbesondere durch Power-to-X-Technologien.
- Energiespeicher: Das Potenzial für stationäre Batteriespeicher wurde anhand der Einwohnerzahlen abgeleitet und auf 15 GW geschätzt.
- Biomasse: Der Beitrag von Biomasse wurde in Österreich nicht weiter quantifiziert, allerdings spielt diese Technologie ebenfalls eine Rolle in der Energiewende.

Wärmepumpen, Solarthermie und die Exportquote dieser Technologien sind ebenfalls bedeutend für den Inlandsmarkt. Forschung, Ausbildung und technologische Fortschritte sowie die Unterstützung durch politische Maßnahmen sind entscheidend für den weiteren Ausbau und die Marktchancen österreichischer Unternehmen.

2.9 Inhaltliche Abgrenzung dieser Studie

Der Bruttoinlandsverbrauch von Energie konnte in Österreich ab 2022 weitgehend stabilisiert werden und ist durch deutliche Zuwächse der erneuerbaren Energien gekennzeichnet. Trotz des Konjunkturaufschwunges im Jahr 2022 (BIP real +5%) sank der Bruttoinlandsverbrauch um 5,2% und damit annähernd auf das pandemiebedingt niedrige Niveau des Jahres 2020. Dafür waren vor allem die günstigen Witterungsverhältnisse, der stark reduzierte Gasverbrauch, der sinkende Dieselsatz und das hohe

¹⁴ Goer S., et al., Wirtschaftswachstum und Beschäftigung durch Investitionen in Erneuerbare Energien, Linz, 2020

Energiepreisniveau ausschlaggebend. Von besonderer Bedeutung ist der Anteil an erneuerbarer Energie am Bruttoinlandsverbrauch, der in Österreich fast doppelt so hoch ist wie im EU-Durchschnitt. Bis 2040 sollte dieser Anteil auf nahezu 100 Prozent steigen.

■ Kohle
 ■ Öl
 ■ Gas
 ■ Brennbare Abfälle
 ■ Biogene Energien
 ■ Umgeb.wärme
 ■ Wasserkraft
 ■ Wind
 ■ PV
 ■ Nettostromimporte

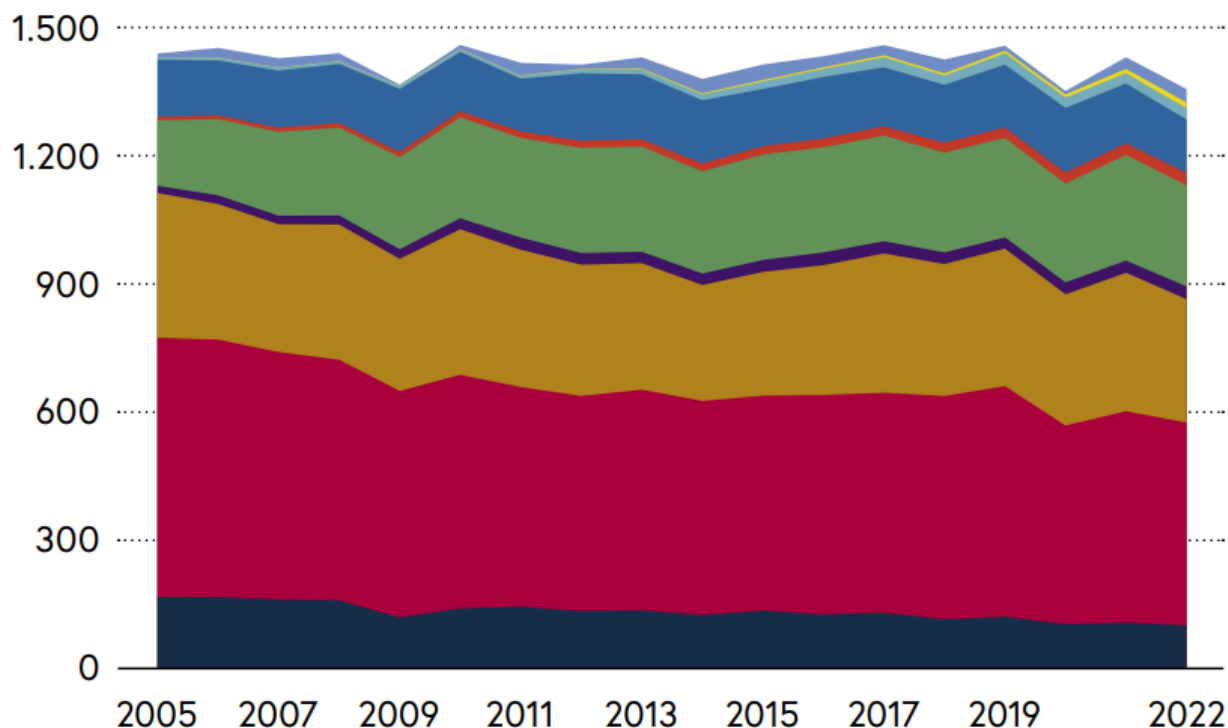


Abbildung 2: Bruttoinlandsverbrauch nach Energieträgern in Österreich in Petajoule [PJ] von 2005 bis 2022¹⁵

Der Anteil erneuerbarer Energieträger am Bruttoendenergieverbrauch Eigenverbrauch betrug 2020 36,5%. Die Abbildung 2 zeigt die Erzeugungsstruktur der erneuerbaren Energie in Österreich 2022. Der gesamte erneuerbare elektrische Strom deckte 2020 ca. 75% des Stromverbrauchs ab (ohne Pumpspeicherung)¹⁶. Einige vielversprechende Technologien, die sich in den kommenden Jahrzehnten weiterentwickeln und verbreiten werden, sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die Tabelle zeigt auch, welche für die Zukunft relevanten Technologien in dieser Studie nicht betrachtet wurden.

¹⁵ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Energie in Österreich Zahlen, Daten, Fakten 2023

¹⁶ Umweltbundesamt, Erneuerbare Energie, [https://www.umweltbundesamt.at/energie/erneuerbare-energie#:~:text=Der%20gesamte%20erneuerbare%20Strom%20\(ohne,\(Quelle%3A%20Statistik%20Austria\),](https://www.umweltbundesamt.at/energie/erneuerbare-energie#:~:text=Der%20gesamte%20erneuerbare%20Strom%20(ohne,(Quelle%3A%20Statistik%20Austria),) abgerufen am 30. Dezember 2024

Tabelle 4: Abgrenzung dieser Studie

Technologie	Bemerkungen	In dieser Studie
Batterien	Lithium-Schwefel-Batterien und Alternativen zu Lithium-Ionen-Batterien, werden entscheidend für die Speicherung erneuerbarer Energie sein	Betrachtet
Photovoltaik	Sinkende Kosten und steigende Effizienz	Betrachtet
Wärmepumpen	Zur Nutzbarmachung von Abwärme	Betrachtet
Wasserstoff	Als Energieträger und Speichermedium zunehmend wichtig	Betrachtet
Windenergie	Wird durch größere, effizientere Turbinen weiter an Bedeutung gewinnen	Betrachtet
Biomasse und Biokraftstoffe	Abfallprodukte aus der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Abwasserbehandlung könnten als Ausgangsstoff für umweltfreundliche Biokraftstoffe dienen.	nicht betrachtet, eigene Strategie und Studien
Energieeffizienz-Technologien	Diese Technologien haben das Potential den Energieverbrauch von Industrien und Privaten um 30% zu senken	nicht betrachtet
Fusionsenergie	Technische Herausforderungen verzögern noch den Durchbruch	nicht betrachtet
Geothermie	Potenzial, insbesondere in Regionen mit hoher geothermischer Aktivität	nicht betrachtet
Pumpspeicherkraftwerke	Etablierte Technologie	nicht betrachtet
Smart Grids	Mit der Verbreitung kleinerer Solar- und Windkraftanlagen und Speichertechnologien entstehen intelligente Netze, die den Energiefluss effizient steuern	nicht betrachtet
Small Modular Reactors (SMR)	Diese kleineren Kernspaltungsreaktoren sind sicherer, modular und effizienter, für Regionen ohne erneuerbare Energiequellen	nicht betrachtet
Superkondensatoren	Schnelle Lade- und Entladezyklen	nicht betrachtet
Synthetische Kraftstoffe	Diese könnten als klimafreundliche Alternative zu fossilen Brennstoffen in Flugzeugen, Schiffen und dem Schwerverkehr dienen. Sie werden aus CO ₂ und Wasserstoff synthetisiert	nicht betrachtet
Wasserkraft	Wird in Österreich in einem hohen Maß genutzt. Der Klimawandel könnte hier Probleme schaffen.	Nicht betrachtet
Wellen- und Gezeitenkraftwerke	Konstante Quelle erneuerbarer Energie	Für Österreich nicht relevant, in dieser Studie nicht betrachtet
Carbon Captur and Storage (CCS)	CCS ist die unterirdische Speicherung von Kohlendioxid (CO ₂) zur Verringerung von CO ₂ -Emissionen in die Atmosphäre. Das zu speichernde CO ₂ kann entweder aus fossilen Energieversorgungsanlagen, aus Industrieanlagen, dem Einsatz von Biomasse zur Energieerzeugung, aus Müllverbrennungsanlagen oder direkt aus der Atmosphäre stammen. Denkbare Speicher sind teilweise oder ganz ausgeförderte Öl- und Gaslagerstätten oder saline Aquifere.	Nicht betrachtet

2.10 Übersicht der betrachteten Aspekte der ausgewählten Technologien

In Abbildung 3 werden die betrachteten Aspekte dieser Studie dargestellt.



Abbildung 3: Grafische Darstellung der in dieser Studie betrachteten Aspekte

Diese Studie untersucht die Wertschöpfung von ausgesuchten Energieeffizienztechnologien Photovoltaik, Windkraft, Batteriespeicher, Elektrolyseure und Wärmepumpen. Für die Lebenszyklusstufen der einzelnen Technologien werden beschrieben:

- Komponenten, Materialien, Erzeugung, Vertrieb, Installation, Betrieb, Wartung
- Kreislaufwirtschaftsoptionen
- Zukünftige Technologien
- Stakeholder in Österreich: Verbände, Forschung, Entwicklung, Ausbildung
- Chancen und Risiken für österreichische Firmen

Für die ausgewählten Technologien wird versucht, die Größe des jeweiligen Marktes anzugeben.

Weiters werden Forschung und Ausbildung in Österreich, in jeweiligen Bereich relevante Technologien, Stakeholder in Österreich und Potentiale für österreichische Firmen beschrieben.

Kreislaufwirtschaft und Forschung, Entwicklung und Ausbildung sind dabei Querschnittsmaterien, die jeweils je nach technischen Aspekten der jeweiligen Energietechnologie verschiedene technische Schwerpunkte haben.

3 Technologien und Wertschöpfungsketten

3.1 Einleitung

Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen, Hydrolyse zur Wasserstoffproduktion und Wärmepumpen zählen zu den Schlüsseltechnologien der Energiewende. Sie ermöglichen nicht nur die Reduktion von Treibhausgasemissionen, sondern auch die Diversifizierung der Energiequellen und die Verbesserung der Energieunabhängigkeit.

Allerdings erfordert die Entwicklung, Produktion und Implementierung dieser Technologien gut funktionierende und resiliente Wertschöpfungsketten. Diese erstrecken sich von der Gewinnung der Rohstoffe über die Fertigung der Komponenten bis hin zur Installation und Wartung der Anlagen. Der Erfolg dieser Technologien hängt stark davon ab, wie effizient und nachhaltig diese Wertschöpfungsketten organisiert sind. Globale Abhängigkeiten, Materialknappheit und geopolitische Spannungen beeinflussen die Verfügbarkeit und Kosten von Materialien und Komponenten. Besonders im Fokus stehen dabei kritische Rohstoffe wie Kupfer generell, Silizium für PV-Module, Seltene Erden für Windkraftanlagen sowie spezielle Metalle und chemische Verbindungen für Elektrolyseure und Wärmepumpen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die wichtigsten Technologien beleuchtet und die Herausforderungen und Chancen, die mit den zugrundeliegenden Wertschöpfungsketten verbunden sind, aufgezeigt.

3.2 Photovoltaik

3.2.1 Wertschöpfungskette Photovoltaik

3.2.1.1 Beschreibung der Technologie

Die grundlegende Einheit eines PV-Systems ist die Solarzellen aus Halbleitermaterialien wie Silizium, die Sonnenlicht in Gleichstrom umwandeln. Diese Zellen werden in Modulen zusammengefasst, um die gewünschte Spannung und Stromstärke zu erreichen, und sind in einem Aluminiumrahmen mit Glasabdeckung untergebracht.

Wechselrichter wandeln den erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom um, der für Haushaltsgeräte und die Einspeisung ins Stromnetz benötigt wird. Es gibt verschiedene Arten von Wechselrichtern: zentrale Wechselrichter für große Anlagen, String-Wechselrichter für mittlere und Mikrowechselrichter für einzelne Module.

Die Solarmodule müssen sicher montiert werden, wofür spezielle Montagesysteme für verschiedene Dachtypen und Untergründe eingesetzt werden. Nachführsysteme können verwendet werden, um die Module optimal zur Sonne auszurichten. Die Verkabelung verbindet die Module mit dem Wechselrichter, wobei Außenkabel benötigt werden.

In netzgekoppelten Systemen ist ein Einspeisezähler erforderlich, um den eingespeisten Strom zu messen und die Einspeisevergütung zu berechnen. Ein Erzeugungszähler misst den gesamten produzierten Strom. Energiemanagementsysteme können zur Optimierung von Energieverbrauch und -erzeugung eingesetzt werden.

Optionale Batteriespeicher speichern überschüssigen Strom, um den Eigenverbrauch zu maximieren und die Abhängigkeit vom öffentlichen Stromnetz zu verringern.

Überwachungssysteme ermöglichen die Echtzeitkontrolle der PV-Anlage und deren Leistung. Netzgekoppelte Systeme benötigen eine Verbindung zum öffentlichen Stromnetz, um überschüssigen Strom einzuspeisen.

Schutzvorrichtungen wie Netzschutzrelais und Überspannungsschutzgeräte sind notwendig, um die Sicherheit der Anlage zu gewährleisten. Solaranlagen müssen feuerfest installiert werden, und spezielle Mechanismen können die Module im Brandfall deaktivieren.

In Tabelle 5 werden die typischen Bestandteile einer PV-Anlage dargestellt.

Tabelle 5: Komponenten einer PV-Anlage

Komponente	Ausführung
Batteriespeichersystem	Batteriespeicher, BMS, Wechselrichter
Datenlogger	Datenlogger, WLAN, Ethernet, Software
Energiemessgerät / Einspeisezähler	Zwei Wege Stromzähler, smart Meter
Montagesystem	Montageschienen, Klemmen, Halterungen, Befestigungsmaterial, Ballastsysteme
Netzanschlusskomponenten	Anschlussbox, Klemmen, Schutzschalter
Photovoltaikmodule	z.B. monokristalline oder polykristalline Module
Planung und Dokumentation	Pläne, Nachweise, Prüfprotokolle, Zertifikate
Sonstiges	Kabelkanäle, Blitzschutz, Beschilderung, Werkzeug, Reinigungsmaterial
Überspannungsschutz und Sicherheitseinrichtungen	Schutzschalter
Verkabelung	Solarkabel, Stecker, AC-Kabel, Erdungsklemmen
Wafer	Als Grundelemente der Photovoltaikmodule
Wechselrichter	String-Wechselrichter, Mikro-Wechselrichter

3.2.1.2 Materialien (Abbau und Metallurgie)

Silizium-PV

- Die meisten kommerziell erhältlichen PV-Module basieren auf kristallinem Silizium.

Dünnschicht-PV

Dünnschicht-PV kann sich auf eine Reihe verschiedener Absorbermaterialien beziehen, von denen das gebräuchlichste Cadmiumtellurid (CdTe) ist. Dünnschicht-PV-Module werden in der Regel von Anfang bis Ende als eine Einheit verarbeitet, wobei alle Schritte in einer Anlage erfolgen.

In Tabelle 6 werden die Materialien eines PV Modules dargestellt. Die kritischen Rohstoffe sind rot markiert. Dazu zählen neben Siliziumwafern insbesondere Edelmetalle, die die Legierungselemente Chrom, Nickel und Mangan enthalten, sowie Kupfer und Aluminium.

Tabelle 6: Materialien Photovoltaik¹⁷

Rohstoffe	Masse pro Anlage [kg]	Bedarf für 10 GW [t]	Bedarf Österreich [t/a]	IDEMAT ¹⁸ [kg CO _{2e} /kg]	CF [kg CO _{2e} /MW]	CF %
1-Propanol	63	630		4,2	265	1
Aluminium	246	2 459	350 000 t/a	4,7	1 156	4
Anschlussdose PP	613	6 130		1,6	981	4
Beton	35 700	357 000		0,22	7 854	30
Blei	12	120		0,9	11	0
Chromstahl	68	680	600 000 t/a	1,93	131	1
Einscheibensicherheitsglas	57	570	28 000 t/a ¹⁹	1,4	80	0
Elektrokabel Kupfer	544	5 440 ²⁰	40 000 t/a	3,2	1 741	7
EVA Folie	7	70		4,3	30	0
Gusseisen	1 025	10 250		1,4	1 435	6
HDPE	31	310		1,8	56	0
Kantenverbinder GFK, PA	194	1 940		4,9	951	4
Kupfer	450	4 500		3,2	1440	6
Lötband (Kupfer)	136	1 360		3,2	435	2
Methanol	101	1 010		0,9	91	0
PA	64	640		4,9	314	1
PET Granulat	1	12		1,3	2	0
Polyvinylfluoridfolie	2	24		9,4	23	0
Silikon	413	4 130		7,3	3 015	12
Solarzellen - Silizium	4	40 ²¹		213	852	3
Stahl	3 465	34 650		0,9	3 119	12
Trafoöl	600	6 000		2	1 200	5
Zinn	22	220		29,5	649	3

3.2.1.3 Erzeugung

Die Herstellung von Photovoltaikkomponenten und -anlagen umfasst mehrere Verfahren, die von der Materialauswahl bis zur Endmontage reichen. Die Herstellungsschritte sind:

1. Siliziumproduktion

- Rohstoffaufbereitung: Silizium wird aus Quarzsand, einem der häufigsten Rohstoffe, hergestellt.
- Schmelzverfahren: Um metallisches Silizium zu erhalten, wird das Siliziumdioxid bei hohen Temperaturen reduziert.

2. Wafer-Herstellung

¹⁷ Basis: Freiflächenanlage 997 kWp, Masterarbeit „Life Cycle Assessment einer Photovoltaik und einer Windkraftanlage“; <https://unipub.uni-graz.at/obvugr/content/titleinfo/2202679/full.pdf>, abgerufen 30 Dezember 2024

¹⁸IDEMAT, <https://idematapp.com/>, abgerufen 30 Dezember 2024

¹⁹ <https://www.glasundbeschlag.de/beratung/glossar/glasgewicht/>; 2.8 Millionen bis 3.8 Millionen m², 10 kg/m²

²⁰ Durchschnittlicher Kupferverbrauch von 4 Tonnen/MW, <https://www.ee-news.ch/de/article/39192/kupfer-welche-rolle-spielt-der-rohstoff-im-solarstromsektor>

²¹ Der Materialbedarf an Silizium hat sich beispielsweise von über 16 g/Wp im Jahr 2004 auf unter 3 g/Wp im Jahr 2020 reduziert (Fraunhofer ISE 2021)

- Sägen: Das metallische Silizium wird in dünne Scheiben (Wafer) gesägt. Dies geschieht typischerweise mit einem Drahtsägeverfahren, um Materialverluste zu minimieren.

3. Zellherstellung

- Dotierung: Die Wafer werden mit Dotierstoffen wie Phosphor oder Bor behandelt, um n- oder p-leitende Zellen zu erzeugen.
- Antireflexbeschichtung: Eine Schicht wird auf die Zelloberfläche aufgebracht, um Reflexionen zu reduzieren und die Lichtabsorption zu erhöhen.
- Metallisierung: Metallkontakte werden auf die Zellen aufgebracht, um den elektrischen Kontakt herzustellen.

4. Modulmontage

- Laminierung: Die fertigen Solarzellen werden zwischen Schichten von Glas und einem Polymer (z.B. EVA) laminiert, um sie vor Umwelteinflüssen zu schützen.
- Rahmenmontage: Aluminiumrahmen werden um die Module angebracht, um zusätzliche Stabilität und Schutz zu bieten.
- Verkabelung: Die Module werden elektrisch verbunden, und die Anschlussdose wird installiert.

5. Installation

- Montagesysteme: Entwicklung und Produktion von Montagesystemen, die die Module an Gebäuden oder im Freien stabilisieren.
- Inbetriebnahme: Elektrische Verkabelung der Module und Integration in das Stromnetz oder in ein unabhängiges System.

6. Systemintegration

- Wechselrichter: Installation von Wechselrichtern, die den Gleichstrom der PV-Module in Wechselstrom umwandeln, der ins Netz eingespeist oder von Verbrauchern genutzt werden kann.

Siliziumwafer

In Deutschland gibt es mit Siltronic AG²² zwar einen sichtbaren Lieferanten für Siliziummaterial, doch die Herstellung von Siliziumwafern ist in Europa nur in Norwegen und Frankreich in geringem Umfang vertreten. Es existiert nahezu keine Zellproduktion, und die Modulproduktion in Europa bleibt mit weniger als 500 MW/a gering. Der Großteil der PV-Zellen- und Modulproduktion findet derzeit in Asien, insbesondere in China, statt.

Insgesamt betreibt Wacker zwei Polysilicium-Werke in Deutschland und eine in den USA. Unsere Polysiliziumkapazitäten in Europa liegen bei rund 60 000 Tonnen. Damit ist Wacker weltweit und in Europa ein wichtiger Akteur in der Lieferkette für Solar- und Halbleiterindustrie.²³

Beobachtung: In Europa gibt es für die Siliziumwafer-Fertigung nur in Deutschland, Norwegen und Frankreich in geringem Umfang Fertigungskapazitäten.

²² Siltronic <https://www.siltronic.com/de/index.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

²³ Solarpowereurope, <https://www.solarpowereurope.org/features/make-solar-eu-wacker-s-role-in-reshoring-solar-manufacturing-to-europe>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Erfreuliche Entwicklungen deuten darauf hin, dass die Solarzellenherstellung in Europa wieder möglich ist. Mehrere Faktoren haben sich geändert: Zum einen ist der Anteil der Transportkosten an den Modulkosten gestiegen, vor allem aufgrund der stark gesunkenen Preise für Photovoltaikprodukte. Zum anderen ermöglichen neue hocheffiziente Zelltechnologien wie die Heterojunction- und Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen den Markteintritt neuer Akteure und schaffen Wettbewerbsvorteile. Dies ist mit Schwierigkeiten verbunden: Meyer Burger hat die durch die EU geförderte Fertigung in Deutschland 2024 wieder geschlossen. Deutschland bleibt allerdings ein starker Forschungsstandort in der Photovoltaik und Produktionstechnologie, was eine breite Wissensbasis für Innovationen bietet.

Photovoltaikmodule

In Österreich beschäftigen sich zwei Firmen mit der Erzeugung von Modulen:

- Kioto²⁴
- Energetica²⁵

Die Kioto Photovoltaics GmbH ist der führende österreichische Hersteller von Photovoltaikmodulen mit Standorten in St. Veit (Kärnten) und Wies (Steiermark). Dort werden hochwertige Module auf Basis der Glas-Folien- und Glas-Glas-Technologie produziert. Die Unternehmensgruppe, zu der auch die Sonnenkraft GmbH gehört, beschäftigt 180 Mitarbeiter:innen und erzielt einen jährlichen Umsatz von etwa 70 Millionen Euro in den Bereichen Photovoltaik und Solarthermie. Als Solar-Pionier bietet das Unternehmen Solarlösungen für diverse Anwendungen im Bereich der Gebäudehülle an.

Eigenfertigung bei Kioto Solar:

Die Kioto Solar GmbH stellt hauptsächlich Photovoltaikmodule her, darunter Glas-Glas- und Glas-Folien-Module, die in hochmodernen Produktionsanlagen gefertigt werden. Das Unternehmen verwendet sowohl monokristalline als auch polykristalline Zellen zur Herstellung seiner Solarpaneele. Zudem produziert Kioto die Aluminiumrahmen für die Module selbst, um deren Stabilität und Schutz gegen Umwelteinflüsse zu gewährleisten. Glas wurde bisher aus dem Werk einer italienischen Firma am Produktionsort bezogen. Momentan werden chinesische und vietnamesische Lieferanten in Erwägung gezogen.

Kioto bietet auch maßgeschneiderte Montagesysteme an, die im eigenen Haus entwickelt und hergestellt werden. Durch eigene Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten verbessert das Unternehmen kontinuierlich die Effizienz seiner Module und optimiert Fertigungsprozesse, um den Eigenfertigungsanteil zu steigern.

Während Kioto die Module und einige Komponenten selbst produziert, bezieht es bestimmte Spezialkomponenten wie Solarzellen von externen Zulieferern, was in der Photovoltaikindustrie heute üblich ist. Der Fokus liegt jedoch auf der Endfertigung und Qualitätssicherung der Module in Österreich.

Eigenfertigung bei Energetica²⁶:

Energetica Industries stellte hochwertige Photovoltaik-Module in Österreich her und plante ab 2024 die jährliche Produktion von Solarpaneelen mit einer Leistung von 400 Megawatt in Liebenfels, Kärnten. Die gesamte Fertigung umfasste alle Schritte, von der Herstellung der Solarpanels bis zur Endmontage und Qualitätskontrolle.

Zusätzlich entwickelte und produzierte Energetica Batteriespeichersysteme, einschließlich der Herstellung von Batteriemodulen und der dazugehörigen Steuerungstechnologie. Das Unternehmen bot auch

²⁴ KIOTO Photovoltaics GmbH Company profile Product benefits, 2013

²⁵ Kleine Zeitung, Preisverfall, Betrugsoffer: PV-Hersteller Energetica schlittert erneut in die Insolvenz, <https://www.kleinezeitung.at/wirtschaft/17897344/pv-hersteller-energetica-schlittert-erneut-in-die-insolvenz>, abgerufen am 30. Dezember 2024

²⁶ IRMA Invests, <https://irma.investments/portfolio/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Wechselrichter und Steuerungssysteme an und setzte auf eine integrierte Produktionslinie, um Qualität und Effizienz zu gewährleisten.

Dennoch erklärte Energetica 2023 zum zweiten Mal Konkurs. Gründe waren eine ruinöse Wettbewerbssituation, die durch eine Überflutung des Marktes mit chinesischen Modulen zu Dumpingpreisen und einem drastischen Preisverfall verursacht wurde. Die gesunkene Nachfrage nach PV-Lösungen aufgrund der angespannten Lage im Immobilien- und Kreditmarkt verschärfte die Probleme in der europäischen PV-Branche.

Die ISOVOLTAIC AG mit Sitz in Lebring²⁷, Österreich war Weltmarkt- und Technologieführer in der Entwicklung und Produktion von Rückseitenfolien für Photovoltaik-Module und prägt mit ICOSOLAR® Rückseitenfolien maßgeblich geltende Industriestandards. Die Kunden der ISOVOLTAIC sind die Hersteller von Solarmodulen. 98% der Gesamtproduktion werden ins Ausland exportiert. Hauptabsatzmärkte sind Asien, Europa und Nordamerika.

ISOVOLTAIC beschäftigt etwa 150 Mitarbeiter und wurde 2012 von der chinesischen Firma Taizhou Jolywood Photovoltaic Technology Co., Ltd. übernommen. Seither firmiert das Unternehmen als Jolywood (Austria) GmbH²⁸ und hat sich auf die Entwicklung und Produktion bifazialer Solarmodule spezialisiert. Durch die Übernahme hat Jolywood seine Produktpalette erweitert und die Expertise von ISOVOLTAIC in hochwertigen Rückseitenfolien integriert, um seine Marktposition zu stärken. Jolywood (Taizhou) Solar Technology Co., Ltd. führend in der Herstellung von N-Typ TOPCon bifazialen Solarmodulen, hat ein Eigenkapital von 198 Millionen Euro und eine Produktionskapazität von 3 GW. Mit 58 Patenten bietet Jolywood innovative Technologien, die weltweit hohe Leistungsklassen und niedrige Stromgestehungskosten ermöglichen.

Ertext Solar ist ein flexibles Team von Spezialisten mit 70 Jahren Erfahrung im Glasbau, das die harmonische Integration von Solartechnik in die Gebäudearchitektur anstrebt.²⁹

DAS Energy³⁰ hat sich auf die Herstellung leichtgewichtiger und biegsamer Photovoltaikmodule spezialisiert. Durch eine klare Ausrichtung auf Forschung und Entwicklung und den Einsatz moderner Glasfasermaterialien aus der Luftfahrtindustrie in Verbindung mit effizienten monokristallinen Siliziumzellen entwickelt das Unternehmen eine neue Generation flexibler und langlebiger Photovoltaikmodule.

MGT-esys³¹ entwickelt maßgeschneiderte Photovoltaikelemente und intelligente Systeme, die sich nahtlos in nahezu jede Gebäudestruktur integrieren lassen.

Beobachtung: Die Szene von PV-Herstellern in Österreich ist dynamisch.

Im Jahr 2017 erreichte die Modulproduktion in Österreich 100 MWp (Kioto, Energetica, DAS Energy, Ertext Solar, MGT-esys). Die gesamte Wertschöpfungskette der Produktion von Photovoltaikmodulen (Siliziummaterial, Wafer, Zelle, Module) ist derzeit zu einem großen Teil im asiatischen Wirtschaftsraum, insbesondere in China angesiedelt.

²⁷ ISOVOLTAIC AG, <https://www.ecotechnology.at/betriebe/isovoltaic-ag/#:~:text=Die%20ISOVOLTAIC%20AG%20ist%20Weltmarkt,sind%20die%20Hersteller%20von%20Solarmodulen>, abgerufen am 30. Dezember 2024

²⁸ Solarics, <https://www.solarics.at/collections/jolywood>, abgerufen am 30. Dezember 2024

²⁹ ERTEX-Solar, <https://www.ertex-solar.at/unternehmen/unser-team/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

³⁰ DAS, <https://das-energy.com/de/home>, abgerufen am 30. Dezember 2024

³¹ MGT, <https://www.mgt-esys.at/referenzen/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Regalsysteme

Die Stützkonstruktionen zur Befestigung von PV-Modulen auf Dächern oder Freiflächen werden als Regalsysteme bezeichnet. Ihre Herstellung variiert je nach Installationsort. Freiflächenregale bestehen in der Regel aus korrosionsgeschütztem oder verzinktem Stahl und erfordern Betonfundamente. In großen Freiflächenanlagen kommen manchmal einachsige Nachführmechanismen zum Einsatz, die den Solarmodulen helfen, der Sonne zu folgen, was mechanische Teile wie Motoren und Lager erfordert.

Stationäre Regale (auch als „feste Neigung“ bekannt) werden meist verwendet. Bei Flachdächern von Gewerbe- oder Industriegebäuden werden meist Stahlregale mit fester Neigung eingesetzt, die an schweren Blöcken auf dem Dach befestigt sind. Bei geneigten Dächern sind die Regale so konstruiert, dass sie sicher an den Sparren montiert werden und die Module einige Zentimeter über dem Dach halten. Dies ermöglicht einen besseren Luftstrom zur Kühlung der Module und verbessert ihre Leistung.

Leistungselektronik

Die Leistungselektronik für PV-Module, einschließlich Leistungsoptimierer und Wechselrichter, wird auf elektronischen Leiterplatten montiert. Diese Hardware wandelt den Gleichstrom der Solarmodule in Wechselstrom für das Stromnetz um. Der Bestückungsprozess beginnt mit einer Leiterplattenvorlage, auf die Lötpaste aufgetragen wird. Kleine Bauteile wie Transistoren und Dioden werden von Robotern platziert, während größere Komponenten wie Kondensatoren und Transformatoren manchmal manuell hinzugefügt werden. Nach der Montage durchläuft die Platine ein Lötbad, um die Bauteile zu verbinden. Anschließend wird die gesamte Platine mit Lack überzogen und in einem wasserdichten Gehäuse mit Anschlüssen versiegelt.

Die Kapazität zur Herstellung von PV-Wechselrichtern bei Fronius liegt bei etwa 2 GW/a, wobei die Exportquote für Gleichrichter bei rund 93% liegt. Zudem zeichnen sich österreichische Unternehmen durch Expertise in der Entwicklung von Hochleistungskonzepten für Solarglas, Solarspeicher, Schalter und weitere elektrische Ausrüstungen aus.

Neben der Herstellung der oben beschriebenen, sind weitere in Österreich hergestellte Komponenten³²:

- Module SC, MC, Laminat, Lötten ³³, PV Products GmbH, PVT-Österreich, Sunplugged GmbH, MGT-esys
- Vergussmassen (EVA), Aluminiumrahmen, Glas, Lote, Verbindungsleitungen z.B. Isovoltaic AG, Ulbrich, Lisec Austria GmbH
- Thermostate, Metalltargets und Verdampfungsquellen, organische Materialien z. B. Plansee High Performance Materials
- Systemoptimierung z. B. Fronius International, Welser Profile, LEBAU Partnernetzwerk & Bau GmbH, Phoenix, Contact, Gebauer & Griller Kabelwerke Gesellschaft m.b.H

³² IEA, National Survey Report of Photovoltaic Applications in Austria 2017, https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/reports/iea-pvps-task-1-national-survey-report-austria-2017.pdf

³³ Umsatz 2023 ca. 70 Millionen EUR

Beobachtung: Die österreichischen Player erzeugen in erster Linie Komponenten für Photovoltaikanlagen. Niemand erzeugt Wafer. Nur einige wenige stellen Module her.

In Tabelle 7 werden die Komponenten von PV Anlagen und die österreichischen Hersteller dieser Komponenten dargestellt.

Tabelle 7: Komponenten von PV-Anlagen und österreichische Hersteller

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
Datenlogger	Datenlogger, WLAN, Ethernet, Software	Fronius Solar.web: Überwachungssysteme, Kommunikationsmodule für Fernüberwachung SMA Sunny Portal (über Distributoren) Datenlogger zur Leistungsüberwachung
Energiemessgerät / Einspeisezähler	Zweiwege-Stromzähler, smart Meter	Sicom GmbH: Zweiwege-Stromzähler, smart Meter und Messsysteme Landis+Gyr (über österreichische Partner)
Montagesystem	Montageschienen, Klemmen, Halterungen, Befestigungsmaterial, Ballastsysteme	Schletter Solar GmbH: Montageschienen, Dachhaken, Ballastsysteme für Flachdächer K2 Systems: Montagesysteme für Schräg- und Flachdächer IBC SOLAR Austria: komplette Montagesysteme inklusive Halterungen, Schrauben und Bodenanker Wuppermann Austria GmbH (Aufständungen aus verzinkten Stahlprofilen) ³⁴
Netzanschlusskomponenten	Anschlussbox, Klemmen, Schutzschalter	Schneider Electric Austria GmbH: Einspeise- und Netzanschlussboxen, Schutzschalter
Optional: Batteriespeichersystem	Batteriespeicher, BMS, Wechselrichter	Sonnen GmbH (über Distributoren in Österreich): Lithium-Ionen-Batteriespeicher Speicherkapazität: 5 kWh bis 15 kWh Fronius Solar Battery: Speicherkapazität: 4.5 kWh bis 12 kWh, Batteriemanagementsystem inklusive
Photovoltaikmodule	z.B. monokristalline oder polykristalline Module	Kioto Solar: Monokristalline und Polykristalline Module Fronius Solar: Hochwertige PV-Module in verschiedenen Leistungsklassen
Planung und Dokumentation	Pläne, Ertragsprognosen, Nachweise, Prüfprotokolle, Zertifikate	PV-Planer (verschiedene Anbieter in Österreich)
Sonstiges	Kabelkanäle, Blitzschutz, Beschilderung, Werkzeug, Reinigungsmaterial	OBO Bettermann GmbH: Blitzschutzsysteme, Kabelkanäle und Schutzrohre

³⁴ Wuppermann, <https://www.wuppermann.com/standorte/wuppermann-austria-gmbh/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
Überspannungsschutz und Sicherheitseinrichtungen	Schutzschalter	Dehn + Söhne GmbH & Co. KG: Überspannungsschutzkomponenten (DC- und AC-seitig) ABB Austria GmbH: Schutzschalter, Trennschalter, FI-Schalter
Verkabelung	Solkabel, Stecker, Wechselstromkabel, Erdungsklemmen	Lapp Austria GmbH: Gleichstrom- und Wechselstromkabel (UV-beständig), MC4-Stecker und Buchsen Phoenix Contact: Anbieter von Verkabelungslösungen und Erdungskomponenten
Wafer		keine
Wechselrichter	String-Wechselrichter, Mikro-Wechselrichter	Fronius International GmbH: String- und Hybrid-Wechselrichter mit generischer österreichischer Software für die Fernwartung SMA Solar Technology (über österreichische Distributoren)

Bis auf den Schlüsselprozess Kristallzuchtanlagen (Czochralski-Verfahren) oder Gussanlagen, das Sägen der Wafer und die Oberflächenbehandlung der Wafer sind alle Prozesse Standardprozesse der Metallverarbeitung, Kunststoffverarbeitung, und Elektrotechnik.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über potenzielle österreichische Hersteller von Komponenten für PV Anlagen.

Tabelle 8: Hauptkomponenten von PV-Anlagen und potentielle österreichische Hersteller

Komponente	Potentielle österreichische Hersteller
Montagesystem	Voestalpine ist ein führender Anbieter von hochfestem Stahl und metallischen Komponenten und hat Erfahrung in der Herstellung von Bauteilen für erneuerbare Energien, wie Windkraftanlagen. Ihr Know-how in der Herstellung von Metallkomponenten könnte es ihnen ermöglichen, die mechanischen Strukturen für Photovoltaikmodule oder auch Solarmodulrahmen zu entwickeln. Voestalpine Krems Finaltechnik GmbH erzeugt Straßensicherheitssysteme und Hochregallager. AMAG ist ein führender Hersteller von Aluminiumprodukten, die auch für die Rahmen und strukturellen Komponenten von Photovoltaikmodulen verwendet werden. Mit ihrer Expertise in der Aluminiumverarbeitung könnten sie einen wichtigen Beitrag zur Herstellung von PV-Modulkomponenten leisten, insbesondere im Bereich leichter und robuster Rahmen.
Photovoltaikmodule	Siehe „Wafer“
Wafer	AT&S ist ein führendes Unternehmen im Bereich der Herstellung von Leiterplatten und Halbleiterkomponenten. Ihre Expertise in der Produktion von hochpräzisen, technologisch anspruchsvollen Komponenten könnte ihnen helfen, in den Bereich der Photovoltaikmodul-Herstellung einzusteigen, insbesondere im Bereich der Herstellung von Solarkomponenten mit integrierten elektronischen Systemen Infineon Austria, ein Tochterunternehmen von Infineon, ist im Bereich der Halbleitertechnologie tätig und entwickelt unter anderem Leistungshalbleiter, die für die Steuerung von Photovoltaiksystemen wichtig sind. Sie könnten in die Herstellung von intelligenten Photovoltaikmodulen einsteigen, die auf fortschrittlichen Leistungshalbleitern basieren.

Komponente	Potentielle österreichische Hersteller
	Christof Industries bietet Lösungen im Maschinen- und Anlagenbau und hat Erfahrung in der Entwicklung von hochspezialisierten Produktionsanlagen. Sie könnten in der Lage sein, Produktionslinien für Photovoltaikmodule zu entwickeln oder sich direkt an der Herstellung der Module beteiligen, indem sie ihre Anlagen für die PV-Produktion nutzen. EV Group ist ein führender Anbieter von Fertigungslösungen für Halbleiter und Mikroelektronik. Sie sind Experten in der Entwicklung von Wafer-Bonding-Technologien und könnten diese Fertigungsprozesse auf Photovoltaikzellen anwenden, um effiziente PV-Module zu entwickeln. Andritz ist ein global tätiger Maschinen- und Anlagenbauer, der unter anderem in der Energiebranche tätig ist. Ihre Expertise im Bereich der Anlagenentwicklung und Automatisierung könnte es ihnen ermöglichen, Produktionsprozesse für Photovoltaikmodule zu implementieren. Liebherr ist ein führender Hersteller von Baumaschinen, aber auch im Bereich von automatisierten Produktionsprozessen und Robotik aktiv. Ihre technologischen Fähigkeiten könnten auf die Produktion von Photovoltaikmodulen übertragen werden, insbesondere im Bereich der Fertigung von großen PV-Anlagen.
Wechselrichter	Miba Power Electronics ist ein international tätiger Zulieferer für die Automobil- und Energiewirtschaft, spezialisiert auf elektrische Antriebe und Leistungselektronik. Mit ihrem Fokus auf Leistungselektronik und Energiemanagement-Systeme könnten sie sich auch in die Photovoltaikmodul-Produktion einbringen, vor allem bei der Integration von intelligenten Energiesystemen in Solarmodule.

3.2.1.4 Wertstrom der Komponenten

Der Bericht „Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2023“³⁵ gibt einen Überblick über Marktentwicklung, Akteure, Förderung und Entwicklungen in den Bereichen Biomasse, Photovoltaik, Photovoltaik-Batteriespeicher, Solarthermie, Großwärmespeicher, Wärmepumpen, Gebäudeaktivierung, Windkraft und innovative Energiespeicher. Die wesentlichen Aussagen sind im Folgenden zusammengefasst:

2023 wurden in Österreich 2,5 GWp installiert. Photovoltaik deckt inzwischen 10% des österreichischen Strombedarfs.

In Abbildung 4 zeigt die Kostenstruktur für die Herstellung von PV-Modulen aufgeschlüsselt nach Prozessschritten.

³⁵ Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2023: Biomasse, Photovoltaik, Photovoltaik-Batteriespeicher, Solarthermie, Großwärmespeicher, Wärmepumpen, Gebäudeaktivierung, Windkraft und innovative Energiespeicher, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 17a/2024

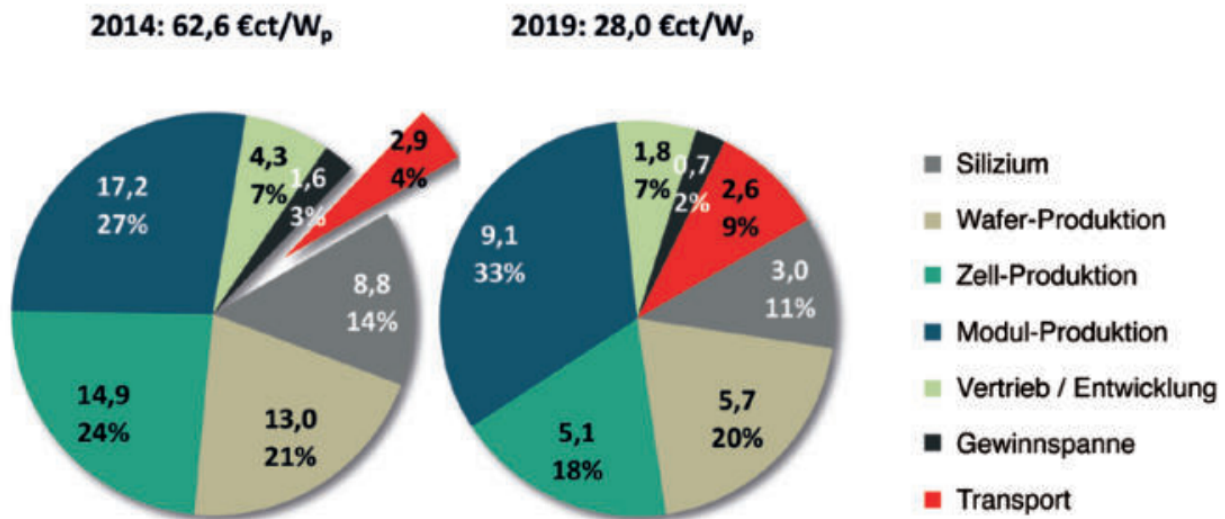


Abbildung 4: Kostenstruktur von PV-Modulen nach Prozessen³⁶

Inflationsbereinigt kostete ein Photovoltaikmodul 1976 noch 100 Dollar pro Watt, 2023 lediglich 37 Cent³⁷. Der mittlere Systempreis für eine netzgekoppelte 5 kWp-Photovoltaikanlage in Österreich stieg 2022 im Vergleich zu 2021 von 1 543 Euro/kWp auf 1 669 Euro/kWp (exkl. MwSt.)³⁸. Die Kosten für die Herstellung von Photovoltaikmodulen sinken mit steigender Produktionsmenge, was als Lernkurve oder Erfahrungskurve bekannt ist. Diese besagt, dass die Kosten pro Einheit um 20-25% sinken, wenn sich die kumulierte Produktionsmenge verdoppelt.

Größere Hersteller profitieren von Skaleneffekten, da sie effizienter arbeiten und Rohstoffe günstiger einkaufen können. Technologischer Fortschritt durch Investitionen in Forschung und Entwicklung trägt ebenfalls zur Kostenreduktion bei. Ein hoher Wettbewerbsdruck zwingt die Hersteller, kontinuierlich nach Kostensenkungspotenzialen zu suchen.

Die genaue Kostensenkung hängt von Faktoren wie Produktionskapazität, Technologien und Marktsituation ab. Generell sinken die Herstellungskosten von Photovoltaikmodulen signifikant mit zunehmender Kapazität, typischerweise um 20-25% pro Verdopplung der Produktionsmenge.

Ein Vergleich der Wertströme der fünf betrachteten erneuerbaren Energietechnologien ist in Tabelle 28 zusammengefasst.

Die Gesamtkosten einer Photovoltaikanlage bestehen aus mehreren Komponenten:

- Modulkosten: 40% bis 60% der Gesamtkosten.
- Wechselrichter: 10% bis 15%.
- Installationskosten: 15% bis 30%.
- Weitere Kosten: Aufschläge des Großhandels, Aufschläge des Installateurs, Genehmigungen, Netzanschluss und Betriebskosten.

Eine Studie analysierte die Herstellungskosten anhand von Finanzdaten führender Unternehmen wie Yingli Green Energy, Trina Solar und Jinko Solar. Unternehmen mit weniger als 0,5% Marktanteil oder ohne öffentliche Finanzdaten wurden ausgeschlossen. Die Analyse zeigt signifikante Kostensenkungen zwischen

³⁶ Bett, A., Erneuerbare Energie – Chancen einer industriellen Wertschöpfung in Europa, FVEE Themen 2020

³⁷ NREL, Solar Installed System Cost Analysis, <https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/solar-installed-system-cost.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

³⁸ Bierbauer, P., Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2022, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 36a/2023

2008 und 2013, die nicht nur auf den Rückgang der Polysiliziumpreise zurückzuführen sind. Unter Berücksichtigung des Anlagenmaßstabs schätzen die Autoren eine Lernkurve von 74% für die Herstellungskosten in diesem Zeitraum.³⁹

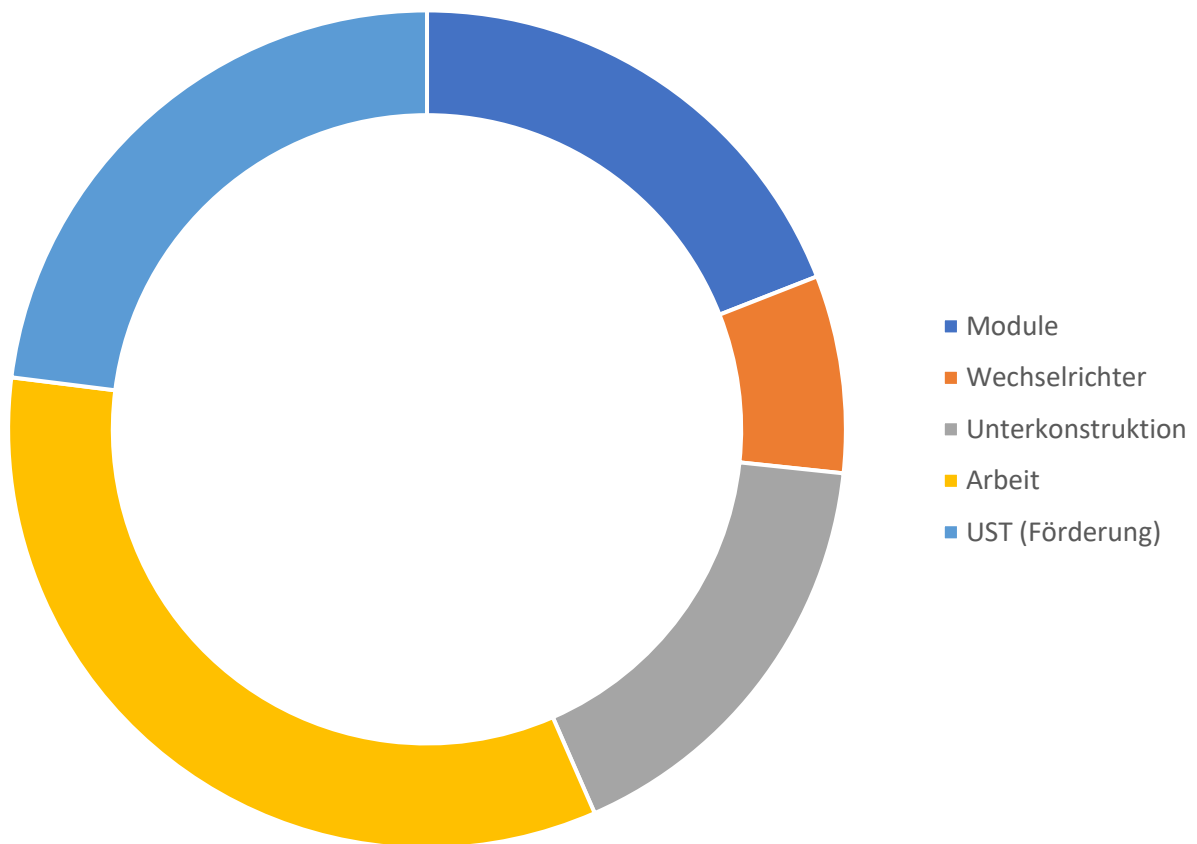


Abbildung 5: Kostenstruktur von PV-Anlagen⁴⁰

Die Abbildung 5 zeigt das Ergebnis konkreter eigener Analysen von Angeboten aus dem Bereich von privaten Installationen für Aufdach-Anlagen mit 10 kWp Leistung 2024. Sie dokumentieren eine relativ geringere Relevanz der Modulkosten und höhere Bedeutung der Installationskosten in diesem Bereich.

Die Baukosten für eine integrierte 1-GW-PV-Modulfabrik variieren zwischen 100 und 300 Millionen USD, abhängig von Standort, Technologie und Marktbedingungen. Wichtige Kostenfaktoren sind:

- Boden und Gebäude: 20 bis 50 Millionen USD.
- Fertigungseinrichtungen: 50 bis 150 Millionen USD.
- Versorgungsanlagen: 10 bis 30 Millionen USD.
- Ersteinrichtung und Schulung: 10 bis 20 Millionen USD.
- Erstversorgung mit Rohstoffen: 10 bis 50 Millionen USD.
- Kosten der Behördenverfahren und Auflagen: 10 bis 20 Millionen USD.

Beispiele:

³⁹ Reichelstein, S., Cost- and Price Dynamics of Solar PV Modules, 2015

⁴⁰ Bett, A., Erneuerbare Energie – Chancen einer industriellen Wertschöpfung in Europa, FVEE Themen 2020

- LONGi Solar errichtete 2020 eine 5-GW-Fabrik in China für etwa 330 Millionen USD (ca. 70 Millionen USD pro GW).
- First Solar plant den Bau einer 3,3-GW-Fabrik in Ohio, USA, mit 680 Millionen USD (etwa 206 Millionen USD pro GW).

In Österreich wurden in den letzten Jahren erhebliche öffentliche Fördermittel für Photovoltaikanlagen bereitgestellt, darunter rund 50 Millionen Euro im Jahr 2021 durch den Klima- und Energiefonds. Das Ökostromgesetz garantiert Einspeisevergütungen für PV-Anlagen. Die gesamten öffentlichen Ausgaben für PV könnten in den letzten zehn Jahren Hunderte von Millionen Euro betragen haben.

Beobachtung: Es gibt bei der Entwicklung der PV-Kosten starke Lernkurveneffekte. Die Relevanz von Skaleneffekten wird in der Literatur unterschiedlich wichtig eingeschätzt.

Beobachtung: Der Mittelbedarf für eine integrierte PV-Herstellung in Österreich übersteigt (wahrscheinlich) die Möglichkeiten der involvierten Betriebe.

3.2.1.5 Vertrieb und Installation

In Österreich gibt es ca. 400 Anbieter von Photovoltaikanlagen.⁴¹ Smatrics⁴² bietet die Integration mit E-mobility. Dazu gibt es auch Dienstleister, wie die PV-Invest GmbH, die Solarparks betreibt und entwickelt, und die Investitionen über Anleihen finanziert.

3.2.2 End of life - Kreislaufwirtschaftsoptionen

Photovoltaikmodule haben typischerweise eine Lebensdauer von 25 bis 30 Jahren oder mehr, wobei Hersteller garantieren, dass sie nach 25 Jahren noch 80-90% ihrer ursprünglichen Leistung erbringen. Die jährliche Degradationsrate liegt bei etwa 0,5%, sodass die Module nach 20 Jahren noch rund 90% ihrer Leistung aufweisen können, abhängig von Qualität und Wartung. Wechselrichter hingegen müssen oft nach 10 Jahren ersetzt werden.

Kupfer und Aluminium sind beide zu 100% recycelbar. Kupfer hat eine hohe Recyclingquote von 40-50% in der EU und den USA und wird weltweit jährlich mit etwa 8,5 Millionen Tonnen recycelt. Aluminium kann unbegrenzt recycelt werden und benötigt nur 5% der Energie für die Herstellung aus Roherz, wodurch es einen wichtigen Bestandteil der Kreislaufwirtschaft darstellt. Die Recyclingquote für Aluminiumprodukte liegt weltweit bei etwa 60-65%, wobei einige Länder Quoten von bis zu 97-99% erreichen.

Trinasolar⁴³ hat 2024 das weltweit erste vollständig aus recycelten Materialien hergestellte c-Si-Photovoltaikmodul entwickelt. Mit 37 Patenten im Bereich Modulrecycling hat das Unternehmen eine innovative Recyclingtechnologie entwickelt, die Materialien wie Silizium, Silber, Aluminium und Glas aus Altmodulen nutzt. Dieses Modul, das im Golden-Size-Design mit n-Typ-TOPCon-Technologie gefertigt wurde, erreicht einen Modulwirkungsgrad von 20,7% und eine Leistung von über 645 W. Zurzeit laufen in Österreich

⁴¹ Photovoltaic Austria, <https://pvaustria.at/pv-profi/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁴² SMATRICES, <https://smatrics.com/de>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁴³ Trisolar, Trinasolar produces world's first fully recycled c-Si module, <https://www.pv-tech.org/industry-updates/trinasolar-produces-worlds-first-fully-recycled-c-si-module/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

FFG-gestützte Forschungsprojekte zum Recycling von Photovoltaikmodulen (Projekt PURE, PVRevalue). Einen Überblick über Recycling von Photovoltaikmodulen gibt die Masterarbeit von Benedik und Luidold⁴⁴.

Der Schlüssel für ein effizientes Recycling liegt in der sauberen Trennung der Komponenten durch Robotik und die Anwendung ausgefeilter Hydrometallurgie.

3.2.3 Zukünftige Technologien

Zukünftig werden innovative Technologien wie Dünnschichttechnologie und bifaziale Module⁴⁵ immer wichtiger werden. EcoSolifer bietet schlüsselfertige PV-Lösungen basierend auf Dünnschichtabscheidung. Forschung und Entwicklung sind in Ungarn angesiedelt.

Bifaziale Module maximieren den Solarertrag, indem sie nicht nur das Licht auf der Vorderseite, sondern auch auf der Rückseite, einschließlich reflektierter Photonen vom Untergrund, in Strom umwandeln. Besonders energieintensiv sind die Produktionsstufen Polysilizium sowie Ingots und Wafer.

Neueste Entwicklungen, die in mehreren Review-Papers⁴⁶ zusammenfassend beschrieben sind, beinhalten Wafer-Slicing-Technologien und Anlagen für ultradünne Wafer (50 Mikrometer), die die Effizienzgrenze von 25% durch innovative Herstellungsverfahren und kostengünstigere Materialien überwinden. Zudem werden hocheffiziente Modultechnologien eingesetzt, um die Gesamtkosten von PV-Anlagen zu senken.

Die Branchentrends verschieben sich von p-Si-passivierten Emitter- und Rear-Polysilizium-Designs (PERPoly) hin zu TOPCon-Architekturen. Neue Technologien sind: Vanadiumoxidfilme, Übergangsmetalloxide, Optimierung des hohen Flächenverhältnis der Metallfinger in bifazialen verkupferten kristallinen Silizium-Solarzellen, dünne Schichten aus CdSe:Cu-Legierungen, Hybride organisch-anorganische Halogenide in Perowskit-Solarzellen, Optimierung von MASnI₃ als Absorber.

Die Abbildung 6 zeigt Potenziale zur Steigerung der Materialeffizienz in der Produktion von Photovoltaikmodulen.

⁴⁴ Montanuniversität Leoben, [https://pureadmintest.unileoben.ac.at/portal/de/publications/recyclingkonzepte-fur-photovoltaikmodule\(d0ad778a-4ec7-4104-9643-c5f4ce324973\).html](https://pureadmintest.unileoben.ac.at/portal/de/publications/recyclingkonzepte-fur-photovoltaikmodule(d0ad778a-4ec7-4104-9643-c5f4ce324973).html), abgerufen am 30. Dezember 2024

⁴⁵ Ecosolifer, Powering the next solar revolution, <https://www.energytechreview.com/ecosolifer>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁴⁶ Dada, M., Popoola, P. Recent advances in solar photovoltaic materials and systems for energy storage applications: a review. Beni-Suef Univ J Basic Appl Sci 12, 66 (2023). <https://doi.org/10.1186/s43088-023-00405-5>

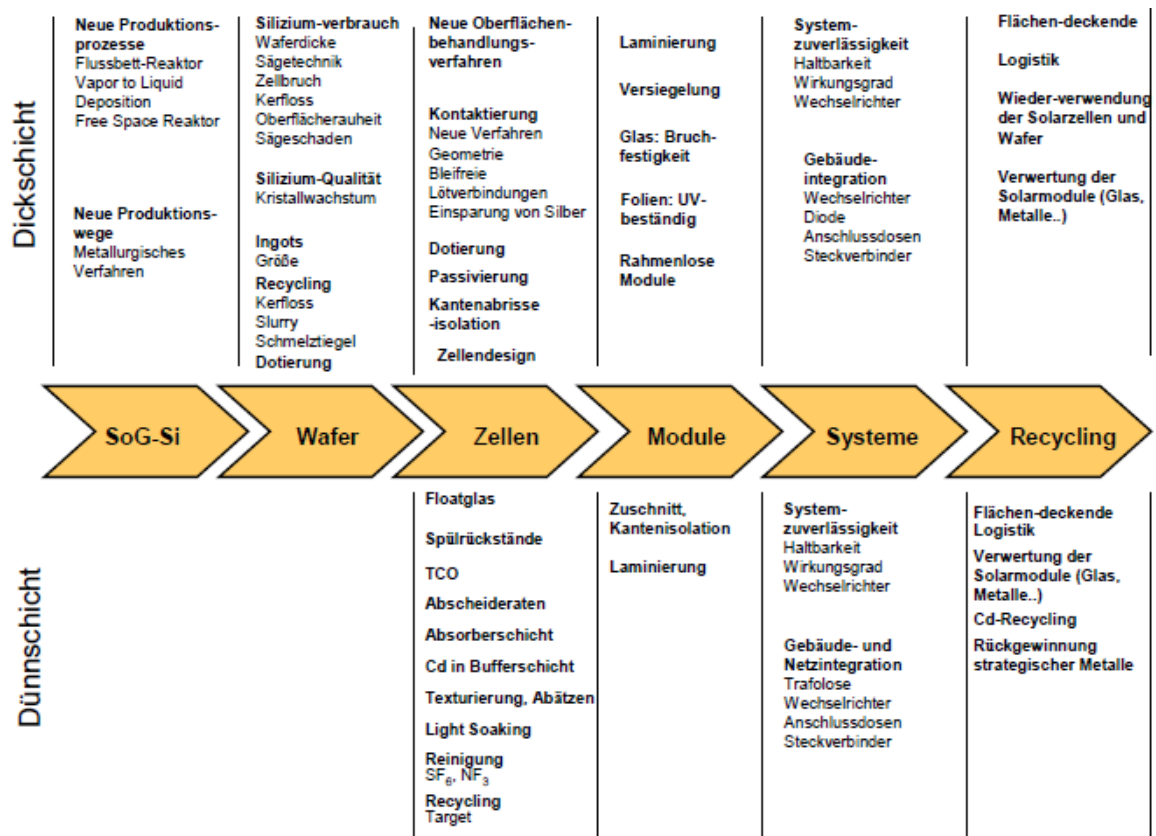


Abbildung 6: Potenziale für Materialeffizienz⁴⁷

Beobachtung: Neue Branchentrends müssten sich in der österreichischen Forschungslandschaft widerspiegeln. Die von der FFG geförderten Projekte sind abrufbar.⁴⁸ In Summe wurden ca. 500 für erneuerbare Energien relevante geförderte Projekte identifiziert. Für die Fertigungsüberleitung ist AWS⁴⁹ zuständig.

3.2.4 Stakeholder in Österreich

Der Verein Technologieplattform Photovoltaik Austria wurde im Mai 2008 gegründet. Die Mitglieder sind in Österreich produzierende Betriebe im Bereich der Photovoltaik und die relevanten österreichischen Forschungseinrichtungen. So will die heimische Photovoltaikwirtschaft Innovation und Forschung verstärken, um die österreichischen Wertschöpfungsanteile am globalen Photovoltaikmarkt zu vergrößern und Österreich als starken Partner bei der Weiterentwicklung der europäischen Solarindustrie zu positionieren.

⁴⁷ Behrendt, S., et al Ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+ Arbeitspaket 9 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes), Wuppertal, November 2010

⁴⁸ FFG Projektdatenbank. <https://projekte.ffg.at/projekt?go=1&q=W%C3%A4rmepumpe&thema%5B%5D=1>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁴⁹ aws Energie & Klima - spezielle Konditionen/Bedingungen: aws Fertigungsüberleitung von Energie- und Umwelttechnologien bei Start-ups, <https://www.aws.at/aws-energie-klima/aws-fertigungsueberleitung-von-energie-und-umwelttechnologien-bei-start-ups/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

AEROCOMPACT® AEROCOMPACT Europe GmbH www.aerocompact.com	Unterkonstruktion für PV-Module	energetica Future made in Austria Energetica Industries GmbH www.energetica.at	PV-Modulhersteller	KANSAI HELIOS KANSAI HELIOS Austria GmbH www.kansai-helios.at	Reparaturlösung für Backsheetfolien & Entwicklung von OEM-Beschichtungen für Front- & Backsheetfolien	Sonnenkraft Sonnekraft GmbH www.sonnekraft.com	Systemanbieter für PV-Module (Glas-Folie & Glas-Glas), Solarkollektoren, Stromspeicher, Zubehör wie Wechselrichter und Befestigungen
ALUMERO ALUMERO Systematic Solutions GmbH www.alumerogroup.eu	PV-Montagesysteme aus recyceltem Aluminium	ERA ERA-Elektrotechnik Ramsauer GmbH www.era.co.at	Schalterschrankbau, Sammel-schrank, Generatorschluss-kästen, PV-Netzumschaltbox mit Zählerplattenmontage	Lenzing Plastics Lenzing Plastics GmbH & Co KG www.lenzing-plastics.com	Hersteller PV-Einkapselungsfolien mittels Interferenzpigmenttechnologie	SSE Energy SSE GmbH www.sse-energy.com	Produktion von Indach PV-Modulen
ASKI ASKI Industrie Elektronik GmbH www.aski-energy.com	Hard- & Software, PV-Parkregelung, Photovoltaik Optimierung, Energiedatenmanagement- und Monitoring	ertex ertex solartechnik GmbH www.ertex-solar.at	PV-Module für die Gebäude-Integration	MGT-essys MGT-essys GmbH www.mgt-essys.at	Gebäudeintegrierte PV-Elemente	sto sto Ges.m.b.H. www.sto.at	Fassadensysteme
ATB BECKER ATB Becker www.atb-becker.com	Fachgroßhandel, Planungen B2B, PV-Ausbildungen	e-term e-term Handels GmbH www.e-term.at	Verteilerschränke	MOON MOON POWER GmbH www.moon-power.com	Komplettanbieter in Sektoren: Photovoltaik, Ladeinfrastruktur & Energiespeicher inkl. Planung & Realisierung bis hin zu Betriebsführung & Wartung	SUNPLUGGED Sunplugged-Solare Energiesysteme GmbH www.sunplugged.at	Entwicklung flexibler Photovoltaikfolien
Banner Banner GmbH www.bannerbatterien.com	Speicherbatterien für Photovoltaik	Fronius Fronius International GmbH www.fronius.com	Wechselrichter, digitale Tools zur Planung, Inbetriebnahme, Wartung und Servicing	Mounting Solutions Mounting Solutions PV Systems GmbH www.mounting-solutions.com	Unterkonstruktion für PV-Module	tele TELE Haase Steuergeräte Ges.m.b.H. www.tele-online.com	Netz- und Anlagenschutz, Digitale Services, IoT Lösungen
BOREALIS Borealis AG www.borealisgroup.com	Grundmaterialien für Backsheets und Einkapselungsfolien	GS Technik GS Technik Produktions- und Vertriebs GmbH www.gstechnik.com	Freistehende 2-achsig nachgeführte PV-Systeme – Suntracker	MYPV my PV GmbH www.my-pv.com	Entwicklung und Herstellung von Photovoltaikwärmelösungen (Warmwasser & Heizung)	Ullrich Ulrich of Austria GmbH www.pvtrb.com	Produktion von Zellen- und Randverbinder
Calma-Tec Lärmschutzsysteme GmbH www.calma-tec.com	PV-Lärmschutzsysteme	HABEMAX Habemax GmbH www.habemax.com	Anschlussdose für gebäudeintegrierte Solarmodule (BIPV)	neocom neocom international gmbh www.neocom.com	Hardware- und Softwareprodukte, Digitale Services, Projektierungs- und Projektionen für erneuerbare Energiesysteme, Energiespeicher- und Energiemanagementsysteme	voestalpine voestalpine KREMS GmbH www.voestalpine.com/krems/de/	Rahmprofilen, Pfostenverlängerungen, Sparren, Modultträger & Zentralrohre (bei Trackersystemen)
DAS Energy DAS-Energy GmbH www.das-energy.com	Produktion von leichten und flexiblen Photovoltaikmodulen	hei HEI Technology International GmbH www.hei.at	Herstellung von solaren Außenbeleuchtungen, Photovoltaik-Sondermodule	PREFA PREFA GmbH www.prefa.at	Unterkonstruktion für PV-Module, Hersteller Indach PV-Systeme	weiser profile Weiser Profile Austria GmbH www.weiser.com	Unterkonstruktion für PV-Module
EET EET – Efficient Energy Technology GmbH www.eet-energy.com	Photovoltaik- und Speicherlösungen zum Selbststecken. Geeignet für Balkon, Garten, Flachdach oder Fassade	hema hema rack GmbH www.hema-rack.com	Unterkonstruktion für PV-Module	blechbau Reinhard Eder Blechbauges.m.b.H. www.eder-blechbau.at	Fertigung von Indachsystemen für PV-Module und Solar-Kollektoren, Fertigung und Montage von PV-Fassadensystemen	xelctrix Xelctrix Power GmbH www.xelctrix-power.com	Komplettssysteme von Batteriespeicher auf LiFePO4 Basis inklusive Software und Systemarchitektur
ELSTA ELSTA Mosdorfer GmbH www.elsta.com	AC-Sammelschrank mit NA-Schutz, Fernwirk-schrank, Kabelverteilerschrank, Wanderschrank, Kompakt-Transformatorstationen	HILBER SOLAR Hilber Solar www.hilbersolar.com	Produktentwicklungen im Bereich Photovoltaik-Komplett-systeme, netzunabhängige Systeme und Sonderlösungen	RHP RHP-Technology GmbH www.rhp.at	Entwicklung und Produktion von Sonderwerkstoffen wie Sputtertargets für die Dünnschichtanfertigung sowie elektrisch leitfähige Pasten und Tinten	3F SOLAR 3 F Solar GmbH www.3f-solar.at	Hybridkollektoren und Solarkonzepte
ENcome ENcome Energy Performance GmbH www.en-come.com	Betriebsführung und Wartung, Technisches Asset Management, Engineering & Advisory, Monitoring Systeme	IMMOLEC Immolect www.photovoltaik-verklebung.at	Photovoltaikmodul-Verklebung, Produkte zur Reinigung und Abdichtung	SOLOCEAN SolOcean GmbH www.soloccean.energy	Entwicklung von Floating-PV		

Abbildung 7: Photovoltaik Akteure in Österreich

Einen guten Überblick über involvierte Forschungsinstitute und Firmen gibt die Broschüre „Photovoltaik Industrie und Forschung in Österreich“⁵⁰:

Österreichs Teilnahme am Photovoltaikprogramm der Internationalen Energieagentur IEA-PVPS (www.iea-pvps.org) ist entscheidend für die Integration internationaler Forschungsaktivitäten in die heimische Photovoltaik-Innovationsszene. Aktuell ist Österreich an 6 von 8 laufenden Forschungsprojekten beteiligt und leitet den Task „Solar PV in the 100% RES Power System“ (Task 14). Die österreichischen Experten arbeiten zudem an Themen wie Netzintegration, PV-Analysen (Task 1), Nachhaltigkeit (Task 12), Leistungsbeurteilung und Zuverlässigkeit von PV-Systemen (Task 13), PV-Bauwerksintegration (Task 15) sowie solaren Ressourcen (Task 16).

Dieses internationale Forschungsnetzwerk umfasst etwa 300 Forscher aus rund 30 Ländern und gilt als eines der größten und erfolgreichsten Technologiekooperationsprogramme der IEA. Die strategische Leitung wird seit etwa zehn Jahren von einem österreichischen Vertreter übernommen. Die Ergebnisse und Kooperationen aus diesem Netzwerk fließen direkt in die österreichische Innovationslandschaft ein, wobei die österreichische Technologieplattform Photovoltaik (TPPV) eine koordinierende Rolle spielt.

⁵⁰ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, PHOTOVOLTAIK Industrie und Forschung in Österreich 2024

Tabelle 9: Forschungsinstitutionen zu Photovoltaik in Österreich

Organisation	Themen
AIT	AIT Energy beschäftigt sich u.a. mit Methoden der mechanischen, thermischen, elektrischen und optischen Charakterisierung und Simulation in der Photovoltaik. Das Leistungsportfolio deckt die gesamte Wertschöpfungskette ab, von der Qualitätssicherung von Photovoltaik-Anlagen, -Modulen und -Komponenten über die datengestützte Leistungs- und Fehlerdiagnose von PV-Anlagen bis hin zur Technologieentwicklung für Solarzellen der nächsten Generation. Schwerpunkte sind: Zertifizierte Prüfung von PV-Modulen, Auftragsforschung im PV-Produktentwicklungsbereich, Performance & Reliability, BIPV sowie neue Technologien und Prozesse
FH Oberösterreich	Die Forschungsgruppe ASIC der Fachhochschule Oberösterreich Campus Wels, beschäftigt sich mit Bewusstseinsbildung für erneuerbare Energieträgern im Allgemeinen und der Intensivierung der Forschung im Bereich der Solartechnik im Speziellen verschrieben hat. Im Photovoltaikbereich liegt ihr Fokus in der Anwendung, Simulation und optimierten Integration von Photovoltaik in Energiesysteme unterschiedlicher Größenordnungen.
FH Salzburg	Das interdisziplinäre Forschungs- und Transferzentrum der FH Salzburg/smart Building und der RSA Studio ISPACE befasst sich Simulation und Umsetzung von Maßnahmen, bei denen Gebäude im Kontext ihres Standortes und der umgebenden Infrastrukturnetze verstanden werden. Schwerpunkt in Bezug auf Photovoltaik sind Gebäudeintegrierte Photovoltaik, Photovoltaik im öffentlichen Raum und Power2Gas mit Wasserstoff als Speicher und Energieträger.
Johannes-Kepler-Universität (JKU)	Die Johannes-Kepler-Universität (JKU) Linz ist in verschiedenen Bereichen der Forschung und Lehre im Kontext erneuerbarer Energien aktiv. Die Universität setzt Schwerpunkte auf die Entwicklung und Optimierung innovativer Technologien, die den Übergang zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft unterstützen. Insgesamt leistet die Johannes-Kepler-Universität Linz durch Forschung, Lehre und Kooperationen einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung erneuerbarer Energien und fördert so den Wandel hin zu einer nachhaltigeren Energiezukunft.
Montanuniversität Leoben - PCCL	Die Polymer Competence Center Leoben GmbH (PCCL) ist das führende Zentrum für kooperative Forschung in der österreichischen Kunststofftechnik. Gemeinsam mit Partnern aus der Industrie und Universitäten wie der Montanuniversität Leoben und den Technischen Universitäten Graz und Wien entwickeln etwa 100 hochqualifizierte Mitarbeiter innovative Kunststofflösungen. Die Forschungsprojekte decken ein breites Anwendungsspektrum ab, von der Automobil- und Luftfahrtbranche über Verpackung bis hin zu Solar- und Photovoltaikanwendungen.
OVI	Der Österreichische Verband der Immobilienwirtschaft (ÖVI) ist seit 1979 eine unabhängige Vereinigung, die die Interessen der Immobilienbranche vertritt. Unter seinem Dach vereinen sich Immobilienmakler, Verwalter, Bauträger und Sachverständige, die sich einem strengen Ehrenkodex verpflichten. Der Verband bietet fachliche Unterstützung und engagiert sich in der Medienarbeit sowie im Lobbying auf nationaler und internationaler Ebene. Der ÖVI ist als wichtige Stimme der Immobilienwirtschaft anerkannt und in politischen, wirtschaftlichen und bildungsrelevanten Entscheidungen aktiv involviert. Kooperationen mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft stärken seine Effizienz und Reichweite.
Silicon Austria Labs GmbH	SAL deckt als F&E Partner die gesamte Entwicklungskette im Bereich elektronikbasierter Systeme ab. Dies umfasst Themen wie System- und Sensorintegration insbesondere zur Qualitätssicherung in der Produktion, sowie gedruckte Elektronik, organische Solarzellen und Energiespeichertechnologien. Zu den

Organisation	Themen
	Schwerpunkten der Forschung gehören die Charakterisierung von PV-Modulen, die Entwicklung von Sensoren für das Monitoring von PV-Modulen und Anlagen, insbesondere für prädiktive Wartungsmodelle, die maßgeschneiderte Anpassung von Technologien an spezielle Umweltbedingungen sowie die Optimierung von Prozessen für die Produktion auf flexiblen Substraten.
TU Graz	Das Institut für Chemische Technologie von Materialien (ICTM) der TU-Graz beschäftigt sich mit der Synthese, Charakterisierung und Anwendung neuer Materialien im Bereich der Elektrochemie und chemischen Energiespeicherung (z.B. Lithiumionenakkumulatoren), der Funktionskeramik, der Polymerchemie und der Photovoltaik. Im Bereich der Photovoltaik fokussiert sich das ICTM auf die Herstellung und Erforschung neuer Absorbermaterialien, wie z.B. organische Solarzellen, Perowskitesolarzellen und Metallsulfid-basierte Technologien. Folgende Schwerpunkte werden bearbeitet: Forschung und Entwicklung neuer Materialien für die Dünnschicht-PV, anorganisch-organische Hybridsolarzellen, die Herstellung von Metallsulfid-Nanopartikel, Synthese konjugierter Polymere, Herstellung und Charakterisierung von Hybridsolarzellen auf Glas und auf flexiblen Substraten.
TU Wien	Das Institut für Sensor- und Aktuatorssysteme verfügt über bestausgestattete Forschungslabore für Mikrosystemtechnik, Nanotechnologien, Werkstoffwissenschaften und Dünnschichttechnik sowie über Software für Computer-Simulation. Das Institut setzt zudem Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der PV-Solarzellen/-module (z.B. numerische Modellierung & Simulation, Technologieentwicklung und Dünnschicht-Charakterisierung).

In Österreich wurden folgende Projekte mit Unterstützung des Klima- und Energiefonds erfolgreich umgesetzt:

In „Sustainable Photovoltaics“ „Nachhaltige Photovoltaik - PVRe²“ beschäftigt man sich mit nachhaltigem Recyceln, der Weiterentwicklung und auch dem Instandsetzen von defekten Photovoltaik Modulen.

Ziel des Projekts BI-FACE war die Entwicklung innovativer bifacial-Module und -Systeme für Flachdächer. Drei neuartige Varianten für bifaciale Module und Systeme wurden in drei verschiedenen Klimazonen getestet: subtropisch (Zypern), gemäßigt (Österreich) und maritim gemäßigt (Niederlande).

Das Projekt Infinity erforscht Photovoltaik Systeme in unterschiedlichen Klimazonen. Die Forscher analysieren Fehlerquellen und Degradationsprozesse existierender PV Materialien, Komponenten und Module. Die Erkenntnisse daraus können dann in Anpassungen entlang der Wertekette, etwa bei den Einbettungsfolien, Verbindungsdrähten, Wechselrichtern, etc. einfließen. Ziel ist es, das gesamte Modul durch anwendungsbezogene Lösungen zu verbessern.

Forschungsprojekte in Österreich beschäftigen sich zur PV vorwiegend mit Systemintegration und Aspekten der Anwendung.

In Österreich bieten verschiedene Einrichtungen Ausbildungen im Bereich Photovoltaik an, darunter Fachhochschulen, private Schulungsanbieter und Handwerkskammern. Hier sind die wichtigsten Anbieter:

- Technische Universität Wien (TU Wien): Studiengänge und Weiterbildung in erneuerbaren Energien und nachhaltigen Energiesystemen.
- FH Technikum Wien: Bachelor- und Masterprogramme zu erneuerbaren Energien und Photovoltaik.
- FH Salzburg: Studiengänge mit Fokus auf Nachhaltigkeit und Photovoltaik.

Zusätzlich bietet das WIFI in mehreren Bundesländern Photovoltaik-Kurse an, darunter:

- Grundkurse zur Photovoltaik-Technologie.
- Planung und Errichtung von Photovoltaikanlagen für Techniker und Ingenieure.
- Vertiefende Ausbildung für Photovoltaik-Techniker.

Das bfi bietet ähnliche Schulungen für Berufseinsteiger und Fachkräfte im Bereich erneuerbare Energien an.

Das österreichische Solar-Netzwerk veranstaltet spezifische Workshops in Zusammenarbeit mit Herstellern und Experten.

Der Bundesverband Photovoltaic Austria bietet Seminare und Fortbildungen für Fachleute und Unternehmen an.

Einige HTLs wie die HTL Pinkafeld und HTL Hollabrunn haben spezielle Kurse in Elektrotechnik und erneuerbaren Energien, einschließlich Photovoltaik.

Zudem bieten viele Installateurschulen Fortbildungskurse für Elektrotechniker zur Planung und Installation von Photovoltaikanlagen an. Zertifizierungen wie der „Zertifizierte Photovoltaik-Techniker“ werden von verschiedenen Institutionen angeboten, um tiefere technische Kenntnisse zu vermitteln.

3.2.5 Chancen und Risiken für potentielle österreichische Hersteller

Es lassen sich folgende Chancen angeben:

- Die Kostenstruktur hat sich in den letzten 10 Jahren verschoben und Logistikkosten werden relevant
- CO₂-Bepreisung erbringt Vorteile für europäische Produktion
- Entwicklung neuer PV-Modultechnologien ermöglicht den Einstieg für neue Akteure
- Der Wissenschaftsstandort Österreich ist im Segment Photovoltaik stark, weil eine breite Wissensbasis vorhanden ist

Der Forschungsbedarf für Österreich wurde von der Technologie Plattform Photovoltaik folgendermaßen definiert⁵¹:

1. Erhöhung der Innovationskraft, Steigerung der Marktreife neuer, innovativer Technologien sowie der Wettbewerbsfähigkeit heimischer Firmen, durch Anheben der Förderkontingente für Photovoltaik.
2. Systemlösungen bei Verbindung mit Verbrauchern, oder Energiesystemlösungen und Entwicklung von geeigneten Geschäftsmodellen zur Anhebung der Wertschöpfung aus dem Photovoltaikbetrieb.

Im Detail:

- Bauwerkintegration (Integrationslösungen in Gebäude, Mehrfamilienhäuser und Energiegemeinschaften)
- Produkte für Aktivhäuser in Neubau und Renovierung; Integrationslösungen für verschiedene Bauwerktypen; Optimierung des Ertrags; Standardisierung und Sicherheit; Lösungen für Mehrparteienhäuser und Energiegemeinschaften, lokale Energienetze und Strommarkt Industriegebäude (Hallendächer, Gewerbebetriebe, Industriefassaden), Entfeuchtung;
- Kostensenkung; Kopplung PV-Strom: Produktion, Wärme/Kälte, Speicherung und Strommarkt; Power-2-X; Eigenverbrauchssteigerung; Sanierung und Neubau mit Photovoltaik; Standortsicherung durch Energieversorgung

⁵¹ Technologieplattform Photovoltaik, Photovoltaikforschung Mission 2030 und Green Deals, 2024

- Mobilität (Lärmschutz, Bahntrassen, Straßen und Verkehrsflächen: Integration in Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsflächen, Integration in Lärmschutz, Überdachung von Verkehrsflächen, Integration in Fahrzeuge, Erhöhte Sicherheitsanforderungen, „Vehicle2Grid/Grid2Vehicle“-Lösungen, flexible und hocheffiziente PV-Technologien
- Landwirtschaft (Agrar-Photovoltaik und schwimmende Photovoltaik): Digitalisierung in der Landwirtschaft; Einsatz auf und über Agrar-PV und Floating PV); Power-2-X; Rentabilität in der Landwirtschaft und neue Marktpotentiale durch PV.

Beobachtung: Forschungsbedarf zur Weiterentwicklung von Stärkenfeldern beinhaltet Gebäudeintegration, Kostensenkung, Integration mit Mobilität, Einbindung der Landwirtschaft.

Beobachtung: Auf Forschungsbedarf zur expliziten Material- oder Prozessentwicklung wird in den analysierten österreichischen Studien wenig eingegangen.

In Tabelle 10 wird das Ergebnis der SWOT Analyse für Photovoltaikanlagen dargestellt.

Tabelle 10: SWOT Analyse Photovoltaikanlagen

Stärken Hohe Qualitätsstandards und Innovationskraft Starkes Umweltbewusstsein und politische Unterstützung Kurze Transportwege für den DACH-Markt Gut ausgebildete Arbeitskräfte und Technologiestandort:	Schwächen Hohe Produktionskosten Begrenzter Zugang zu Rohstoffen Sehr hoher Anteil an Importen bei Wafern Kleiner Heimatmarkt Abhängigkeit von Subventionen
Chancen Wachsender europäischer Markt für erneuerbare Energien Technologische Innovationen in der PV-Produktion Umstellung auf „Grüne Energie“ in der Industrie Energieunabhängigkeit und Sicherheit der Lieferketten Verfügbarkeit von „Green Financing“ und ESG-Investitionen	Risiken Starke internationale Konkurrenz Schwankende Rohstoffpreise und Abhängigkeit von Importen Regulatorische Unsicherheiten Mangelnde Infrastruktur für erneuerbare Energien Arbeitskräftemangel und hohe Lohnkosten

Stärken

Hohe Qualitätsstandards und Innovationskraft: Österreich ist bekannt für hohe Qualitätsstandards und eine starke Forschungs- und Entwicklungslandschaft. Dies ermöglicht es österreichischen Unternehmen, qualitativ hochwertige und langlebige PV-Module zu produzieren, die auf dem Markt konkurrenzfähig sind.

Geringere Transportwege für den DACH-Markt: Die zentrale Lage Österreichs in Europa, insbesondere im DACH-Raum, bietet logistische Vorteile und ermöglicht kosteneffiziente und umweltfreundlichere Lieferungen innerhalb Europas.

Gut ausgebildete Arbeitskräfte und Technologiestandort: Österreich verfügt über qualifizierte Fachkräfte und eine starke Technologie- und Maschinenbaubranche, was die Fertigung und die kontinuierliche Verbesserung der Produktionsprozesse unterstützen.

Starkes Umweltbewusstsein und politische Unterstützung: Österreich hat ehrgeizige Ziele für erneuerbare Energien und plant, bis 2030 100% des Stroms aus erneuerbaren Quellen zu beziehen. Das unterstützt die nationale Nachfrage nach lokal produzierten PV-Modulen.

Schwächen

Hohe Produktionskosten: Im Vergleich zu Ländern wie China oder Indien sind die Lohn- und Produktionskosten in Österreich hoch. Dies führt zu höheren Kosten für österreichische PV-Module, wodurch sie international weniger wettbewerbsfähig sind.

Begrenzter Zugang zu Rohstoffen: Österreich ist auf Importe von Rohstoffen wie Silizium und anderen wichtigen Materialien für PV-Module angewiesen. Das führt zu Abhängigkeiten und erhöht das Risiko von Lieferengpässen oder Preisschwankungen.

Kleiner Heimatmarkt: Der österreichische Markt ist relativ klein. Dies bedeutet, dass PV-Produzenten für signifikantes Wachstum auf den Export angewiesen sind, was mit zusätzlichen Kosten und regulatorischen Herausforderungen verbunden ist.

Abhängigkeit von Subventionen: Die Produktion und Nachfrage von PV-Modulen in Österreich werden stark durch Förderungen beeinflusst. Änderungen in der staatlichen Förderung können zu plötzlichen Nachfragerückgängen führen.

Chancen

Wachsender europäischer Markt für erneuerbare Energien: Die Europäische Union setzt vermehrt auf erneuerbare Energien, und es gibt steigende Anforderungen an europäische Produktionen und Lieferketten. Österreichische Unternehmen könnten hiervon profitieren, insbesondere wenn „Made in Europe“ zunehmend gefördert wird.

Technologische Innovationen in der PV-Produktion: Die Entwicklung von neuen, effizienteren Technologien (z.B. bifaziale Module, Dünnschicht-Technologien) eröffnet Chancen für österreichische Hersteller, sich durch Qualitäts- und Effizienzvorteile zu differenzieren.

Umstellung auf „Grüne Energie“ in der Industrie: Die wachsende Nachfrage nach grünen, nachhaltigen Produkten, insbesondere durch große Unternehmen, die klimaneutral werden wollen, könnte die Nachfrage nach lokal produzierten und ökologisch nachhaltigen Modulen steigern.

Energieunabhängigkeit und Sicherheit der Lieferketten: Mit den Störungen globaler Lieferketten steigt die Bedeutung lokaler Produktion. Eine „europäische Lieferkette“ könnte die Nachfrage nach in Europa hergestellten PV-Modulen, einschließlich aus Österreich, fördern.

Verfügbarkeit von „Green Financing“ und ESG-Investitionen: Investoren zeigen zunehmendes Interesse an nachhaltigen Projekten. Österreichische PV-Hersteller könnten diese ESG-Investitionen und grüne Finanzierungen für Wachstum und Forschung nutzen.

Risiken

Starke internationale Konkurrenz: Die globale PV-Produktion wird von Ländern wie China dominiert, die aufgrund von Skaleneffekten und niedrigeren Produktionskosten preisgünstigere Module herstellen können. Dies macht es schwierig für österreichische Hersteller, preislich mitzuhalten.

Schwankende Rohstoffpreise und Abhängigkeit von Importen: Die Preisentwicklung und die Verfügbarkeit von Rohstoffen, wie z. B. Silizium, können zu Kostensteigerungen und Produktionsengpässen führen. Österreichische Hersteller sind hier besonders verwundbar, da wichtige Komponenten importiert werden müssen. Hier müsste man sich über längerfristige Verträge absichern.

Regulatorische Unsicherheiten: Veränderungen in der europäischen oder österreichischen Förderpolitik für Photovoltaik können das Marktumfeld schnell ändern. Neue Regulierungen oder die Reduzierung von Subventionen könnten die Nachfrage dämpfen.

Mangelnde Infrastruktur für erneuerbare Energien: Österreichs Stromnetz ist derzeit nicht optimal auf die Integration großer Mengen an erneuerbaren Energien ausgerichtet. Ohne Investitionen in das Netz und Speichertechnologien könnten PV-Anlagen in ihrer Effektivität eingeschränkt sein.

Arbeitskräftemangel und hohe Lohnkosten: Der Fachkräftemangel und die hohen Lohnkosten in Österreich erschweren den Produktionsausbau. Die Konkurrenz um qualifizierte Arbeitskräfte könnte die Kosten weiter erhöhen und die Produktion verlangsamen.

Diese Analyse zeigt, dass die Produktion von Photovoltaik-Modulen in Österreich einige starke Vorteile in Bezug auf Qualität und Marktpositionierung innerhalb Europas hat. Dennoch gibt es signifikante Herausforderungen, insbesondere in Bezug auf die Kostenstruktur und internationale Konkurrenz. Die Chancen für österreichische PV-Produzenten liegen vor allem in der wachsenden Nachfrage nach lokal produzierten, qualitativ hochwertigen und nachhaltigen Produkten sowie in der Innovationskraft und technologischen Entwicklung.

3.3 Windkraft

3.3.1 Wertschöpfungskette Windkraft

3.3.1.1 Beschreibung der Technologie

1883 wurde das erste Windrad zur Stromerzeugung auf der Internationalen Elektrizitätsausstellung in Wien vorgestellt. Der Österreicher Josef Friedländer war wahrscheinlich der erste Mensch, der mit einem Windrad Strom erzeugte.

Die Hauptbestandteile einer Windkraftanlage sind:

1. Rotorblätter: Aerodynamisch geformte Flügel, die den Wind einfangen und in Drehbewegung umwandeln. Sie bestehen meist aus faserverstärkten Kunststoffen wie GFK oder CFK.
2. Nabe: Der zentrale Teil des Rotors, der die Rotorblätter trägt, meist aus robustem Metall wie Gusseisen oder Stahl gefertigt.
3. Gondel (Nacelle): Das Gehäuse auf dem Turm, das die mechanischen und elektrischen Komponenten schützt.
4. Getriebe: Verbindet die langsame Drehbewegung des Rotors mit der schnelleren Drehung des Generators und übersetzt die Rotordrehung in eine höhere Drehzahl. Es gibt auch getriebelose Windkraftanlagen.
5. Generator: Wandelt die mechanische Energie des Rotors in elektrische Energie um. Er besteht aus einem Rotor und einem Stator und verwendet Materialien wie Kupfer und Eisen.
6. Steuerungssysteme: Überwachen die Windkraftanlage und passen die Einstellungen an, um die Energieerzeugung zu maximieren.
7. Kühlsysteme: Halten die Temperatur in der Nacelle durch Lüfter oder Flüssigkeitskühlung stabil.
8. Turm: Hebt die Nacelle und Rotorblätter in größere Höhen, um stärkere Winde zu nutzen. Türme sind meist aus Stahl, Beton oder einer Kombination beider Materialien.
9. Fundament: Trägt die gesamte Struktur und muss stabil genug sein, um die Lasten durch den Wind sicher abzuleiten.
10. Pitch-System: Steuert den Anstellwinkel der Rotorblätter zur Leistungsoptimierung und schützt bei extremen Winden.
11. Yaw-System: Richtet die Nacelle und Rotorblätter optimal in den Wind aus und verwendet Elektromotoren und Getriebe zur Drehung.
12. Transformator: Erhöht die Spannung des erzeugten Stroms, um Übertragungsverluste zu minimieren.
13. Verkabelung: Leitet den erzeugten Strom vom Generator zum Transformator und muss wetterfest sein.
14. Bremssysteme: Umfassen aerodynamische und mechanische Bremsen zum Stoppen des Rotors bei extremen Bedingungen.
15. Blitzschutzsysteme: Schützen die Anlage vor Blitzeinschlägen, indem sie diese sicher in den Boden ableiten.

3.3.1.2 Materialien (Abbau und Metallurgie)

In Tabelle 11 werden die wesentlichen Materialien zur Errichtung von Windkraftanlagen dargestellt. In der Tabelle sind die kritischen Rohstoffe rot hervorgehoben.

Tabelle 11: Materialien Windkraftanlagen [überprüfen]

Rohstoffe	Input pro Installation	Bedarf für 10 GW [t]	IDEMAT [kg CO _{2e} /kg]	CF [kg CO _{2e} /MW]	CF %
Aluminium	750	3 750	4,7	1 763	0
Baustahl	203 992	1 019 960	0,9	91 796	31
Baustahl verzinkt	719	3 595	0,9	324	0
Beton	800 000	4 000 000	0,22	88 000	29
Chromstahl	33 073	165 365	1,9	31 421	10
EPDM	2 591	12 955	2,4	3 110	0
Epoxidharz	9 999	49 995	2,2	10 999	4
Gfk	18 636	93 180	4,9	45 658	15
Gusseisen	30 970	154 850	1,4	21 679	7
Kupfer	1 530	7 650	3,2	2 448	1
PC	81	405	3,4	138	0
PU	326	1630	3,4	554	0
PVC	557	2 785	2	557	0
Schmieröl	558	2 790	2	558	0
Stahl	55	275	0,9	25	0
Trafoöl	1100	5500	2	1100	0

Für die Produktion von Onshore-Windkraftanlagen macht Stahl etwa ein Drittel des Gesamtgewichts der Anlagen aus. Für jede MW Kapazität werden etwa 100 bis 120 Tonnen Stahl benötigt, während die leistungsstärksten derzeit installierten Onshore-Turbinen sogar nahezu 1 000 Tonnen erfordern. Diese Angaben gelten für Modelle mit Getriebe. Im Gegensatz dazu benötigen getriebelose Windkraftanlagen zusätzlich Seltenerdmetalle wie Praseodym, Dysprosium, Terbium oder Neodym. Komponentenfertigung

Folgende Schritte sind zur Herstellung und Installation von Windkraftanlagen erforderlich:

- Standortanalyse: Vor der Herstellung einer Windkraftanlage wird der Standort ausgewählt. Es wird eine umfassende Analyse der Windverhältnisse, der Umweltbedingungen, der Zugänglichkeit und der Nähe zu bestehenden Infrastrukturen durchgeführt.
- Genehmigungsverfahren: Der Bau einer Windkraftanlage erfordert Genehmigungen von lokalen, regionalen und nationalen Behörden. Diese Verfahren beinhalten oft Umweltprüfungen und die Berücksichtigung von Auflagen.
- Entwicklung von Prototypen: Ingenieure entwerfen verschiedene Prototypen und führen Simulationen durch, um die Effizienz und Stabilität der Windkraftanlage zu testen. Hierbei werden auch die technischen Spezifikationen festgelegt.

Die wichtigsten Teile einer Windkraftanlage sind der Turm, die Rotorblätter, die Nabe und der Generator. Jede dieser Komponenten wird in spezialisierten Fabriken hergestellt.

3.3.1.3 Komponentenfertigung

Rotorblätter werden in der Regel aus glasfaser- oder carbonfaserverstärktem Kunststoff (GFK oder CFK) gefertigt, um leicht und dennoch stabil zu sein. Der Herstellungsprozess umfasst das Spritzguss- oder Vakuum-Infusionsverfahren. In diesem Schritt werden die Formen für die Rotorblätter erstellt, die dann mit Harz und Fasern gefüllt werden. Die Rotorblätter werden verstärkt und anschließend behandelt, um Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten.

Der Turm besteht meist aus Stahl oder Beton und kann als Röhren- oder Segmentkonstruktion gefertigt werden. Die Stahlteile werden durch Schweißen und Formen hergestellt. Beton-Türme werden in Fertigteilen gegossen, die vor Ort montiert werden. Da die Türme oft sehr hoch sind, werden sie in Segmente zerlegt, die dann transportiert werden.

Die Nabe wird in der Regel aus Stahl oder Aluminium gefertigt. Sie wird durch Gießen, Schmieden oder Bearbeiten von Metallblöcken hergestellt. Die Nabe verbindet die Rotorblätter mit dem Generator.

Der Generator wandelt die mechanische Energie des Rotors in elektrische Energie um. Er wird in einer speziellen Produktionslinie hergestellt und beinhaltet häufig Permanentmagnete oder Elektromotoren.

Bei den meisten Windkraftanlagen wird ein Getriebe verwendet, um die Drehzahl des Rotors an die Anforderungen des Generators anzupassen. Die Fertigung erfolgt durch Präzisionsbearbeitung von Zahnrädern und Gehäusen.

Nach der Fertigung aller Komponenten wird die Windkraftanlage montiert:

Der Standort wird zunächst durch das Gießen von Fundamenten und den Aufbau der erforderlichen Infrastruktur, wie etwa Transportwege für die Komponenten, vorbereitet. Die einzelnen Bauteile werden anschließend unter Berücksichtigung spezifischer Transportanforderungen, beispielsweise für lange Rotorblätter, angeliefert. Der Turm wird aus mehreren Segmenten zusammengesetzt, wobei spezielle Krane für eine sichere Montage verwendet werden. Die Rotorblätter werden an der Nabe, die sich an der Turmspitze befindet, befestigt, ebenfalls mithilfe von Kränen. Im nächsten Schritt wird der Generator installiert und mit der Nabe sowie dem Getriebe verbunden. Abschließend erfolgt die Installation der elektrischen Systeme, die den Betrieb der Anlage und die Energieerzeugung ermöglichen.

Nach der Montage wird die Windkraftanlage getestet, um sicherzustellen, dass alle Systeme ordnungsgemäß funktionieren. Dies umfasst die Überprüfung der elektrischen Systeme, der mechanischen Teile und der Steuerungssysteme. Die Windkraftanlage wird an das Stromnetz angeschlossen, um die erzeugte Energie ins Netz einzuspeisen.

Nach der Inbetriebnahme wird die Windkraftanlage kontinuierlich überwacht, um sicherzustellen, dass sie effizient arbeitet und alle Sicherheitsstandards erfüllt. Regelmäßige Wartungsarbeiten sind erforderlich, um die Leistung der Windkraftanlage aufrechtzuerhalten. Dies umfasst Inspektionen, Schmierungen, Austausch von Verschleißteilen und gegebenenfalls Reparaturen.

Am Ende ihrer Lebensdauer werden Windkraftanlagen abgebaut. Einige Komponenten, wie die Metallteile, können recycelt werden, während andere Materialien wie die Rotorblätter speziellen Recyclingverfahren unterzogen werden müssen. Einige Teile der Windkraftanlage können in neuen Projekten wiederverwendet werden.

Die Türme von Windkraftanlagen bestehen in der Regel aus Stahl oder Beton, häufig werden auch Kombinationen beider Materialien verwendet. Bei Anlagen mit Betonturm machen diese Materialien etwa 60 bis 70 Prozent des Gesamtgewichts aus, während bei Stahltürmen der Stahlanteil etwa 20 bis 25 Prozent

beträgt. Hersteller wie Modvion und Timber-Tower entwickeln zudem Holztürme, die eine bessere CO₂-Bilanz aufweisen.

Getriebelose Windkraftanlagen benötigen zusätzlich Seltenerdmetalle wie Praseodym, Dysprosium, Terbium und Neodym. Obwohl sie als „selten“ bezeichnet werden, sind diese Metalle nicht wirklich knapp. Europa ist jedoch stark auf China angewiesen, das im Jahr 2021 etwa 66% des Bedarfs gedeckt hat.

Der aktuelle Stand der industriellen Fertigung in Europa lässt sich folgendermaßen beschreiben:

- Die Fertigungstiefe in Europa wird eher reduziert
- Onshore-Windenergieanlagen haben sich zu einem Massenartikel entwickelt
- Der Markt ist 2023 stark eingebrochen
- Asiatische Anbieter drücken in den europäischen Markt

Laut Vestas⁵² besteht jede Windkraftanlage aus 25 000 Einzelteilen. Vestas führt Lebenszyklusanalysen (LCA) für alle Produkte durch, um die gesamte Wertschöpfungskette von der Rohstoffproduktion bis zum Ende des Lebenszyklus zu bewerten. In der LCA für die V136-4.2-Anlage wird beispielsweise deutlich, dass die Herstellung von Turm, Gondel, Rotorblättern und Fundamenten die größten Umweltauswirkungen hat.

Beobachtung: Wesentliche Aufwände bei Windkraftanlagen entstehen für die Bauwirtschaft, Maschinenbau, Elektrotechnik.

In Tabelle 12 werden die Komponenten von Windkraftanlagen und deren österreichische Hersteller dargestellt.

Tabelle 12: Komponenten von Windkraftanlagen und österreichische Hersteller

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
Blitzschutzsystem	Blitzableiter: Blitzableiter am Turm und an den Rotorblättern zur Ableitung von Blitzeinschlägen Erdungssystem: Erdungsdrähte und -platten zum Schutz vor elektrischen Überspannungen	OBO Bettermann GmbH: Blitzschutzsysteme und Erdungskomponenten DEHN + Söhne GmbH & Co. KG: Blitzableiter und Erdungssysteme speziell für Windkraftanlagen
Dokumentation und Zertifizierung	Bauanleitungen und technische Zeichnungen: Detaillierte Anweisungen zur Montage und zum Betrieb Zertifikate: TÜV- und IEC-Zertifikate, die die technische Sicherheit und Normen der Anlage belegen Wartungsprotokolle: Vorlagen für regelmäßige Wartungs- und Inspektionsberichte	TÜV Austria: Zertifizierungen für Windkraftanlagen nach IEC- und DIN- Normen DNV GL: Zertifizierung und technische Dokumentation für die Sicherheits- und Leistungsbewertung von Windkraftanlagen
Elektrische Komponenten	Leistungsschalter: Schutz der elektrischen Anlage bei Überlastung Transformator: Wandelt die vom Generator erzeugte Spannung auf Netzspannung um (bei großen Windkraftanlagen oft extern platziert) Kabel und Verkabelung:	Schneider Electric Austria GmbH: Leistungsschalter, Transformatoren und Kabel für die interne und externe Verkabelung

⁵² Vestas, Life cycle assessments, <https://www.vestas.com/en/sustainability/environment/lifecycle-assessments>; abgerufen am 30. Dezember 2024

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
	Interne Verkabelung: Hoch- und Niederspannungskabel zwischen Generator, Transformator und externem Netzanschluss Externe Verkabelung: Verbindung der Windkraftanlage mit dem Umspannwerk oder Netzanschluss Überspannungsschutz: Schutz der Anlage vor Blitzschlag und Überspannungen Netzeinspeisegerät: Gerät zur Synchronisierung der Windkraftanlage mit dem Stromnetz (Wechselrichter in kleinen Anlagen, Frequenzumrichter in großen)	ABB Austria GmbH: Transformatoren, Überspannungsschutz und Netzeinspeisegeräte Siemens Energy: Generatoren, Steuerungssysteme und andere elektrische und elektronische Komponenten, die für den effizienten Betrieb von Windkraftanlagen notwendig sind.
Fundament	Betonfundament: Massives Betonfundament, das die Stabilität der Windkraftanlage gewährleistet Bewehrungsstahl: Verstärkt das Fundament Fundamentanker: Schwerlastanker, die den Turm mit dem Fundament verbinden	Strabag SE: Betonfundamente und Bewehrungsstahl für Windkraftanlagen Porr AG: Lieferung und Installation von Fundamenten und Verankerungen für Großprojekte
Gondel (Nacelle)	Hauptwelle: Überträgt die mechanische Energie vom Rotor auf das Getriebe Getriebe: Übersetzt die niedrige Drehzahl der Rotorwelle in eine höhere Drehzahl für den Generator (bei getriebeabhängigen Anlagen) Generator: Wandelt die mechanische Energie in elektrische Energie um; Typen: Asynchron-, Synchron- oder Permanentmagnet-Generator Bremssystem: Mechanische oder hydraulische Bremse zum Stoppen des Rotors bei Bedarf Kupplung: Verbindung zwischen Getriebe und Generator Kühl- und Lüftungssystem: Kühlt den Generator und andere kritische Komponenten Elektronische Steuerungseinheit: Überwachung und Steuerung der Windkraftanlage (inklusive SCADA-System zur Fernüberwachung)	Vestas (über österreichische Vertretungen): Hauptwelle, Getriebe, Generatoren und elektronische Steuerungseinheiten GE Renewable Energy (über österreichische Distributoren): Getriebe und Generatoren, einschließlich Bremssysteme und Kühl-/Lüftungssysteme Siemens Gamesa: Vollständige Gondelkomponenten mit Kupplung und Steuerungselektronik ANDRITZ: Generatoren, Getriebe und Steuerungssysteme Hörbiger: Getriebe und hydraulische Systeme, die in Windkraftanlagen für die Pitch- und Yaw-Systeme (Ausrichtung und Neigung der Rotorblätter) verwendet werden. Liebherr: große Lager und Getriebe, die für die Drehbewegungen der Rotorblätter sowie den Turmaufbau notwendig sind. Miba: hochpräzise Komponenten wie Gleitlager, Reibbeläge und Leistungselektronik, die für den Betrieb von Windkraftanlagen, insbesondere in Getrieben und Generatoren, entscheidend sind. Freudenberg: hochwertige Dichtungen und Lager, insbesondere in den Rotoren und Getrieben.

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
Rotor und Nabe	Rotorblätter: Anzahl (meistens 3), Material (z.B. Glasfaser-verstärkter Kunststoff) Nabe: Verbindungselement, das die Rotorblätter mit der Hauptwelle verbindet Blattverstellmechanismus (Pitchsystem): Hydraulisch oder elektrisch gesteuert, um den Winkel der Rotorblätter zu verändern	ENERCON GmbH (über ihre österreichische Niederlassung): Rotorblätter aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Naben und Blattverstellmechanismen (elektrisch gesteuert) Siemens Gamesa Renewable Energy (über Vertriebspartner in Österreich): Rotorblätter und Blattverstellmechanismen (Pitch-Systeme) LM Wind Power (über internationale Distributoren, Lieferung nach Österreich): Hersteller von Rotorblättern aus Glasfaser- und Kohlefaserverbundwerkstoffen
Steuerungs- und Regelungssystem	Windrichtungsmesser (Anemometer): Misst die Windgeschwindigkeit und -richtung, um die Ausrichtung der Anlage zu steuern Windfahne: Misst die Windrichtung, um die Yaw-Ausrichtung der Gondel zu steuern Yaw-System: Elektrisches oder hydraulisches System zur Ausrichtung der Gondel nach der Windrichtung Steuerungselektronik: Computersteuerungen zur automatischen Regelung der Blattverstellung, Yaw-Ausrichtung und des Betriebs	Nordex Group (über österreichische Partner): Windrichtungsmesser, Yaw-Systeme und Steuerungselektronik Siemens Gamesa: Vollständige Steuerungssysteme inklusive Windfahne und SCADA-Systeme
Transport- und Installationsmaterial	Krane und Hebezeuge: Notwendig für den Aufbau des Turms und die Installation der Rotorblätter Transportfahrzeuge: Spezielle Schwerlasttransporter für die Lieferung der Turmsegmente, Rotorblätter und anderen großen Komponenten Montagewerkzeuge: Spezialwerkzeuge zur Befestigung der verschiedenen Teile	Felbermayr Holding GmbH: Spezialtransporte und Krane für den Aufbau von Windkraftanlagen Prangl GmbH: Transportfahrzeuge, Krane und Hebezeuge für die Installation Liebherr-Krane werden auch beim Aufbau von Windkraftanlagen eingesetzt. Palfinger: spezialisierte Kräne und Hubsysteme, die für die Installation und Wartung von Windkraftanlagen benötigt werden.
Turmsegmente	Stahl oder Beton, unterteilt in mehrere Segmente (je nach Höhe der Anlage) Fundamentverankerungen: Schrauben und Verankerungen für die Befestigung des Turms im Fundament Aufstiegs- und Sicherheitssystem: Leitern, Seile oder Aufzüge für den Zugang zur Gondel	Enercon: Stahl- und Betonturmelemente sowie Verankerungssysteme Max Bögl Wind AG (lieferbar nach Österreich): Beton-Hybrid-Türme und Fundamentverankerungen Gurit: Hersteller von Verbundmaterialien für Windkraftanlagen, einschließlich Turmsegmenten

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
		Voestalpine liefert Materialien und Komponenten für Windkraftanlagen. Sie produziert unter anderem hochfeste Stähle und spezielle Bauteile, die für die Herstellung von Windtürmen und anderen tragenden Strukturen benötigt werden.
Wartungs- und Betriebsausrüstung	Wartungssysteme: Werkzeuge und Ausrüstungen für regelmäßige Inspektionen und Wartungen (z.B. Schmiermittel für Lager, Diagnosegeräte für elektronische Systeme) Sicherheitsausrüstung: Persönliche Schutzausrüstung für Techniker, wie Gurte, Helme, Schutzkleidung	Siemens Gamesa: Wartungssysteme und Diagnosegeräte, inklusive Sicherheitsequipment Enercon: Komplettes Wartungsprogramm mit Inspektions- und Diagnosegeräten Christof Industries: mechanische Komponenten und Services für die Installation und Wartung von Windkraftanlagen an.

Rund 180 österreichische Unternehmen sind im wachsenden Windenergiemarkt tätig⁵³, darunter führende Firmen in den Bereichen Steuerungen, Windkraftgeneratoren und High-Tech-Materialien. Viele dieser Unternehmen sind international aktiv.

In den letzten Jahren haben sich auch Betreiber von Windkraftanlagen verstärkt im Ausland positioniert, insbesondere in Deutschland und Frankreich. Einige Start-ups, wie die Kärntner Green-Tower Entwicklungs-GmbH, entwickeln innovative Windkrafttürme aus Holz, die eine CO₂-Einsparung von 1 000 Tonnen gegenüber herkömmlichen Türmen versprechen.

Weitere relevante österreichische Unternehmen sind:

- AMSC Austria GmbH⁵⁴: Bietet seit über 20 Jahren Komplettlösungen für die Produktion von Windkraftanlagen und hat weltweit über 10 000 Anlagen installiert.
- ANP Systems GmbH: Hersteller von Spann- und Ankertechnik mit modernen Fertigungstechniken und strengen Qualitätskontrollen.
- Bachmann electronic GmbH: Spezialisiert auf Automatisierung, Netzmessung und Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen.
- ELA Container GmbH: Bietet hochwertige Raummodule aus Containern an, mit 40 000 Containern und 18 Standorten weltweit.
- Eologix-Sensor-Technology GmbH: Entwickelt innovative Sensorlösungen zur Eisdetektion und Temperaturmessung an Rotorblättern.
- FGH GmbH: Bietet technische Lösungen und Dienstleistungen für elektrische Netze und entwickelt Software für Netzoptimierungen.
- Innox GmbH: Fokussiert sich auf digitale Lösungen für den Maschinenbau und bietet intelligente Getriebeüberwachung zur Effizienzsteigerung.
- MIBA AG: Produziert Komponenten für Bremsen, Getriebe und Rotor-Hauptlager von Windturbinen.

⁵³ IG-Windkraft, <https://www.igwindkraft.at/?>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁵⁴ Interessensgemeinschaft Windkraft, Bericht 2023/2024

- NKE Austria GmbH: Hersteller von Premium-Wälzlagern mit internationalem Export.
- Peikko Austria GmbH: Bietet Lösungen für den Windenergiesektor.
- Schubert CleanTech GmbH: Spezialisiert auf Energieableitung und Service für Windkraftanlagen.
- SKF Österreich AG: Bietet Lösungen für Schmier- und Dichtsysteme.
- VIVAVIS Österreich GmbH: Entwickelt Lösungen für Smart Metering und Zählerfernauslesung.
- WG-technik GmbH: Fokussiert auf Reparatur und Wiederaufbau von Bauteilen.
- Wopfinger Transportbeton GmbH: Repariert und verbessert Maschinen und Anlagen.
- xelectrix Power GmbH⁵⁵: Entwickelt Batteriemodule und Energiemanagementlösungen.

Beobachtung: österreichische Firmen liefern Bauleistungen, mechanische und elektrische Komponenten und Software für Windkraftanlagen.

Österreichische Hersteller von Windkraftanlagen sind gut positioniert in der Fertigung und Lieferung vieler wichtiger Komponenten, aber es gibt bestimmte spezialisierte Bauteile, die sie oft nicht vollständig abdecken können.

1. Große Rotorblätter

Rotorblätter für moderne, große Windkraftanlagen werden in speziellen Fertigungsprozessen hergestellt, die hochspezialisierte Materialien und Technologien erfordern. Österreichische Hersteller haben nur begrenzte Kapazitäten in der Produktion solcher großen Blätter. Diese werden oft von internationalen Herstellern wie Siemens Gamesa, Vestas oder LM Wind Power (GE Renewable Energy) bezogen.

2. Direct-Drive-Generatoren

Generatoren für große Windkraftanlagen, insbesondere solche, die auf Direct-Drive-Technologie basieren, sind technologisch anspruchsvoll. Österreichische Firmen decken sie nicht die Anforderungen der neuesten Generation von Offshore- oder großen Onshore-Anlagen vollständig ab. Diese werden oft von spezialisierten Herstellern aus Deutschland, Dänemark oder anderen Ländern geliefert.

3. Getriebeeinheiten (für große Windkraftanlagen)

Während einige österreichische Unternehmen Antriebstechnik herstellen, gibt es nur wenige, die die speziellen Getriebeeinheiten für Windkraftanlagen mit über 3 MW Leistung liefern können. Hersteller wie Winergy (Deutschland) oder ZF Friedrichshafen sind weltweit führend in der Produktion von Getrieben für Windkraftanlagen.

4. Hochleistungs-Leistungselektronik

Die Umrichter, Transformatoren und andere Leistungselektronik-Komponenten, die den erzeugten Strom auf das Netz einspeisen, erfordern sehr spezialisierte Produktionstechnologien. Österreichische Firmen haben eine gewisse Expertise im Bereich der Leistungselektronik, aber der Bedarf für hochleistungsfähige und spezialisierte Anlagen übersteigt oft die lokale Produktion. Siemens oder ABB gehören beispielsweise zu den

⁵⁵ Xelectric insolvent, <https://industriemagazin.at/news/pv-speicher-hersteller-xelectric-power-ist-insolvent/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

6. Schwere Lastkräne für den Aufbau

Für die Installation von sehr großen Windkraftanlagen sind spezielle Kräne notwendig, die oft von globalen Unternehmen wie Liebherr oder Manitowoc hergestellt werden.

7. Fortschrittliche Kontrollsysteme und Sensorik

Kontrollsysteme, die Turbinenleistung optimieren, Wetterbedingungen werden oft von internationalen Hightech-Unternehmen entwickelt.

Tabelle 13 gibt einen Überblick über potenzielle österreichische Hersteller von Komponenten für Windkraftanlagen.

Tabelle 13: Komponenten von Windkraftanlagen und potentielle österreichische Hersteller

Komponente	Potentielle österreichische Hersteller
Rotoren	Kleinere Rotoren (bis 4 m Durchmesser): Atomic, Fischer
Getriebe	Kleinere Getriebe (bis 300 kW): Magna Power Train, ZF
Leistungselektronik	Miba AG
Krananlagen	Liebherr
Kontrollsysteme	Bachmann

3.3.1.4 Wertstrom der Komponenten

In Abbildung 8 wird die Struktur der Kapitalkosten bestehender Windenergieanlagen dargestellt. Etwa die Hälfte der Gesamtkapitalkaufwendungen für Windturbinen, die den Großteil der Kosten für Windenergie ausmachen, entfallen auf massive Strukturkomponenten wie den Turm, die Rotorblätter, das Fundament und die Rotorwelle. Bei diesen Komponenten überwiegen die Materialkosten die Produktionskosten. Der Materialaufwand ist enorm: Für den Turm werden bis zu 700 Tonnen Stahl benötigt, für die Rotorwelle weitere 100 Tonnen Stahl, bis zu 100 Tonnen glasfaserverstärkter Kunststoff für die Blätter und bis zu 4000 Tonnen Beton für das Fundament einer einzelnen Windturbine.

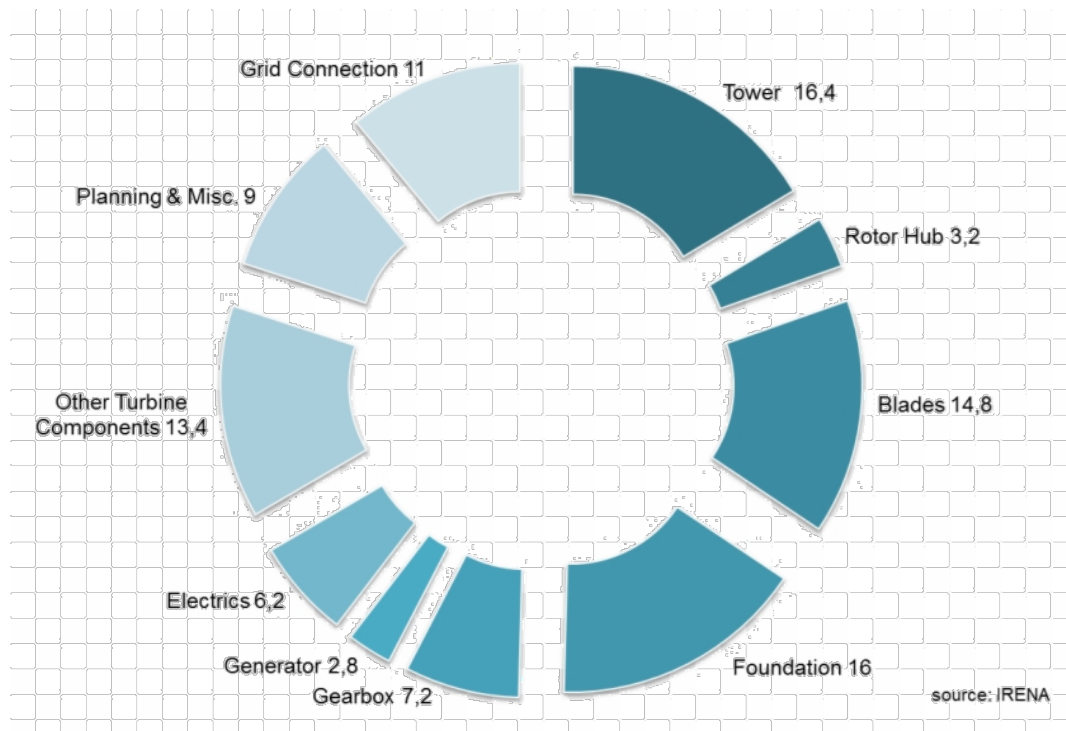


Abbildung 8: Aufschlüsselung der Kapitalkosten bestehender Windenergieanlagen in Prozent⁵⁶

Europaweit liegen die Investitionskosten für Windkraftanlagen zwischen 1 200 EUR/kWp und 1 700 EUR/kWp. Die Kosten beinhalten den Kauf und die Installation der Windturbinen, den Bau der Fundamente, elektrische Anschlussarbeiten sowie Genehmigungs- und Planungskosten.

In Österreich bewegen sich die Kosten für Onshore-Projekte tendenziell im höheren Bereich, vor allem aufgrund strengerer Umweltauflagen, Planungsprozesse und Geländegegebenheiten. Die typischen Investitionskosten für Onshore-Windkraftanlagen in Österreich liegen daher etwa zwischen 1 300 EUR/kWp und 1 600 EUR/kWp.

2024 haben 22 Windparkprojekte mit gemeinsam rund 500 MW Leistung eine Förderung erhalten. Diese Windparks werden zum Großteil bis Ende 2025 errichtet sein. In Österreich wurden im Jahr 2023 insgesamt 70 Windräder mit einer Leistung von 330,9 MW neu errichtet und 10 Windräder mit 18,6 MW abgebaut. Ende des Jahres 2023 waren damit 1 426 Windkraftanlagen mit einer Nennleistung von 3 885 MW am Netz. Diese Leistung ermöglichte eine Stromproduktion von 8 036 TWh, was etwa 12% des österreichischen Stromverbrauchs, beziehungsweise 2,55 Mio. Haushalten entspricht.

Ein Vergleich der Wertströme der fünf betrachteten erneuerbaren Energietechnologien ist in Tabelle 28 zusammengefasst.

3.3.1.5 Vertrieb und Installation

Der Markt wurde im Jahr 2023 mit 65,4% von Vestas (Dänemark) dominiert. Enercon erreicht 21,3% des Zubaus, Nordex erreicht 10,3% und Vensys 3,0%. Enercon hat rund 53% des Anlagenbestands sowie Vestas 32%. Des Weiteren sind noch rund 7% des Windkraftbestandes dem vor 4 Jahren insolvent gewordenen Anlagenhersteller Senvion zuzurechnen.

Die Befragung von 180 Unternehmen der österreichischen Windkraftindustrie sowie 49 Windkraftbetreibern zeigt, dass die heimischen Unternehmen eine hohe Exportorientierung aufweisen. So gaben 29% der Unternehmen an, einen Exportanteil von mehr als 75% zu haben, 8% der Unternehmen gaben einen Exportanteil zwischen 50% und 75% an. Da österreichische Unternehmen vor allem Komponenten und Software liefern, besteht eine relativ geringe geografische Bindung, wenngleich die Technologieführerschaft bei europäischen Herstellern liegt.

Mit dem Vertrieb beschäftigen sich:

- Enercon GmbH⁵⁷
- Leitwind⁵⁸
- Nordex Energy GmbH⁵⁹
- Siemens Gamesa Renewable Energy GmbH⁶⁰
- Vensys Energy AG⁶¹

⁵⁶ Emergence and Economic Dimension of Airborne Wind Energy, April 2018 Green Energy and Technology
DOI: 10.1007/978-981-10-1947-0_1, In book: Airborne Wind Energy

⁵⁷ ENERCON – Globaler Hersteller von Windenergieanlagen www.enercon.de, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁵⁸ Leitwind, www.leitwind.com, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁵⁹ Nordex, www.nordex-online.com, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁶⁰ Siemens-Gamesa, www.siemensgamesa.com, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁶¹ Vensys, www.vensys.de, abgerufen am 30. Dezember 2024

- Vestas Österreich GmbH

3.3.2 End of life - Kreislaufwirtschaftsoptionen

Die meisten Windkraftanlagen werden für eine Laufzeit von etwa 20 bis 25 Jahren ausgelegt. Während dieser Zeit wird die Anlage regelmäßig gewartet, um sicherzustellen, dass sie mit maximaler Effizienz arbeitet. Die Hauptteile, die gewartet oder ausgetauscht werden müssen, sind die Rotorblätter, das Getriebe, der Generator, die Lager und das Steuerungssystem. Re-Powering bezeichnet den Austausch älterer Windkraftanlagen durch modernere, leistungsfähigere Modelle. Da die Technologie ständig verbessert wird, können neuere Anlagen bei gleichem oder sogar kleinerem Platzbedarf erheblich mehr Strom erzeugen.

Re-Powering wird oft nach 20-25 Jahren in Erwägung gezogen, wenn die alten Anlagen ihre geplante Lebensdauer erreicht haben und die Investition in neue Anlagen wirtschaftlich sinnvoll ist. Nach dem Ende ihrer Lebensdauer werden Windkraftanlagen entweder zurückgebaut oder modernisiert. Der Rückbau umfasst die Demontage und das Recycling der Materialien, insbesondere der Turmstruktur (oft aus Stahl) und der Rotorblätter.

Heute können 80 bis 90 Prozent der Gesamtmasse von Windturbinen recycelt werden⁶². Der Turm eines Windrads besteht meist aus Stahl und Beton⁶³. Sowohl die Stahl- als auch die Zementindustrie arbeiten an klimafreundlicheren Produktionsmethoden, um den CO₂-Fußabdruck zu reduzieren. Beide Materialien sind gut recycelbar: Beton kann für den Straßenbau wiederverwendet werden, während Stahl, der etwa 30 bis 35 Prozent des Gewichts eines Windrads ausmacht, relativ einfach wiederverwertet werden kann.

In der Gondel wird Aluminium für Verkleidungsteile verwendet, das ebenfalls gut recycelbar ist, jedoch nicht immer die gleiche Qualität wie neue Produkte erreicht. Die Verkabelung besteht meist aus Kupfer, das etwa 1 Prozent des Gesamtgewichts ausmacht. Kupfer ist ideal für die Wiederverwertung. Die Abhängigkeit von Kupfer wird jedoch als besorgniserregend angesehen, da für die Energiewende bis 2050 wahrscheinlich mehr Kupfer benötigt wird, als im gesamten 20. Jahrhundert verbraucht wurde.

Die Rotorblätter bestehen aus faserverstärkten Kunststoffen und machen zwei bis drei Prozent des Gesamtgewichts aus. Diese Materialien sind nach der Verbindung schwer trennbar, was das Recycling erschwert. Rotorblätter landen oft im Zementofen oder werden als Terrassendielen verwendet. Neue Verfahren für 100%recycelbare Rotorblätter werden zurzeit entwickelt.

Windkraftanlagen verwenden auch Flüssigkeiten wie Öle im Getriebe und Kühlflüssigkeiten, die durch Raffinierung zu hochwertigem Basisöl aufbereitet werden können. Zudem kommt das Treibhausgas Schwefelhexafluorid (SF₆) als Isolator in Transformatoren zum Einsatz. Es muss bei Rückbau fachgerecht entsorgt werden, da es 23 500-mal schädlicher als CO₂ ist. Forschung an Alternativen zu SF₆ zeigt vielversprechende Ansätze.

3.3.3 Zukünftige Technologien

Zukünftige Windkrafttechnologien und -trends konzentrieren sich auf Leistungssteigerung, neue Materialien, digitale Lösungen und die bessere Integration in Energiesysteme:

1. Größere Turbinen: Offshore-Turbinen erreichen künftig bis zu 15-20 MW Leistung, mit Rotordurchmessern bis zu 250 Metern.
2. Höhere Türme: Anlagen auf Türmen über 200 Meter nutzen effizientere Winde in höheren Lagen und erhöhen die Energieproduktion.

⁶² Bundesverband Windenergie, 2023, Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen

⁶³ Orsted, Woraus Windräder bestehen, 2024

3. Neue Materialien: Leichte und robuste Werkstoffe wie Carbonfasern und Hybridverbundstoffe steigern die Effizienz und Lebensdauer. Recyclingfähige Rotorblätter sind im Fokus, um Nachhaltigkeit zu verbessern.
4. Künstliche Intelligenz: KI optimiert die Rotorblattanpassung in Echtzeit und verbessert Wartung durch Vorhersage von Fehlern mittels Sensoren und Datenanalyse.
5. Power-to-X und Speichertechnologien: Integration von Batteriespeichern und Wasserstoffproduktion stabilisiert die Stromversorgung und nutzt Überschussenergie effizient.

In vielen Regionen werden bestehende, ältere Windkraftanlagen durch neue, leistungstärkere Modelle ersetzt. Dieses Re-Powering ermöglicht eine effizientere Nutzung bestehender Standorte mit moderner Technologie. Dies ist vor allem in windreichen Regionen wie dem Burgenland ein wichtiger Trend.

Es gibt auch einen Trend hin zu dezentralen, kleineren Windkraftanlagen, die in ländlichen oder sogar urbanen Gebieten eingesetzt werden können. Diese Anlagen könnten in Verbindung mit Solaranlagen und Batteriespeichern zur Eigenversorgung von Haushalten oder kleinen Unternehmen beitragen.

Vertikalachsige Windkraftanlagen haben Rotoren, die senkrecht zur Windrichtung ausgerichtet sind und bieten Vorteile in städtischen Gebieten oder an Standorten mit wechselnden Windrichtungen. Vertikalachsige Anlagen sind weniger anfällig für Turbulenzen und könnten künftig eine größere Rolle spielen, insbesondere für den Einsatz auf kleineren Flächen.

Aufgrund steigender Nachfrage nach dezentraler Energieproduktion gibt es Forschung und Entwicklung zur Nutzung von Windenergie in städtischen Gebieten. Technologien wie kleinere Mikro-Windturbinen oder Designs, die in Gebäudestrukturen integriert sind, könnten zukünftig Windkraft auch in städtischen Gebieten nutzbar machen.

Die Forschung konzentriert sich auch auf die Entwicklung von geräuscharmen Rotorblättern, um die Akzeptanz von Windkraftanlagen zu erhöhen. Bionische Designs, inspiriert von der Flügelstruktur von Eulen, könnten die Geräuschentwicklung deutlich reduzieren. Neue Technologien wie Infrarotsensoren, Radarerkennung oder sogar Drohneneinsatz helfen, Vögel und Fledermäuse von Windkraftanlagen fernzuhalten und so die Umweltverträglichkeit zu verbessern.

3.3.4 Stakeholder im Bereich Windkraft

Zentrale Forschungsbereiche und Akteure im Bereich Windkraft:

1. Universitäten und Fachhochschulen:
 - TU Wien: Forscht zur aerodynamischen Optimierung, Betriebsmodellen und Netzintegration von Windkraftanlagen.
 - BOKU Wien: Untersucht Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit der Windenergie sowie ihre Auswirkungen auf die Tierwelt.
 - FH Technikum Wien: Fokus auf Steuerungssysteme, Vibrationstechnik und Lebensdauer von Windkraftanlagen.
 - FH Burgenland: Entwickelt Lösungen zur Integration und Speicherung von Windenergie im Energiesystem.
2. Forschungsinstitute:
 - AIT: Optimiert Windkraftanlagen mittels digitaler Simulationen und intelligenter Steuerungen.
 - K1-Zentrum: Nutzt Big Data und KI zur Effizienzsteigerung von Windparks.

- Windforscher Burgenland: Forscht an Konzepten für Repowering und dezentrale Anlagen.
3. Spezifische Forschungsprojekte:
- Integration von Windkraft in intelligente Stromnetze (z. B. smart Grids).
 - Herausforderungen der Windkraftnutzung in Gebirgsregionen.
 - Repowering-Projekte in Regionen mit älteren Windparks wie Burgenland.
 - Enge Zusammenarbeit von Windkraft Simonsfeld AG und Energie Burgenland mit Forschungsinstituten.
4. Förderung durch nationale und EU-Programme:
- Forschungsförderung durch Horizon Europe und nationale Programme wie den Klima- und Energiefonds.
 - Studien zur gesellschaftlichen Akzeptanz von Windkraft, insbesondere durch die BOKU Wien.
5. Bildungsanbieter:
- Universitäten und Fachhochschulen: TU Wien, FH Technikum Wien, FH Joanneum, FH Burgenland bieten Studiengänge mit Windkraftschwerpunkten.
 - WIFI, bfi, HTLs: Bieten technische Weiterbildungen zur Wartung und Planung von Windkraftanlagen.
 - Windkraft Simonsfeld Akademie und private Anbieter: Spezifische Schulungen zur Windkraft.
 - Österreichische Firmen sind organisiert in der IG Windkraft⁶⁴. Ihr Jahresbericht enthält eine Liste der österreichischen Zulieferer.⁶⁵ Er weist einen Marktanteil von 53% Enercon aus.

3.3.5 Chancen und Risiken für potentielle österreichische Hersteller

Die Windenergie ist ein wachsender Sektor im Rahmen der globalen Energiewende und bietet ein dynamisches Umfeld, in dem sich österreichische Hersteller positionieren können. Österreichische Hersteller haben durch Spezialisierung, technologische Innovation und eine wachsende Nachfrage in der EU und weltweit gute Chancen, im Bereich Windkraft erfolgreich zu sein. Gleichzeitig müssen sie den Herausforderungen eines intensiven Wettbewerbs und hoher Investitionskosten begegnen. Strategische Partnerschaften und Innovationsförderung sind daher entscheidend, um langfristig im globalen Windkraftmarkt zu bestehen. Österreichische Hersteller können davon profitieren, da sie Komponenten für Windkraftanlagen liefern und sich verstärkt in internationale Lieferketten integrieren können. Durch Spezialisierung auf hochwertige Produkte wie Turmkomponenten, kleinere Maschinen oder innovative Steuerungssysteme können sie sich von großen internationalen Wettbewerbern abheben.

Der Markt für Windkraftanlagen und deren Komponenten wird von großen, international tätigen Unternehmen dominiert, insbesondere aus Deutschland, Dänemark, Spanien und China. Österreichische Hersteller müssen sich gegen diese globalen Akteure behaupten, die oft über größere Produktionskapazitäten und Skaleneffekte verfügen.

Österreichische Unternehmen, die in kleineren Mengen produzieren, könnten ohne die Margen stark zu reduzieren Schwierigkeiten haben, wettbewerbsfähige Preise anzubieten. Viele fortschrittliche Technologien und Schlüsselkomponenten wie große Rotorblätter, spezielle Getriebe oder Hochleistungs-Generatoren werden nicht in Österreich produziert. Die Herstellung von Windkraftkomponenten erfordert hohe Investitionen in Technologie und Maschinen. Insbesondere im Bereich der Forschung und Entwicklung, etwa bei neuen Materialien oder effizienteren Produktionsprozessen, müssen österreichische Unternehmen

⁶⁴ IG-Windkraft, <https://www.igwindkraft.at/?>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁶⁵ Interessensgemeinschaft Windkraft, Bericht 2023/2024

signifikante Mittel aufwenden, um mit der Konkurrenz Schritt zu halten. Dass das möglich ist, zeigt der globale Erfolg von WEB Windenergie AG.⁶⁶

In Tabelle 14 wird das Ergebnis der SWOT Analyse für Windkraftanlagen dargestellt.

Tabelle 14: SWOT Analyse Windkraftanlagen

Stärken Hohe technologische Kompetenz und Innovationskraft, besonders in der Regelung und bei kleinen Windkraftanlagen Erfahrung im Bereich erneuerbare Energien Starke politische Unterstützung und staatliche Förderungen. Geringe Transportkosten für den europäischen Markt	Schwächen Hohe Produktions- und Lohnkosten Begrenzte heimische Produktionskapazitäten Abhängigkeit von importierten Komponenten Geografische Einschränkungen
Chancen: Wachsender europäischer Markt für erneuerbare Energien Technologische Fortschritte EU-Förderungen und Investitionen in den Green Deal Synergien mit anderen erneuerbaren Energien Zunehmendes Bewusstsein für Energiesicherheit	Risiken Starker internationaler Wettbewerb: Abhängigkeit von Rohstoffmärkten und Materialknappheit. Bürokratische Hürden und Genehmigungsverfahren Öffentlicher Widerstand und Umweltauswirkungen Abhängigkeit von Förderungen und politischen Entscheidungen

Stärken

Hohe technologische Kompetenz und Innovationskraft: Österreich hat gut ausgebildete Fachkräfte und eine starke Maschinenbau- und Energietechnologie-Industrie. Die Nähe zu Forschungseinrichtungen und Technologiestandorten fördert Innovationen in der Windkraft.

Erfahrung im Bereich erneuerbare Energien: Österreich hat bereits umfangreiche Erfahrung im Bereich erneuerbare Energien und hat in den letzten Jahrzehnten stark in Windkraftprojekte investiert, insbesondere im östlichen Teil des Landes. Dies schafft eine solide Grundlage und Akzeptanz für die Windkraftproduktion. Kompetenz besteht im Bereich Regelung und für kleinere Anlagen.

Starke politische Unterstützung und staatliche Förderungen: Die österreichische Regierung fördert den Ausbau der erneuerbaren Energien, um ihre Klimaziele zu erreichen. Es gibt Förderungen und steuerliche Anreize, die den Bau und die Produktion von Windkraftanlagen attraktiver machen.

Geringe Transportkosten für den europäischen Markt: Die zentrale Lage Österreichs ermöglicht es, Windkraftanlagen und Komponenten kostengünstig in die Nachbarländer und innerhalb Europas zu transportieren, was Lieferketten optimiert und CO₂-Emissionen reduziert.

Schwächen

Hohe Produktions- und Lohnkosten: Im internationalen Vergleich sind die Produktions- und Lohnkosten in Österreich relativ hoch. Dies führt zu einem Wettbewerbsnachteil gegenüber Ländern mit niedrigeren Produktionskosten, was die Preisgestaltung erschwert.

⁶⁶ <https://www.web.energy/at-de/ueber-web/kennzahlen#c3220>

Begrenzte heimische Produktionskapazitäten: Die Produktion von Windkraftanlagen in Österreich ist vergleichsweise klein und kann mit den großen, spezialisierten Herstellern aus Deutschland, Dänemark oder den USA nicht mithalten, insbesondere bei Großprojekten.

Abhängigkeit von importierten Komponenten: Viele Schlüsselkomponenten wie Getriebe und spezielle Materialien müssen importiert werden, was die Produktionskosten erhöht und die Abhängigkeit von internationalen Lieferketten verstärkt.

Geografische Einschränkungen: In Österreich ist das Potenzial für Windenergie hauptsächlich auf den Osten und bestimmte Tallagen begrenzt. Der Großteil des Landes ist bergig, was die Aufstellung und Nutzung von Windkraftanlagen erschwert.

Chancen

Wachsender europäischer Markt für erneuerbare Energien: Durch die steigende Nachfrage nach erneuerbaren Energien in Europa gibt es großes Potenzial, Windkraftanlagen auch für den Exportmarkt zu produzieren. EU-weite Klimaziele unterstützen die Nachfrage nach Windenergie.

Technologische Fortschritte: Innovationen wie effizientere Turbinen, leichtere Materialien und bessere Speicherlösungen bieten österreichischen Produzenten die Möglichkeit, sich technologisch zu differenzieren und Anlagen anzubieten, die speziell auf die Anforderungen in Gebirgsregionen oder bei schwachem Wind ausgelegt sind.

EU-Förderungen und Investitionen in den Green Deal: Die EU fördert gezielt Projekte zur nachhaltigen Energiegewinnung und bietet Finanzierungen, die österreichische Unternehmen bei der Entwicklung und Produktion von Windkraftanlagen unterstützen können.

Synergien mit anderen erneuerbaren Energien: österreichische Unternehmen können Windkraft mit anderen erneuerbaren Energien wie Photovoltaik und Wasserkraft kombinieren und so hybride Energielösungen entwickeln, die die Energieversorgung und Stabilität erhöhen.

Zunehmendes Bewusstsein für Energiesicherheit: Angesichts geopolitischer Unsicherheiten und steigender Energiekosten gewinnt die lokale Energieproduktion an Bedeutung. Windkraft kann dazu beitragen, die Energiesicherheit zu verbessern und die Abhängigkeit von Energieimporten zu reduzieren.

Risiken

Starker internationaler Wettbewerb: Der Markt für Windkraftanlagen wird von großen Herstellern aus Deutschland, Dänemark, den USA und China dominiert, die durch Skaleneffekte und niedrige Produktionskosten häufig günstigere Lösungen anbieten können.

Abhängigkeit von Rohstoffmärkten und Materialknappheit: Die Herstellung von Windkraftanlagen erfordert große Mengen an Rohstoffen wie Stahl, Kupfer und Seltene Erden. Preisschwankungen und Materialengpässe können die Produktionskosten erheblich erhöhen.

Bürokratische Hürden und Genehmigungsverfahren: Der Bau und Betrieb von Windkraftanlagen ist in Österreich mit langen und komplexen Genehmigungsverfahren verbunden. Verzögerungen und Unsicherheiten in diesen Verfahren können das Wachstum der Windkraftproduktion einschränken.

Öffentlicher Widerstand und Umweltbedenken: In manchen Regionen stoßen neue Windkraftprojekte auf Ablehnung, sei es aufgrund ästhetischer Vorbehalte oder wegen möglicher Umwelt- und Lärmbelastungen. Dies kann die Akzeptanz verringern und den Fortschritt neuer Projekte verlangsamen.

Abhängigkeit von Förderungen und politischen Entscheidungen: Die Produktion und der Bau von Windkraftanlagen sind stark von Förderungen abhängig. Veränderungen in der Förderpolitik oder Einschnitte in staatliche Unterstützung könnten die Rentabilität der Windkraftproduktion beeinträchtigen.

Die Produktion von Windkraftanlagen und Komponenten hat in Österreich ein hohes Potenzial, insbesondere durch Innovationskraft, technologische Spezialisierung und die wachsende europäische Nachfrage nach erneuerbaren Energien. Dennoch stellen die hohe internationale Konkurrenz und die begrenzte Skalierung der heimischen Produktion erhebliche Herausforderungen dar. Durch eine Fokussierung auf technologische Fortschritte und die Nutzung von EU-Förderungen könnten österreichische Hersteller dennoch erfolgreich Nischen im europäischen Markt besetzen.

3.4 Energiespeicher

3.4.1 Wertschöpfungskette Energiespeicher

3.4.1.1 Beschreibung der Technologie

Ein Batteriestromspeicher speichert elektrische Energie in chemischer Form, um sie bei Bedarf wieder in Strom umzuwandeln. Hauptkomponenten sind: Anode, Kathode, Elektrolyt und Separator. Beim Laden wandern Ionen zwischen den Elektroden, je nach Batterietyp wie Lithium-Ionen oder Blei-Säure. Das Batterie-Management-System (BMS) überwacht diese Prozesse und optimiert Sicherheit und Leistung.

Batterietypen:

- Lithium-Ionen-Batterien: Hohe Energiedichte und Lebensdauer, beliebt für private und netzgebundene Speicher.
- Blei-Säure-Batterien: Kostengünstig, aber weniger effizient.
- Flow-Batterien: Geeignet für langfristige Speicherung.

Lithium-Ionen-Batterien dominieren den Energiespeichermarkt (>90%). Lithium-Ferrophosphat-(LFP)-Batterien verdrängen zunehmend Nickel-Mangan-Cobalt (NMC)-Batterien aufgrund niedrigerer Kosten und besserer Sicherheit. Für Langzeitspeicher könnten jedoch Redox-Flow-Batterie (RFB) -Batterien bevorzugt werden. Netzdienste wie Revenue Stacking und Preisarbitrage steigern die Rentabilität von Batteriespeichern, die für eine größere Integration erneuerbarer Energien entscheidend sind. Polymer-basierte Redox-Flow-Batterie (pRFB), verwendet Kochsalzlösung als Lösungsmittel.

Die einzelnen Schritte in der Wertschöpfungskette für einen typischen Energiespeicher, beispielsweise eine Lithium-Ionen-Batterie sind:

1. Rohstoffgewinnung

Die erste Stufe umfasst die Gewinnung der Rohstoffe, die für die Herstellung der Energiespeicher notwendig sind. Für Batterien sind dies vor allem:

- Lithium: Wird in Minen abgebaut oder durch Verdunstung von lithiumhaltiger Salzlake in Gebieten wie Chile, Australien oder Argentinien gewonnen.
- Kobalt: Vorwiegend aus Minen in der Demokratischen Republik Kongo.
- Nickel, Mangan und Aluminium: Wichtige Bestandteile von Kathodenmaterialien, die in verschiedenen Ländern abgebaut werden.
- Graphit: Als Anodenmaterial, oft aus China und anderen Regionen.
- Kupfer und Aluminium: Für Stromsammler in Batterien sowie für Gehäuse und elektrische Anschlüsse.

Diese Rohstoffe müssen verarbeitet und veredelt werden, um in den nächsten Produktionsschritten genutzt werden zu können. Die Rohstoffaufbereitung ist ein kritischer Teil der Wertschöpfungskette.

2. Materialherstellung und chemische Verarbeitung

Nach der Gewinnung der Rohstoffe folgt die Herstellung der aktiven Materialien, die in den Energiespeichern verwendet werden. Das sind:

- Kathodenmaterialien: Aus Lithium, Nickel, Kobalt und Mangan werden komplexe Verbindungen hergestellt, wie Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) oder Lithium-Eisenphosphat (LFP).

- Anodenmaterialien: Graphit wird behandelt und für die Beschichtung auf Stromsammler vorbereitet.
- Elektrolyte: Spezialchemikalien, meist auf Lithiumbasis, werden entwickelt, um die Ionenleitung zwischen Anode und Kathode zu ermöglichen.
- Separatoren: Dünne, poröse Membranen aus Polyethylen oder Polypropylen, die die Anode von der Kathode trennen und sicherstellen, dass nur Ionen hindurchgelangen.

3. Zellproduktion

In diesem Schritt werden die einzelnen Batteriekomponenten zu Batteriezellen zusammengesetzt:

- Elektrodenfertigung: Anoden- und Kathodenmaterialien werden auf metallische Stromsammler (meist Kupfer und Aluminium) aufgebracht. Dieser Schritt umfasst das Beschichten, Trocknen und Walzen der Elektroden.
- Zellaussammlung: Die beschichteten Elektroden und Separatoren werden in verschiedenen Zellformaten (zylindrisch, prismatisch oder Pouch-Zellen) miteinander verbunden. Dies erfolgt unter kontrollierten Bedingungen, um Kontaminationen zu vermeiden.
- Befüllung mit Elektrolyt: Nach dem Zusammenbau der Zellen wird der Elektrolyt eingefüllt, um die Leitfähigkeit der Zelle zu gewährleisten.
- Zellversiegelung: Die Zellen werden luftdicht versiegelt, um den Elektrolyt zu halten und vor äußeren Einflüssen zu schützen.

4. Modul- und Pack-Montage

Einzelne Batteriezellen werden zu Modulen und anschließend zu größeren Batteriepacks zusammengebaut:

- Modulmontage: Mehrere Batteriezellen werden in einem strukturellen Rahmen zu einem Modul zusammengeschlossen, oft mit Schutzmechanismen wie thermischen Managementsystemen.
- Pack-Montage: Mehrere Module werden zu einem Batteriepack zusammengeführt. Dieser Schritt umfasst auch das Hinzufügen von Überwachungs- und Steuerungssystemen, wie dem Batteriemanagementsystem (BMS), das die Sicherheit und Leistung des Batteriepacks überwacht und reguliert.
- Thermomanagement: Energiespeicher benötigen Systeme, um die Temperatur während des Betriebs zu regulieren, insbesondere in Elektrofahrzeugen oder stationären Speichersystemen.

5. Integration und Anwendung

Nachdem die Energiespeicher als Batteriepacks oder Module zusammengebaut wurden, werden sie in ihre endgültigen Anwendungen wie Elektrofahrzeuge oder stationäre Energiespeicher integriert.

Der Lebenszyklus eines Energiespeichers endet nicht mit seiner Nutzung. Das Recycling ist ein wichtiger Schritt in der Wertschöpfungskette, da wertvolle Rohstoffe zurückgewonnen werden können:

- Zerlegung: Die Batteriepacks werden zerlegt, und die verschiedenen Komponenten wie Zellen, Gehäuse und Elektronik werden getrennt.
- Materialrückgewinnung: Lithium, Kobalt, Nickel und andere wertvolle Materialien werden durch chemische Prozesse zurückgewonnen, um wieder in neuen Batterien verwendet zu werden.
- Wiederverwendung: In manchen Fällen können Batteriepacks nach ihrer Nutzung in Elektrofahrzeugen in stationären Anwendungen weiterverwendet werden, bevor sie recycelt werden.

3.4.1.2 Materialien (Abbau und Metallurgie)

In Tabelle 15 werden die wesentlichen Materialien für die Herstellung von Energiespeicher dargestellt. In der Tabelle sind die kritischen Rohstoffe rot hervorgehoben.

Tabelle 15: Materialien und Prozesse Energiespeicher

Rohstoffe	Menge für Berechnung	Menge Literatur	Bedarf für 10 GW [t]	Bedarf Österreich [t/a]	IDEMAT [kg CO _{2e} /kg]	CF [kg CO _{2e} /MW]	CF %
Aluminium	25	20 bis 30 kg	500		4,7	2 350	7
Elektrolyt (meist basierend auf Lithiumsalzen und Lösungsmitteln wie Ethylenkarbonat)	35	30 bis 40 kg	700		0,915	640,5	2
Graphit	40	30 bis 50 kg	800	30 000 t/a	9,2	7360	2 1
Kobalt	9	7 bis 10 kg	180	510 bis 600 Tonnen (vor allem in BEV)	7,7	1386	4
Kupfer	13	10 bis 15 kg	260		3,2	832	2
Lithium ^{67, 68}	27	15 bis 30 kg	540	695 bis 930 t/a ⁶⁹	18,3	9 882	2 8
Mangan	9	7 bis 10 kg	180		2,5	450	1
Nickel	55	50 bis 60 kg	1 100		11,1	12 210	3 5
PE, PP	3	2-3 kg	60		1,9	114	0

Die Mengen wurden für eine 50 kWh Batterie ermittelt, ausgelegt auf 10 bis 50 kW belastbar. In der Grafik rot unterlegt sind kritische Rohstoffe.

Überlegungen zum Recycling sind in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** enthalten.

3.4.1.3 Komponentenfertigung

Die Hersteller-Gruppe aus BYD, sonnen, SENEK und E3/DC produzierten 2021 und 2022 mehr als drei Viertel der in Deutschland installierten Stromspeicher.⁷⁰

Die meisten Hersteller greifen auf Akkus von spezialisierten, internationalen Herstellern zurück, kombinieren diese und versehen sie mit einer für die Speicherung des PV-Stroms entsprechend angepassten Laderegelung. Dieses Batteriemanagementsystem ist für den ordnungsgemäßen, störungsfreien und energieverbrauchsoptimierten Betrieb jeder einzelnen Speichereinheit sowie des Gesamtsystems notwendig.

⁶⁷ Die sechs wichtigsten Fragen zu Lithium, <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/die-wichtigsten-fragen-zu-lithium.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁶⁸ How Much Lithium is in a Li-Ion Vehicle Battery? <https://www.linkedin.com/pulse/how-much-lithium-li-ion-vehicle-battery-paul-martin/>, , abgerufen am 30. Dezember 2024

⁶⁹ Inklusive der EV Produktion bei Magna, die sich 2024 zerschlagen hat.

⁷⁰ Top 2024: Hersteller von Stromspeichern und Speicherkomponenten, <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/hersteller>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Die Marktführer in der Zellen-Produktion wie z. B. CATL und BYD kommen aus China, LG Energy Solutions und Samsung SDI aus Südkorea wie Panasonic aus Japan. Die Batteriezellproduktion in Europa ist derzeit im Aufbau befindlich.⁷¹

Beobachtung: Stromspeicher greifen auf Akkus von internationalen Herstellern zu.

In Österreich bietet das AIT⁷² umfassende Dienstleistungen im Bereich der Entwicklung und Integration von Batteriespeichersystemen. Dazu gehören die Entwicklung von Batteriezellen, -modulen und -paketen sowie Batteriemanagementsystemen (BMS). AIT unterstützt auch die Optimierung von Energieflüssen und das thermische Management für sichere Energiespeicherungssysteme.

Fronius bietet bidirektionale Wechselrichter an, die für Energiespeichersysteme verwendet werden können, um Gleichstrom aus Batterien in Wechselstrom für das Netz umzuwandeln und umgekehrt.

SAX Power entwickelt Lithium-Ionen-Batterien für Energiespeicher- und Elektromobilitätsanwendungen. Ihre „Digital AC Battery“ integriert innovative BMS- und DC/AC-Umwandlungstechnologien, was die Lebensdauer und Effizienz der Batterien erhöht.

BlueSky Energy bietet stationäre Energiespeichersystemen mit Lösungen wie Redox-Flow-Batterien und Lithium-Eisenphosphat-Technologie, die sich durch hohe Sicherheit und Modularität auszeichnen. E.battery-systems⁷³ Kernkompetenz ist es, innovative Fortschritte bei Anwendungen der Elektromobilität zu machen. e.battery systems gestaltet die Zukunft mit maßgeschneiderter Hochleistungstechnologie, revolutionären Zellkühlsystemen und bahnbrechenden Second-Life-Konzepten. e.battery systems begann 1995 als familiengeführtes Unternehmen begann und hat sich weiterentwickelt, um marktführende Technologien mit patentierter Flexibilität, Geschwindigkeit und Innovation voranzutreiben.

Easelink entwickelt Technologien für die drahtlose Ladung von Elektrofahrzeugen, die auch für die Ladeinfrastruktur von Batteriespeichern relevant sind. Ihre Lösungen könnten zur Integration von Speichersystemen und Ladesystemen beitragen.

Das Konsortium um Virtual Vehicle Research, Varta, AVL und das Materials Center Leoben bündelt österreichische Kompetenzen in der Batterieforschung. Ziel ist die Erhöhung der Energiedichte von Zellen um 20 bis 30 Prozent.⁷⁴ Das Ziel einer merklichen Erhöhung der Energiedichte von Zellen in Lithium-Ionen-Batterien findet seinen Rahmen im Projekt OpMoSi, in dem sich ein steierisches Konsortium unter der Koordination von Virtual Vehicle Research um zukunftsweisende Batterietechnologien bemüht.

Rosendahl Nextrom ist nach eigener Aussage der weltweit führende Anbieter von Anlagen, Systemen, Maschinen und Dienstleistungen für die Batterie-, Kabel-, Draht- und Glasfaserindustrie⁷⁵ darunter Produktionsanlagen für Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batterien. Das Angebot umfasst Maschinen und Fertigungslinien für das Eintaschen, Ärmeln, Umwickeln und Stapeln, Anguss bis hin zur Montage von Automobil-, Motorrad-, Industrie- und E-Batterien.

Bilfinger Industrial Services bietet den gesamten Lebenszyklus einer industriellen Anlage: Von der Planung – besonders in den Bereichen Konzeptierung und Ausführungsengineering – über die Projektabwicklung bei

⁷¹ Bett, A., Erneuerbare Energie – Chancen einer industriellen Wertschöpfung in Europa, FVEE Themen 2020

⁷² AIT, ait.ac.at, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁷³ [https://e-batterysystems.com/standardsysteme/battery-](https://e-batterysystems.com/standardsysteme/battery-packs/?utm_source=google&utm_medium=search&utm_campaign=code006&utm_id=code006&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwz7C2BhDkARIsAA_SZKZ78NpgXRyVDlr8O_uDTBzNiAeyW1qOovIEyRO9-Zmx5RBoWOHCckQaAgBGEALw_wcB)

[packs/?utm_source=google&utm_medium=search&utm_campaign=code006&utm_id=code006&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwz7C2BhDkARIsAA_SZKZ78NpgXRyVDlr8O_uDTBzNiAeyW1qOovIEyRO9-Zmx5RBoWOHCckQaAgBGEALw_wcB](https://e-batterysystems.com/standardsysteme/battery-packs/?utm_source=google&utm_medium=search&utm_campaign=code006&utm_id=code006&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwz7C2BhDkARIsAA_SZKZ78NpgXRyVDlr8O_uDTBzNiAeyW1qOovIEyRO9-Zmx5RBoWOHCckQaAgBGEALw_wcB), abgerufen am 30. Dezember 2024

⁷⁴ Automobil Produktion, Österreichisches Projekt pusht Lithium-Ionen-Batterien

<https://www.automobil-produktion.de/technologie/oesterreichisches-projekt-pusht-lithium-ionen-batterien-813.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁷⁵ RosendahlNextrom, <https://rosendahlnextrom.com/de/ueber-uns/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

neuen oder zu modernisierenden Anlagen sowie der Instandhaltung von Industrieanlagen, sowie von Anlagen zur Batterieproduktion.⁷⁶

Varta Micro Innovation⁷⁷, ein in Österreich ansässiges Tochterunternehmen von Varta, ist ein Beispiel für ein Unternehmen, das Mikrobatterien und Energiespeicherlösungen herstellt, die vor allem in kleineren Anwendungen wie tragbaren Geräten verwendet werden.

Unternehmen wie Kreisel Electric⁷⁸ (nun Teil von John Deere) haben sich auf innovative Batteriespeicherlösungen und Technologien für die Elektromobilität spezialisiert, allerdings eher im Bereich der Integration und der Entwicklung von Batteriesystemen als der Zellproduktion. Die Technologie von KREISEL Electric wird in Produkte von John Deere integriert, z. B. in Rasenmähern, kompakten Kommunaltraktoren, Kleintraktoren, kompakten Baumaschinen und einigen Straßenbaumaschinen.⁷⁹

In Tabelle 16 werden die Komponenten von Energiespeichern und die österreichischen Hersteller dieser Komponenten dargestellt.

Tabelle 16: Komponenten von Energiespeichern und österreichische Hersteller

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
Batteriemanagementsystem	Spannungsüberwachung: Überwacht die Spannung jeder Zelle oder jedes Moduls Temperaturüberwachung: Überprüft die Temperatur der Batteriezellen, um Überhitzung zu verhindern Lade- und Entladeschutz: Verhindert Überladung und Tiefentladung der Batterien Balancing-Schaltung: Sorgt für den Spannungsausgleich zwischen den einzelnen Zellen	Fronius: Integration von Batteriespeichern mit Solaranlagen, einschließlich der dazugehörigen Wechselrichter und Steuerungssysteme. Kreisel Electric: Lithium-Ionen-Batteriespeicher für verschiedene Anwendungen, einschließlich stationärer Energiespeicher und Elektromobilität. Ihre Produkte zeichnen sich durch hohe Energiedichte und Effizienz aus.⁸⁰ (jetzt Teil von John Deere) AVL Batterien⁸¹ Voltfang⁸²: Modell für österreichische Firmen Banner Batterien: Blei-Säure-Batterien und entwickeln auch moderne Lösungen für Energiespeicher. Siemens Energy bietet umfassende Lösungen im Bereich der

⁷⁶ Bilfinger, <https://www.bilfinger.com/de/at/ueber-uns/bilfinger-in-oesterreich/bilfinger-industrial-services-austria/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁷⁷ Varta-AG, <https://www.varta-ag.com/en/about-varta/news-press/details/varta-expands-its-research-capacities-with-new-facility-in-graz>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁷⁸ Kreiselelectric, <https://www.kreiselelectric.com/de/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁷⁹ John Deere, Electrification, <https://about.deere.com/en-us/our-company-and-purpose/technology-and-innovation/alternative-energy/electrification>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁸⁰ Kreiselelectric, <https://www.kreiselelectric.com/de/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁸¹ AVL, <https://www.avl.com/de/engineering/e-mobility-engineering/battery-development/battery-modules-and-packs>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁸² Handelsblatt, Viessmann investiert in neues Leben für E-Auto-Batterien, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/start-up-voltfang-viessmann-investiert-in-neues-leben-fuer-e-auto-batterien/29300328.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
		Energiespeicherung, einschließlich der Entwicklung und Produktion von Komponenten für Batteriespeicher. Sie sind in der Entwicklung von Batteriemanagementsystemen und anderen relevanten Technologien aktiv.
Batteriemodule	Mehrere Zellen, die zu einem Modul zusammengefasst werden	-
Batteriepakete	Mehrere Module, die in einem Gehäuse zusammengefasst sind	Varta Micro Innovation: stationäre Batteriespeichersysteme für Privathaushalte als auch industrielle Lösungen. VARTA ist besonders bekannt für ihre Lithium-Ionen-Zellen und umfassenden Speichersysteme.
Batteriezellen	Speicherelemente, basierend auf verschiedenen Technologien (z.B. Lithium-Ionen, Blei-Säure, Lithium-Eisenphosphat, Redox-Flow)	-
Energiemanagementsystem	Steuerungssystem: Verwaltet und optimiert die Energieflüsse zwischen Netz, PV-Anlage, Stromspeicher und Verbrauchern Überwachungseinheiten: Zeigt die Echtzeitdaten wie Ladezustand der Batterie, Energieverbrauch und -erzeugung an Smart Meter: Misst den Stromverbrauch und die Einspeisung ins Netz Kommunikationsschnittstellen: Schnittstellen (z.B. LAN, WLAN, Modbus) für die Integration in Smart-Home-Systeme und zur Fernüberwachung	
Gehäuse und Montage	Batterieschränke: Gehäuse zur Unterbringung und Schutz der Batteriepakete Wand- oder Bodenhalterungen: Befestigungen zur Montage der Batterie an einer Wand oder auf dem Boden Schaltschrank (bei größeren Systemen): Integrierter Schrank zur Unterbringung von Wechselrichtern, Sicherungen und anderen elektrischen Komponenten	
Installationsmaterial	Befestigungsmaterialien: Schrauben, Halterungen, und Montagematerial für die Installation des Systems Kabelkanäle und Schutzrohre: Schutz und ordentliche Verlegung der elektrischen Leitungen Isoliermaterialien: Schutz der elektrischen Komponenten vor Witterung und mechanischer Beschädigung	

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
	Erdungskabel und Blitzschutz: Erdung der elektrischen Systeme zum Schutz vor elektrischen Schäden	
Kommunikation und Software	Benutzerinterface (HMI): Display oder Touchscreen zur Steuerung und Überwachung des Systems Fernüberwachung (Cloud): Fernüberwachung und Steuerung des Speichersystems über eine App oder ein Web-Portal Diagnose- und Wartungssoftware: Software zur Fehlerdiagnose und Wartungsplanung	Fronius (problematisch bei chinesischen Herstellern aufgrund der Fernabschaltbarkeit)
Kühlungssystem	Lüfter: Mechanische Kühlung der Batteriemodule und Wechselrichter bei hohen Temperaturen Flüssigkeitskühlung (optional): Bei größeren Systemen kann eine Flüssigkeitskühlung verwendet werden Temperatursensoren: Überwachen die Temperatur im Inneren des Gehäuses	Miba: hochpräzise Komponenten wie Leistungselektronik und Kühltechnologien für Batteriespeicher entwickelt. Ihre Produkte unterstützen das Batteriemanagement und verbessern die Effizienz von Energiespeichersystemen.
Sicherheits- und Schutzsysteme	Sicherungssysteme: Schutz vor Kurzschlüssen und Überlastungen Überspannungsschutz: Schützt das System vor externen Überspannungen (z.B. durch Blitzeinschläge) Notabschaltung (E-Stop): Mechanismus zum sofortigen Abschalten der Anlage im Notfall Brandschutz: Feuerlöscher oder automatische Löschsyste, insbesondere bei größeren Batteriesystemen	
Verkabelung und elektrische Komponenten	Gleichstromkabel: Verbindet die Batterie mit dem Wechselrichter Wechselstromkabel: Verbindet den Wechselrichter mit dem Haushalts- oder Netzanschluss Verteilerkästen: Verteilung der elektrischen Anschlüsse zwischen Netz, Batterie und Verbrauchern Sicherungskästen: Zur Absicherung von Stromkreisen gegen Überlast oder Kurzschluss Leistungsschalter: Schützt vor Überlast und unterbricht den Stromfluss bei zu hoher Last	
Wechselrichter	Bidirektionaler Wechselrichter: Wandelt Gleichstrom (DC) aus der Batterie in Wechselstrom (AC) für das Stromnetz um und ermöglicht das Laden der Batterie aus dem Netz oder einer PV-Anlage Lade- und Entladeelektronik: Steuerung der Lade- und Entladevorgänge in der Batterie	Fronius

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
	Integrierter Netzumschalter: Wechselt automatisch zwischen Netzstrom und Batteriebetrieb bei Stromausfällen (bei Notstromfunktion)	
Zusätzliche Komponenten	Notstromversorgung: Umschalteneinrichtung und separate Stromkreise für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung bei Stromausfällen Solarladeregler: Wenn das System mit einer PV-Anlage verbunden ist, regelt dieser das Laden der Batterie durch die Solarmodule Zusätzliche Speichererweiterungen: Möglichkeit zur Skalierung des Systems durch Hinzufügen weiterer Batteriemodule oder Pakete Inselbetriebssystem: Elektronische Steuerungen für autarke Systeme ohne Netzanschluss	Elin Motoren ist auf Elektromotoren und Generatoren spezialisiert und liefert Komponenten, die in Batteriespeichersystemen verwendet werden können. Ihre Produkte sind in verschiedenen Bereichen der Energie- und Antriebstechnik im Einsatz.

Tabelle 17 gibt einen Überblick über potenzielle österreichische Hersteller von Komponenten für Batteriespeichern.

Tabelle 17: Komponenten von Batteriespeichern und potentielle österreichische Hersteller

Komponente	Potentielle alternative Hersteller
Anoden und Kathoden für Batterien	Miba AG
Elektroden	Plansee
Ganze Speicher	Fronius International GmbH
Materialien	Treibacher Industrie AG
Neue Batterietypen	Lithium Austria, Austrian Battery
Steuerungen	Siemens, Schneider Electric Austria
Überwachung und Steuerung	Infineon

3.4.1.4 Wertstrom der Komponenten

In Summe gab es in Österreich im Jahr 2023 ein Zubau von 57 000 PV-Speichersystemen mit einer kumulierten nutzbaren Speicherkapazität von 800 000 kWh. In Abbildung 9 werden die Kosten für stationäre Lithium-Ionen-Batteriespeicher (LIB) für die Speicherdauer von 2 bis 10 Stunden in Dollar pro Kilowattstunde (\$/kWh) dargestellt.

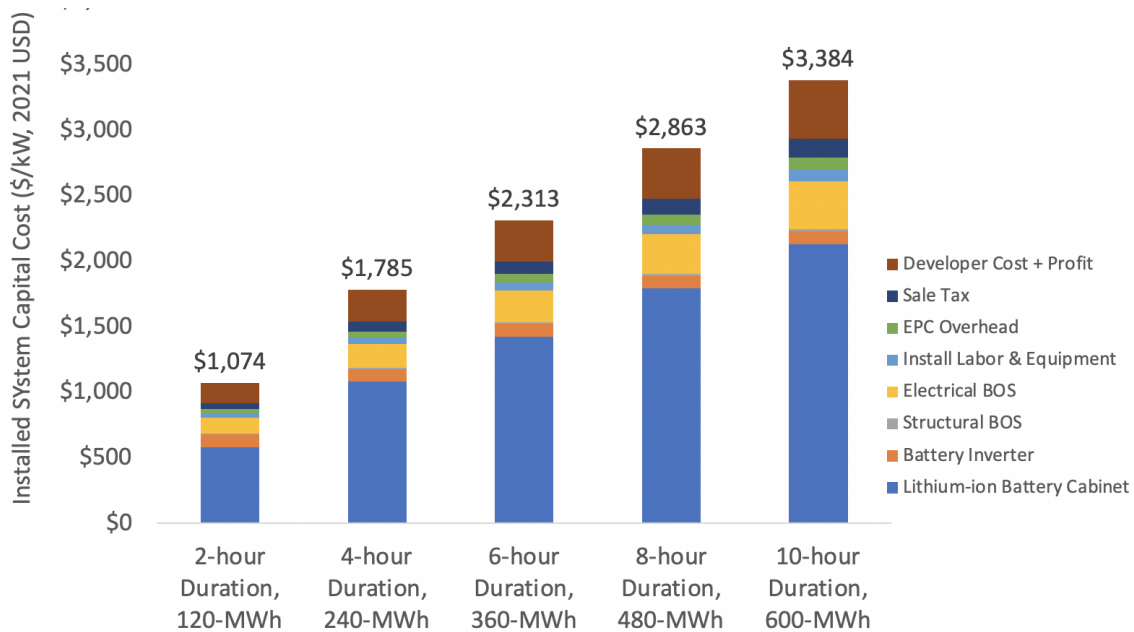


Abbildung 9: Systemkosten von Lithiumionenbatterien⁸³

Bei den Kosten von Stromspeichersystemen muss klar zwischen den Gesamtsystemkosten, die alle Komponenten vom Netzanschlusspunkt bis zu den Batteriezellen umfassen, und den Kosten der Batteriezellen unterschieden werden. Im Zeitraum 2018 und 2019 machten die Batteriezellen bei netzgebundenen Lithium-Ionen-Batterien etwa 45 bis 55% der Gesamtkosten aus. Der restliche Anteil entfällt auf die übrigen Komponenten wie Bauarbeiten, Montage, elektrische Schaltschränke, Kabel, HVAC-Systeme (Heizung, Lüftung, Klimaanlage), Überwachungssysteme, Brandschutz, Container und Ingenieursleistungen.

Die Internationale Energieagentur (IEA) prognostizierte in ihrem Bericht von 2018 einen Preis von etwa 190 US-Dollar pro kWh im Jahr 2040 und rund 210 US-Dollar pro kWh im Jahr 2030 für ein 8-Stunden-Lithium-Ionen-Batteriesystem. Die IEA ging von einem Ausgangspunkt von 400 USD pro kWh im Jahr 2018 aus, was jedoch als zu niedrig im Vergleich zu realen Projekten angesehen werden kann.

In der Praxis lagen die Gesamtkosten eines netzgebundenen Lithium-Ionen-Batteriesystems im Jahr 2018 bei etwa 450 EUR/kWh oder höher. Ein Beispiel ist ein Projekt in Brandenburg, Deutschland, mit einer Kapazität von 53 MWh und Kosten von 25 Millionen Euro, was spezifischen Kosten von 471 EUR/kWh entspricht. Ein weiteres Projekt in Heilbronn, Deutschland, aus dem Jahr 2017 hatte spezifische Kosten von über 800 EUR/kWh. In der Schweiz, bei einem Projekt in Volketswil, beliefen sich die Kosten auf etwa 752 EUR/kWh.

Diese Beispiele zeigen, dass die tatsächlichen Kosten für großflächige Lithium-Ionen-Batteriesysteme über den Schätzungen der IEA lagen. In Abbildung 10 wird die Kostenstruktur von Komponenten von Li-Ionen Batterien dargestellt.

⁸³ NREL, Utility-Scale Battery Storage https://atb.nrel.gov/electricity/2023/utility-scale_battery_storage, abgerufen am 30. Dezember 2024

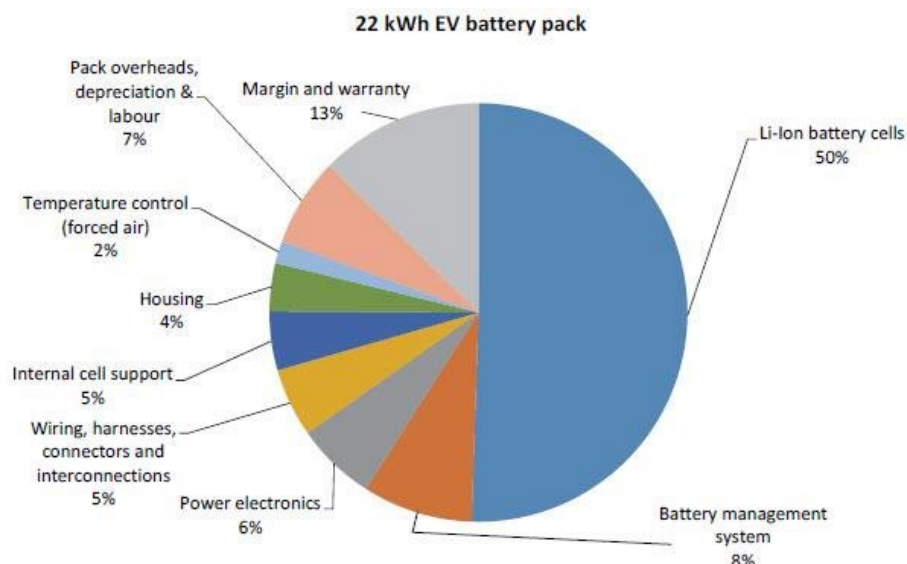


Abbildung 10: Kostenstruktur von Komponenten von Li-Ionen Batterien⁸⁴

Es wird erwartet⁸⁵, dass der weltweite Zubau an installierten Energiespeicherkapazitäten im Jahr 2023 mit 42 GW/99 GWh einen Rekord erreichen wird. Und es wird erwartet, dass sie bis 2030 mit 27% wachsen wird, mit einem jährlichen Zubau von 110 GW/372 GWh im Jahr 2030, was dem 2,6-fachen der für 2023 erwarteten Zahl entspricht.

Es ist mit weiter sinkenden Kosten für Batteriespeicher zu rechnen. Die Storage Futures Study beschreibt, dass ein größerer Teil dieser Kostensenkung auf die Kostenkomponente des Batteriepacks zurückzuführen ist, wobei weniger Kostensenkungen bei Speichermanagement, Installation und anderen Kostenkomponenten vorgenommen werden. Der Bericht der Storage Futures Study (NREL, BloombergNEF und andere gehen davon aus, dass das Wachstum der gesamten Batterieindustrie - im gesamten Unterhaltungselektroniksektor, im Transportsektor und im Stromversorgungssektor - langfristig zu Kostensenkungen führen wird. Kurzfristig hingegen rechnen einige Analysten mit stagnierenden oder sogar steigenden Preisen für Batteriespeicher. Darüber hinaus weisen BloombergNEF und andere darauf hin, dass Änderungen in der Lithium-Ionen-Chemie (z. B. die Umstellung von Kobalt) mit der Weiterentwicklung der Technologie ebenfalls die Kosten senken werden. Ein dritter Schlüsselfaktor ist die kontinuierliche Innovation mit umfangreicher unternehmerischer und öffentlicher Forschung zu Batterien.

Ein Vergleich der Wertströme der fünf betrachteten erneuerbaren Energietechnologien ist in Tabelle 28 zusammengefasst.

3.4.1.5 Vertrieb und Installation

In Österreich gibt es eine Reihe von Unternehmen, die sich auf den Vertrieb und die Wartung von stationären Batteriespeichern spezialisiert haben:

- Fronius International GmbH

⁸⁴ Electricity Storage With a Solid Bed High Temperature Thermal Energy Storage System (HTTES) - A Methodical Approach to Improve the Pumped Thermal Grid Storage Concept, January 2021, DOI: 10.2991/ahe.k.210202.005, Conference: 14th International Renewable Energy Storage Conference 2020 (IRES 2020)

⁸⁵ Dowlles, Market Insight: Global Energy Storage Market Outlook to 2030, <https://www.dowellelectronic.com/blogs/market-insight-global-energy-storage-market-outlook-to-2030/#:~:text=According%20to%20the%20research%2C%20the,the%20expected%20figure%20for%202023,abgerufen am 30. Dezember 2024>

Fronius ist ein international tätiges Unternehmen, das unter anderem Batteriespeicherlösungen für Photovoltaikanlagen anbietet. Sie bieten sowohl Vertrieb als auch Wartung von Energiespeichersystemen an.

Produkte: Fronius Energy Package, Fronius Solar Battery.

- Sonnen GmbH

Sonnen bietet Batteriespeicherlösungen und intelligente Energiemanagementsysteme an. Das Unternehmen hat ein Vertriebsnetzwerk in Österreich und bietet auch Wartungsdienstleistungen an.

Produkte: SonnenBatterie.

- Varta Storage GmbH

Varta ist ein etablierter Hersteller von Batteriespeichern. Sie bieten sowohl kleinere Speicher für den Hausgebrauch als auch größere Systeme für industrielle Anwendungen an.

Produkte: VARTA Pulse, VARTA Element.

- Kreisel Electric GmbH & Co KG

Kreisel Electric ist bekannt für seine hochentwickelten Batteriesysteme. Sie bieten stationäre Energiespeicher für private, gewerbliche und industrielle Anwendungen an.

Produkte: Kreisel Power Storage.

- TESVOLT GmbH

TESVOLT ist ein Spezialist für gewerbliche und industrielle Batteriespeicher und hat mehrere Partner in Österreich, die den Vertrieb und die Wartung übernehmen.

Produkte: TESVOLT Hochvolt- und Niedervolt-Speichersysteme.

- E3/DC

E3/DC bietet Batteriespeicher für den Eigenverbrauch von Solarstrom an. Sie arbeiten in Österreich mit Partnerunternehmen für Vertrieb und Wartung zusammen.

Produkte: Hauskraftwerk S10.

- Hager Energy GmbH

Hager Energy bietet smarte Energiemanagementsysteme inklusive Batteriespeichern und arbeitet eng mit Installationsbetrieben in Österreich zusammen.

3.4.2 End of life – Kreislaufwirtschaftsoptionen

Lithium-Ionen-Batterien sind die am häufigsten verwendeten Energiespeicher, insbesondere in der Elektromobilität und bei erneuerbaren Energien. Ihre Lebensdauer hängt stark von der Art der Nutzung ab, insbesondere von der Tiefenentladung, den Ladetemperaturen und der Ladehäufigkeit. Die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien beträgt 10 bis 15 Jahre oder 3 000 bis 7 000 Ladezyklen. Mit der Zeit sinkt die Kapazität der Batterie aufgrund chemischer Abnutzung, typischerweise um etwa 2-5% pro Jahr.

Nur 1% des Lithiums wird heute recycelt, ein kleiner Bruchteil im Vergleich zu anderen Materialien wie Blei, Aluminium oder Kupfer. Der größte Teil des in Batterien verwendeten Lithiums landet immer noch auf Mülldeponien oder wird für das zukünftige Recycling gelagert, wenn Technologien und Prozesse fortschrittlicher sind. Regierungen und Organisationen beginnen mit der Umsetzung von Maßnahmen, um ein besseres Recycling von Lithium zu gewährleisten. So enthält die Batterieverordnung der Europäischen

Union beispielsweise Ziele für die Lithiumrückgewinnung aus Batterien, die bis 2030 eine Rückgewinnungsrate von 70% anstreben. Saubermacher war im Batterierecycling engagiert, hat sich jedoch 2023 aufgrund zu hohen Investitionsbedarfs aus diesem Segment zurückgezogen.

3.4.3 Zukünftige Technologien

Neueste Entwicklungen sind in verschiedenen Review-Papers beschrieben.⁸⁶ Folgende zukünftige Entwicklungen könnten im Bereich der Energiespeicherung relevant werden:

Festkörperbatterien ersetzen die flüssigen Elektrolyte durch feste Elektrolyte, was die Sicherheit und Energiedichte erheblich verbessern kann. Zu den Vorteilen gehören:

- Festkörperbatterien können mehr Energie in einem kleineren Raum speichern, was die Reichweite von Elektrofahrzeugen erhöht.
- Sie sind weniger anfällig für Brände und Überhitzung im Vergleich zu herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien.
- Weniger Verschleiß durch dendritische Bildung, was die Lebensdauer der Batterie verlängern könnte.

Lithium-Schwefel-Batterien bieten eine potenziell höhere Energiedichte als herkömmliche Lithium-Ionen-Batterien. Schwefel hat eine hohe theoretische Kapazität, die die Energieinhalte von Batterien erheblich steigern könnte. Schwefel ist kostengünstig und reichlich vorhanden, was die Produktionskosten senken. Diese Technologie könnte eine umweltfreundlichere Alternative zu herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien darstellen.

Natrium-Ionen-Batterien sind eine vielversprechende Alternative zu Lithium-Ionen-Batterien, insbesondere aufgrund der Verfügbarkeit von Natrium. Erste Anwendungen sind aus China bekannt.⁸⁷

Redox-Flow-Batterien sind wiederaufladbare Batterien, die auf dem Fluss von Elektrolyten basieren.

Innovationen in der Kohlenstofftechnologie, wie z. B. Graphen-Batterien und Kohlenstoffnanoröhren, zeigen vielversprechende Ergebnisse.

Mit dem Anstieg der Batterienutzung wächst auch das Interesse an Recyclingtechnologien. Steigende Nutzung motiviert auch die Implementierung von Geschäftsmodellen, die den gesamten Lebenszyklus von Batterien abdecken, einschließlich Herstellung, Nutzung und Recycling.

Ultra-Kondensatoren sind eine Ergänzung zu herkömmlichen Batterien, die eine hohe Leistung und lange Lebensdauer bieten.

Batterien für Lastwagen sind ein potentiell großer Anwendungsbereich.⁸⁸

3.4.4 Stakeholder im Bereich Energiespeicher

Das AIT arbeitet an innovativen Lösungen für die Energiespeicherung, einschließlich der Entwicklung von Batteriemanagementsystemen und der Integration von Energiespeichern in smart Grids.

Das Institut für Chemische Technologien und Analytik (ICTA) - TU Wien beschäftigt sich mit der Entwicklung von neuen Materialien für Lithium-Ionen-Batterien und Festkörperbatterien. Forschungsschwerpunkte

⁸⁶ Hamdan, A., et al. Next-generation batteries and U.S. energy storage: A comprehensive review: Scrutinizing advancements in battery technology, their role in renewable energy, and grid stability, January 2024 World Journal of Advanced Research and Reviews 21(1):1984-1998

⁸⁷ Chinesisches E-Moped mit Natrium Batterie, https://futurezone.at/produkte/china-yadea-guanneng-q50-elektrisches-e-moped-natrium-batterie-440-euro/402996512?dicbo=v2-t50e1e4&utm_source=outbrain_widget&utm_medium=display&utm_campaign=kurierat_traffic, abgerufen am 10. 1. 2025

⁸⁸ Fleischman, J., How batteries will drive the zero-emission truck transition, McKinsey, 2024

umfassen die Optimierung von Elektrolyten, Kathodenmaterialien und den Einfluss von Nanostrukturen auf die Leistung von Batterien.

Das LIT-BATT an der Johannes Kepler Universität Linz ist auf die Forschung im Bereich Batterietechnologien spezialisiert, insbesondere Lithium-Ionen-Batterien und innovative Energiespeichersysteme. Die Gruppe arbeitet an der Verbesserung der Effizienz, Sicherheit und Lebensdauer von Batterien sowie an Recyclinglösungen.

Das Zentrum für Angewandte Energieforschung in Graz führt angewandte Forschung zu Energiespeichertechnologien durch, darunter die Entwicklung von Redox-Flow-Batterien und Photovoltaik-Batteriespeichersystemen. Es wird auch an der Integration von Energiespeichern in das Stromnetz geforscht.

Im Batteriezentrum Graz forschen Wissenschaftler an der Entwicklung und Optimierung von Batterietechnologien und Energiespeichersystemen.

Ausbildung in Batterien und Energiespeichern führen folgende Institutionen durch:

Die TU Wien bietet verschiedene Studiengänge im Bereich Verfahrenstechnik, Chemie und Elektrotechnik, die Kurse zu Batterietechnologien und Energiespeichern enthalten. Im Masterstudiengang Chemie und Chemische Verfahrenstechnik können Studierende Vertiefungen im Bereich der Batterieforschung wählen.

Die JKU Linz bietet im Rahmen ihrer Technischen Studiengänge Vertiefungen in den Bereichen Energietechnologie und Materialwissenschaften, die Themen rund um Batterien und Energiespeicher behandeln.

Die Fachhochschule Joanneum in Graz bietet einen Bachelor- und Masterstudiengang in Energie- und Umweltmanagement, der auch Aspekte von Energiespeichertechnologien abdeckt.

Es gibt verschiedene Schulungsprogramme und Workshops in Österreich, die sich auf Batterietechnologien und Energiespeicherung konzentrieren, häufig organisiert von Fachverbänden oder Industriepartnern.

Akkreditierte Weiterbildungen in den Bereichen Energiespeicherung, Elektromobilität und nachhaltige Energietechnologien werden von Institutionen wie der Wirtschaftskammer Österreich und anderen Bildungsanbietern angeboten.

Das Österreichische Batterienetzwerk fördert den Austausch zwischen Forschung, Industrie und Bildungseinrichtungen im Bereich der Batterietechnologie. Es unterstützt auch gemeinsame Forschungsprojekte und Initiativen zur Entwicklung innovativer Batterielösungen.

3.4.5 Chancen und Risiken für potentielle österreichische Hersteller

Chancen und Trends zur Stärkung einer industriellen Wertschöpfung in Österreich sind:

- Elektromobilität und daraus ansteigende Nachfrage der Automobilindustrie
- Produktion in Europa mit Vorteilen in Bezug auf Logistikkosten und Transportrestriktionen (Gefahrgut), aber auch den strategischen Vorteil der Technologiesouveränität
- Zunehmende Nachfrage nach stationären Speichersystemen im Zuge steigender Anteile von erneuerbarer Energie

Die Entwicklung von Verfahren zur Wiederverwertung von Batteriematerialien bietet Unternehmen die Möglichkeit, im Bereich der Kreislaufwirtschaft aktiv zu werden. Österreichische Firmen könnten sich auf innovative Recyclingtechnologien spezialisieren, um Rohstoffe zurückzugewinnen und damit die Umweltauswirkungen von Batterien zu reduzieren.

Saubermacher kaufte 2018 die Bremer Firma Redux Recycling GmbH, den führenden Lithium-Ionen-Batterie-Recycler in der EU. 2023 erwarb Redwood 100 Prozent der Saubermacher-Tochter⁸⁹.

Der Fokus auf die Entwicklung von festen Elektrolyten, Natrium-Ionen-Batterien und Lithium-Schwefel-Batterien bietet Unternehmen die Möglichkeit, innovative Produkte zu schaffen, die sich von bestehenden Technologien abheben. In Österreich gibt es Initiativen wie das Austrian Battery Network, die den Austausch von Wissen und Ressourcen zwischen Firmen fördern und Netzwerkmöglichkeiten bieten. Unternehmen können spezielle Nischenmärkte, wie zum Beispiel Energiespeicherlösungen für erneuerbare Energien oder Batteriesysteme für industrielle Anwendungen, identifizieren und bedienen.

In Tabelle 18 wird das Ergebnis der SWOT Analyse für Energiespeicher dargestellt.

Tabelle 18: SWOT Analyse Energiespeicher

Stärken Hoher Technologiestandard und Innovationskraft Politische Unterstützung für Energiewende Nähe zum EU-Markt und Lieferketten im DACH-Raum Starkes Umweltbewusstsein in der Bevölkerung	Schwächen Hohe Produktions- und Arbeitskosten Kleine Produktionskapazitäten im Vergleich zum Weltmarkt Mangel an Rohstoffen Ausschließlicher Import von Batteriezellen Hoher Investitionsbedarf Fokus auf kleine und mittelständische Unternehmen (KMU)
Chancen Wachsender Bedarf an dezentraler Energieversorgung und Energiespeicherlösungen Förderprogramme und EU-Investitionen Technologische Fortschritte bei Batterietechnologien Entwicklung des Elektromobilitätsmarktes Nachfrage nach Energiesicherheit und Blackout-Schutz	Risiken Starke internationale Konkurrenz Abhängigkeit von volatilen Rohstoffmärkten Regulatorische Unsicherheiten und lange Genehmigungsverfahren Umweltbedenken und Entsorgung von Batterien Fachkräftemangel und technologische Konkurrenz

Stärken

Österreich verfügt über gut ausgebildete Fachkräfte und eine starke Forschungs- und Entwicklungslandschaft, insbesondere in den Bereichen Elektrotechnik und erneuerbare Energien. Dies unterstützt die Entwicklung und Produktion hochwertiger Energiespeichertechnologien.

Die österreichische Regierung hat sich ehrgeizige Ziele für erneuerbare Energien und Energiespeicher gesetzt. Förderprogramme und steuerliche Anreize für die Entwicklung und Nutzung von Energiespeichern schaffen eine stabile Basis für Investitionen in die Produktion.

Die zentrale Lage Österreichs bietet strategische Vorteile für die Belieferung des europäischen Marktes. Kurze Transportwege innerhalb der EU und der DACH-Region reduzieren Kosten und CO₂-Emissionen.

Die hohe Akzeptanz und das Umweltbewusstsein der österreichischen Bevölkerung unterstützen die Nachfrage nach Energiespeichern, vor allem für erneuerbare Energien und Eigenverbrauchsoptimierung im Privatsektor.

Schwächen

⁸⁹ Saubermacher (2023): Saubermacher schließt mit Redwood strategische Partnerschaft für nachhaltiges Batterierecycling, <https://saubermacher.at/presse/saubermacher-schliesst-partnerschaft-mit-redwood/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Im Vergleich zu anderen Ländern in Europa oder Asien sind die Lohn- und Produktionskosten in Österreich hoch. Dies kann die Wettbewerbsfähigkeit der österreichischen Energiespeicherproduktion beeinträchtigen.

Die Produktionskapazitäten österreichischer Unternehmen sind im internationalen Vergleich relativ gering. Dadurch ist es schwierig, den Preiswettbewerb mit großen globalen Produzenten zu bestehen, insbesondere bei standardisierten Speicherlösungen.

Österreich verfügt über keine signifikanten Vorkommen an kritischen Rohstoffen für Energiespeicher, wie etwa Lithium, Nickel oder Kobalt, was eine starke Abhängigkeit von Importen bedeutet.

Die österreichische Industrie ist stark von KMUs geprägt, was zwar Innovationsvorteile bietet, jedoch Skaleneffekte begrenzt. Dies macht es schwierig, global konkurrenzfähige Stückzahlen kosteneffizient zu produzieren.

Chancen

Die Nachfrage nach Speichern steigt aufgrund der vermehrten Nutzung von Photovoltaik-Anlagen und der dezentralen Energieversorgung, sowohl im privaten als auch im industriellen Bereich. Energiespeicher werden zu einem essenziellen Bestandteil der Energiewende.

Die EU fördert aktiv den Ausbau der Energiespeicherproduktion in Europa, um die Abhängigkeit von asiatischen Produzenten zu verringern. Österreichische Unternehmen können von Subventionen und Förderprogrammen profitieren, die die Entwicklung und Produktion von Energiespeichern unterstützen.

Neue Technologien, wie Feststoffbatterien oder alternative Materialien wie Natrium-Ionen, bieten die Möglichkeit, sich mit innovativen Produkten zu differenzieren und die Abhängigkeit von knappen Ressourcen wie Lithium zu reduzieren.

steigende Nachfrage nach Elektromobilität und der Ausbau der Ladeinfrastruktur bieten Potenzial für die Produktion von Speichern für Fahrzeuge und Ladegeräte, die auch durch die österreichische Automobilzulieferindustrie genutzt werden können.

Angesichts der zunehmenden Bedeutung von Energiesicherheit und Resilienz steigt das Interesse an Speichersystemen für Haushalte und Unternehmen, die als Backup-Lösungen dienen können.

Die globale Patentierungstätigkeit nahm zwischen 2005 und 2018 viermal schneller zu als im Schnitt aller technischen Gebiete. Das wichtigste Innovationsfeld war dabei Batterietechnik: Der Studie zufolge waren neun von zehn Patenten im Bereich Stromspeicherung Erfindungen in der Batterietechnik, mit großem Abstand gefolgt von anderen elektrischen (9 Prozent), thermischen (5) und mechanischen (3) Speicherlösungen. Über den gesamten Zeitraum von 2000 bis 2018 rangiert in Europa Deutschland mit 5 080 Patentanmeldungen im Bereich Batterietechnik an der Spitze, vor Frankreich (1 354) und Großbritannien (652). Österreich liegt mit 332 Patenten auf dem vierten Platz. Speichertechnologien wie Superkondensatoren und Redox-Flow-Batterien nehmen rasch an Bedeutung zu.⁹⁰

Risiken

Länder wie China, die USA und Südkorea dominieren den globalen Markt für Energiespeicher und bieten aufgrund ihrer Skalenvorteile und geringeren Produktionskosten deutlich günstigere Produkte. Dies erschwert es österreichischen Unternehmen, wettbewerbsfähig zu bleiben.

⁹⁰ BMK, Patente für Stromspeicher-Technologien schnellen in die Höhe, <https://infothek.bmk.gv.at/patente-fuer-stromspeicher-technologien-schnellen-in-die-hoehe/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Die Preise für wichtige Rohstoffe wie Lithium, Nickel und Kobalt unterliegen starken Schwankungen. Da Österreich diese Rohstoffe importieren muss, kann dies die Produktionskosten erheblich beeinflussen.

Veränderungen in der Förderpolitik oder Verzögerungen bei Genehmigungsverfahren könnten das Wachstum der Energiespeicherproduktion verlangsamen oder verteuern.

Die umweltgerechte Entsorgung von Batterien und die damit verbundenen Vorschriften stellen eine Herausforderung dar. Nachhaltigkeitsanforderungen und Recyclingkosten können die Rentabilität verringern und zu zusätzlichem Aufwand führen.

Der Fachkräftemangel in technischen Berufen könnte die Skalierung der Produktion erschweren. Gleichzeitig entstehen ständig neue technologische Entwicklungen, was für KMU eine Herausforderung darstellt, um wettbewerbsfähig zu bleiben.

Diese SWOT-Analyse zeigt, dass die Produktion von Energiespeichern in Österreich gute Voraussetzungen hat, vor allem durch hohe Qualität und Innovationskraft, und von der steigenden Nachfrage nach dezentralen Energiespeicherlösungen profitieren kann. Die internationale Konkurrenz und die hohen Produktionskosten stellen jedoch erhebliche Herausforderungen dar. Österreichische Unternehmen könnten durch die Nutzung von Förderprogrammen und die Fokussierung auf technologische Innovation eine Nische in einem wachsenden Markt erschließen.

3.5 Elektrolyseure

3.5.1 Wertschöpfungskette Elektrolyse

3.5.1.1 Beschreibung der Technologie

Elektrolyseure nutzen elektrische Energie, um chemische Reaktionen zu erzwingen, die normalerweise nicht spontan ablaufen. Das Hauptziel eines Elektrolyseurs ist die Zerlegung von Wasser in seine Grundbestandteile Wasserstoff und Sauerstoff durch den Prozess der Elektrolyse. Die Elektrolyse ist ein elektrochemischer Prozess, bei dem elektrischer Strom durch eine Elektrolytlösung oder -flüssigkeit geleitet wird, um eine chemische Reaktion zu bewirken. Für die Wasserelektrolyse wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt.

Die wichtigsten Teile eines Elektrolyseurs umfassen Anode, Kathode, Elektrolyt, Separator, Stromsammler und Gehäuse. Jede dieser Komponenten wird in spezialisierten Anlagen hergestellt. Aus diesen Teilen erfolgt die Montage des Elektrolyseurs.

Die Anode, der Separator und die Kathode werden in einer bestimmten Reihenfolge in einer Zelle angeordnet. In einem typischen Elektrolyseur bestehen mehrere Zellen, die zu einem Stapel zusammengefügt werden.

Bei alkalischen Elektrolyseuren wird die Elektrolytlösung in die Kammer eingefüllt. Bei PEM-Elektrolyseuren wird die Membran in die Zellen integriert, wobei die Katalysatormaterialien aufgebracht werden.

Die elektrischen Verbindungen zu den Stromsammlern werden hergestellt, um sicherzustellen, dass der Strom effizient zu den Elektroden geleitet wird.

Der Elektrolyseur wird in ein Gehäuse eingebaut, das oft auch Kühl- und Sicherheitseinrichtungen enthält.

Nach der Montage wird der Elektrolyseur auf seine Funktionalität getestet. Dabei werden wichtige Parameter wie Spannungs-, Strom- und Temperaturverhalten überwacht, um sicherzustellen, dass der Elektrolyseur effizient arbeitet.

Um die Effizienz und Lebensdauer des Elektrolyseurs zu gewährleisten, sind regelmäßige Wartungsarbeiten erforderlich. Dazu gehören Inspektionen der Elektroden, der Elektrolytlösung und der elektrischen Verbindungen.

Am Ende der Lebensdauer des Elektrolyseurs können bestimmte Materialien, wie die Metalle der Elektroden, recycelt werden, um wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen.

3.5.1.2 Materialien (Abbau und Metallurgie)

In Tabelle 19 werden die wesentlichen Materialien für die Herstellung von Elektrolyseanlagen dargestellt. In der Tabelle sind die kritischen Rohstoffe rot hervorgehoben.

Tabelle 19: Materialien und Prozesse Elektrolyseanlagen

Rohstoffe	kg/MW Stack	Bedarf für 10 GW [t]	Bedarf Österreich [t/a]	IDEMAT [kg CO _{2e} /kg]	CF [kg CO _{2e} /MW]	CF %
Activated Carbon	9	90	> 1 000 t	3,2	29	0
Aluminium	27	270	> 300 000 t	4,7	127	1
Copper	4,54	45,4	35 000 t, 50% Recycling	3,2	15	0
Iridium	0,75	7,5	ca. 10 kg	149,2	112	1

Rohstoffe	kg/MW Stack	Bedarf für 10 GW [t]	Bedarf Österreich [t/a]	IDEMAT [kg CO _{2e} /kg]	CF [kg CO _{2e} /MW]	CF %
Nafion	16	160		9,4	150	1
Platin	0,075	0,75	ca. 50 kg	10,7	0,80	0
Stainless steel	100	1 000	>10 000 t	1,9	190	1
Titanium	528	5 280	> 100 t	29,5	15576	96

Nafion-Membranen⁹¹ werden hauptsächlich von Chemours hergestellt, dem führenden Hersteller dieses Materials. Nafion ist ein sulfoniertes Fluorpolymer-Copolymer auf Tetrafluorethylenbasis, das aufgrund seiner außergewöhnlichen Protonenleitfähigkeit und chemischen Stabilität in Anwendungen wie Brennstoffzellen und Elektrolyseuren eingesetzt wird.

3.5.1.3 Komponentenfertigung

Hauptkomponenten eines Elektrolyseurs sind Elektroden, Elektrolyt, Membranen und eine Stromquelle.

Elektroden:

- Anode (positive Elektrode): Hier findet die Oxidation statt, bei der Wasser (H₂O) in Sauerstoff (O₂), Protonen (H⁺) und Elektronen (e⁻) zerlegt wird.
- Kathode (negative Elektrode): Hier findet die Reduktion statt, bei der die Protonen (H⁺) Elektronen aufnehmen und zu Wasserstoffgas (H₂) reduziert werden.

Der Elektrolyt verbindet die Elektroden miteinander und ermöglicht die Ionenbewegung. Bei der Wasserelektrolyse wird oft Wasser mit einem Elektrolyten wie Kaliumhydroxid (KOH) oder Schwefelsäure (H₂SO₄) verwendet, um die Leitfähigkeit zu erhöhen.

Eine Membran oder ein Separator trennen die Anode von der Kathode, um zu verhindern, dass die produzierten Gase (Wasserstoff und Sauerstoff) sich vermischen. Diese Membran kann auch für die Selektivität der Reaktion sorgen, indem sie nur bestimmte Ionen durchlässt.

Ein Elektrolyseur benötigt eine externe Stromquelle, um den elektrochemischen Prozess zu ermöglichen. Diese Stromquelle liefert Gleichstrom, der durch das Wasser und den Elektrolyten fließt.

An der Anode wird Wasser oxidiert, was Sauerstoff, Protonen (H⁺) und Elektronen (e⁻) erzeugt. An der Kathode reagieren die Protonen (H⁺) und die Elektronen (e⁻) zu Wasserstoffgas (H₂).

Der erzeugte Wasserstoff und Sauerstoff sammeln sich an den entsprechenden Elektroden und können durch Auslassventile abgeleitet werden.

Typen von Elektrolyseuren

Alkaline Elektrolyseure:

- Elektrolyt: Ein alkalischer Elektrolyt wie Kaliumhydroxid (KOH) oder Natriumhydroxid (NaOH).
- Vorteile: Kostengünstig und bewährt. Gute Effizienz bei niedrigen bis mittleren Temperaturen.
- Nachteile: Größere Anfälligkeit für Korrosion und begrenzte Lebensdauer.

⁹¹ Nafion™ Sulfonsäuremembranen, Membranen für verschiedenste elektrochemische Anwendungen, <https://www.nafion.de/products/sulfonic-membranes>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Protonenaustauschmembran (PEM) Elektrolyseure:

- Elektrolyt: Eine protonenleitende Membran, die die Anode und Kathode trennt.
- Vorteile: Hohe Effizienz, kompakte Bauweise, hohe Reinheit des Wasserstoffs.
- Nachteile: Höhere Kosten, empfindlich gegenüber Verunreinigungen.

Hochtemperatur-Elektrolyseure (HTE):

- Elektrolyt: Festoxid-Elektrolyt, oft in Form von Keramiken.
- Vorteile: Hohe Effizienz, insbesondere bei der Nutzung von Abwärme aus industriellen Prozessen.
- Nachteile: Hohe Betriebstemperaturen, komplexe Technik.

In Tabelle 20 werden die Komponenten von Elektrolyseuren und die österreichischen Hersteller der Komponenten dargestellt.

Tabelle 20: Komponenten von Elektrolyseuren und österreichische Hersteller

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
Dokumentation und Zertifizierung	Betriebsanleitung: Detaillierte Anleitung für Installation, Betrieb und Wartung der Anlage Wartungsprotokolle: Dokumentation für die regelmäßige Wartung und Überprüfung der Anlage Zertifikate und Zulassungen: Nachweise über die Erfüllung der technischen und sicherheitsrelevanten Standards (z.B. CE-Zertifizierung)	
Elektrolysezelle	Elektrolysemodul (Stacks): Stapel von Zellen, die den Elektrolyseprozess durchführen. Jede Zelle besteht aus: Elektroden (Anode und Kathode): Anodenmaterial (z.B. Platin, Iridiumoxid) und Kathodenmaterial (z.B. Platin, Nickel) Membran (bei PEM-Elektrolyse): Protonenleitende Membran (z.B. Nafion) zwischen Anode und Kathode Dichtungen und Separatoren: Trennen die Gase und verhindern Vermischung Bipolare Platten: Leiten Strom zwischen den Zellen und trennen die Gase in der Zelle Gasdiffusionslagen: Unterstützen den Gastransport und die Wasserstoffentwicklung an den Elektroden	Plansee Group: Bipolarplatten und Komponenten für Elektrolyseure und Brennstoffzellen. SITEC: Ein Anbieter von maßgeschneiderten Lösungen für die Herstellung von metallischen Bipolarplatten. Sie bieten Prototypen- und Serienfertigung an, speziell für PEM- und SOFC-Elektrolyseure
Gasmanagementsystem	Gassammelbehälter: Zur Sammlung des produzierten Wasserstoffs und Sauerstoffs Druckregler und Ventile: Zur Regelung des Drucks in den Sammelbehältern und zur Verhinderung von Überdruck Gasfilter: Entfernen eventuelle Verunreinigungen aus dem erzeugten Gas Gasverdichter (optional): Verdichtung des erzeugten Wasserstoffs für die Lagerung oder den Transport Gasleitungen: Rohrleitungen für den sicheren Transport von Wasserstoff und Sauerstoff zu den Sammelbehältern oder Lagerstätten	Linde Gas GmbH: Linde bietet komplette Gasmanagementsysteme an, einschließlich Gasverdichter und Speicherlösungen für Wasserstoff, die sich für industrielle Elektrolyseprojekte eignen.

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
Gehäuse und Sicherheitseinrichtungen	Anlagengerüst/Gehäuse: Schutzgehäuse, das die Elektrolyseanlage umschließt und Sicherheit gewährleistet Ex-geschützte Ausrüstung (für explosionsgefährdete Bereiche): Spezielle, gegen Explosionsgefahr geschützte Komponenten und Gehäuse Notabschaltung (E-Stop): Mechanismus zum sofortigen Stoppen der Elektrolyseanlage im Notfall Brandschutzsysteme: Löschsysteme zur Bekämpfung von Bränden im Bereich der Anlage (insbesondere bei Wasserstoffanwendungen)	
Isolierung und Korrosionsschutz	Isoliermaterialien: Wärmedämmung für bestimmte Komponenten, um Energieverluste zu minimieren Korrosionsschutzbeschichtung: Schutz der metallischen Teile gegen Rost und chemische Einwirkungen	
Kühlsystem	Wärmetauscher: Kühlen das Wasser oder Elektrolyt, das während der Elektrolyse erhitzt wird Kühlmittelpumpe: Zirkuliert das Kühlmittel durch das System Kühlsystemleitungen: Leitungen zur Verbindung der Kühlkomponenten mit dem Elektrolysesystem	Schneider Electric: Dieses Unternehmen liefert Kühl- und Steuerungssysteme, die auf Anwendungen wie Elektrolyseure abgestimmt sind.
Netzteil und Stromversorgung	Gleichstromquelle: Liefert den Strom für den Elektrolyseprozess (typisch mehrere Hundert bis Tausend Ampere bei niedriger Spannung) Verkabelung und Anschlüsse: Hochstromkabel und Klemmen für die Verbindung der Elektrolysezelle mit der Stromquelle Stromverteiler: Verteilt den Strom gleichmäßig auf die einzelnen Zellen im Stack	Fronius International GmbH: Fronius ist bekannt für seine Expertise in Schweißtechnik und Solarelektronik, bietet aber auch Stromversorgungslösungen, die für Hochstromanwendungen wie Elektrolyseure geeignet sind. Fronius hat sich 2024 aus der Elektrolyse zurückgezogen.
Steuerungs- und Überwachungssystem	Steuerungseinheit: Programmierbare Steuerung zur Regelung des Elektrolyseprozesses, einschließlich Start/Stop, Stromsteuerung und Sicherheitsüberwachung Sensoren: Überwachungssensoren für Temperatur, Druck, Gaszusammensetzung und Leitfähigkeit des Wassers Sicherheitsüberwachung: Gasdetektoren, die das Vorhandensein von Wasserstoff und Sauerstoff überwachen und bei Überschreitungen Alarm auslösen Benutzerinterface: Anzeige und Kontrolle der Betriebsparameter für die Bediener (z.B. Touchscreen oder Web-basiertes Interface)	
Verrohrung und Verbindungselemente	Hochdruckleitungen: Rohrleitungen zur sicheren Handhabung des Wasserstoffs	

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
	Verbindungsstücke und Flansche: Hochspezialisierte Verbindungen für die Installation der Gasleitungen und Wasserzufuhr Dichtungen: Hochtemperatur- und druckfeste Dichtungen zur Verhinderung von Leckagen	
Wasserstoffspeichersystem (optional)	Druckspeicherbehälter: Speichert den erzeugten Wasserstoff unter hohem Druck (z.B. 200–700 bar) Kompressoren: Verdichten den Wasserstoff für die Speicherung oder Einspeisung in Transportbehälter Sicherheitsventile und Berstscheiben: Schutz vor Überdruck im Speichersystem	
Wasserzufuhrsystem	Wassertank: Zur Versorgung der Elektrolysezelle mit reinem Wasser (z.B. destilliertes oder deionisiertes Wasser) Wasseraufbereitungssystem: Filtrations- und Entsalzungsanlage für reines Wasser (z.B. Umkehrosmose oder Ionenaustauscher) Umwälzpumpen: Fördern das Wasser durch die Elektrolysezellen Ventile und Sensoren: Druck- und Durchflusssensoren zur Überwachung der Wasserzufuhr	Andritz AG: Das Unternehmen bietet Lösungen im Bereich der Wasseraufbereitung an, die für Elektrolyseure verwendet werden können, insbesondere Wasserfiltrations- und Entsalzungstechnologien.

Tabelle 21 gibt einen Überblick über potenzielle österreichische Hersteller von Komponenten für Elektrolyseuren.

Tabelle 21: Komponenten von Elektrolyseuren und potentielle österreichische Hersteller

Komponente	Potentielle alternative Hersteller
Automatisierungslösungen und elektrische Steuerungssysteme	Schneider Electric
Beschichten - Trockenofen oder Sinterofen	Aichelin, Gauchi
chemische Materialien und Membrantechnologien	Lenzing
Graphitkomponenten für Bipolarplatten	SGL Carbon GmbH
Hochleistungsstähle und metallische Komponenten für Elektroden, Bipolarplatten oder andere Bauteile von Elektrolyseuren.	voestalpine
Katalysator- und Elektrodenentwicklung für Elektrolyseure	Treibacher Industrie AG
Materialien für Elektroden, Membranen und andere Hochleistungsbauteile.	Plansee AG
Stromversorgung und Steuerungstechnik für Elektrolyseure, Systemintegration für Wasserstoffproduktion.	Fronius
Test- und Steuerungstechnik, Elektronikkomponenten für Elektrolyseure	AVL
Titan gesinterte poröse Platte Sinter mesh	Plansee AG, Andritz AG Titan gesinterte poröse Platte Sinter mesh
Zuschnitt CNC- Membran-Schneidemaschine -Fräsmaschine oder Laserschneidemaschine	Trumpf: Maschinen zum Biegen, Stanzen, kombinierte Stanz-Laser-Prozesse, 2D- und 3D-Schneidanwendungen oder Laserschweißen. 3D-Druck

3.5.1.4 Wertstrom der Komponenten

Die Abbildung zeigt die Aufteilung der Investitionskosten einer Elektrolyseanlage in zwei verschiedenen Kategorien. Im linken Diagramm wird die Verteilung der Kosten nach Anlagenkomponenten dargestellt. Hierbei entfallen 40% auf den Elektrolyseblock, 7% auf die Betriebstechnik, 9% auf die Gasnachbehandlung, 17% auf Umhausung und Sicherungstechnik, 21% auf verfahrenstechnische Kreisläufe und 5% auf sonstige Komponenten.

Das rechte Diagramm hingegen zeigt die Verteilung der Investitionskosten nach Wirtschaftszweigen. In diesem Zusammenhang entfallen 48% auf Metallerzeugnisse, 1% auf Datenverarbeitungsgeräte, 7% auf Elektroausrüstung, 26% auf Maschinenbau, 2% auf Reparatur und Installation, 1% auf sonstige Ausgaben, 10% auf Gummi- und Kunststoffwaren sowie 5% auf Metallbearbeitung.

Diese beiden Diagramme veranschaulichen die komplexe Kostenstruktur von Elektrolyseanlagen und deren Abhängigkeiten von unterschiedlichen Komponenten und Industrien.

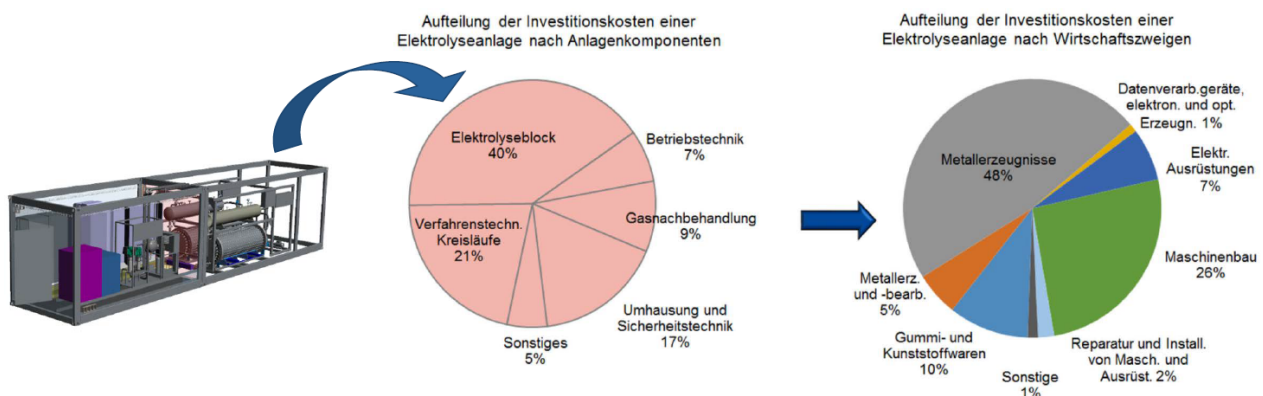


Abbildung 11: Kosten von Komponenten

Der Elektrolyseur besteht zu mehr als 50% aus Metallbauteilen. Die Maschinenbau-, Elektrotechnik- und Kunststoffindustrie haben die größten Wertschöpfungsanteile. Die Fertigung erfolgt überwiegend in händischer Einzelfertigung. Die Herstellverfahren auf Komponentenebene sind teilweise automatisiert⁹².

Für Anlagen zur Herstellung von Elektrolyseuren liegen die Kapitalkosten im Bereich von 65-150 USD/kW bzw. 60-175 USD/kW.⁹³ Hier eine Übersicht der typischen Kosten je nach Technologie:

Die Kosten für alkalische Elektrolyseure liegen derzeit zwischen 700 EUR/kW und 1.200 EUR/kW. Dies ist die günstigste und an der weitesten verbreitete Technologie für größere Produktionsanlagen.

PEM-Elektrolyseure sind teurer und kosten typischerweise zwischen 1 000 EUR/kW und 1 800 EUR/kW. Die Technologie bietet jedoch Vorteile in Bezug auf Flexibilität und eine schnellere Ansprechzeit, was sie für schwankende Stromquellen wie Wind- oder Solarenergie attraktiv macht.

Ein Elektrolyseur mit 1 kW elektrischer Leistung produziert bei 70% Effizienz etwa 17,86 Gramm Wasserstoff pro Stunde.

⁹² FVEE – Jahrestagung 2020: Forschung für den European Green Deal, Erneuerbare Energie – Chancen einer industriellen Wertschöpfung in Europa, <https://www.fvee.de/wp-content/uploads/2021/12/folie-2-3-chancen-industrieller-wertschoepfung.pdf>, abgerufen am 30. Dezember 2024

⁹³ International Energy Agency, Advancing Clean Technology Manufacturing An Energy Technology Perspectives Special Report, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7e7f4b17-1bb2-48e4-8a92-fb9355b1d1bd/CleanTechnologyManufacturingRoadmap.pdf>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Ein Vergleich der Wertströme der fünf betrachteten erneuerbaren Energietechnologien ist in Tabelle 28 zusammengefasst.

Beobachtung: Der Ansatz des Projektes „Elektrolyse made in Baden-Württemberg“ zur Clusterbildung zur Herstellung der Komponenten wäre auf die Anwendbarkeit in Österreich zu untersuchen.

3.5.1.5 Vertrieb und Installation

Fronius entwickelte und vertrieb bis 2024 PEM-Elektrolyseure für die Produktion von grünem Wasserstoff.

Siemens Energy bietet auch in Österreich seine Elektrolyse-Technologien an. Im Rahmen des H2FUTURE-Projekts hat Siemens in Österreich eine PEM-Elektrolyseanlage in Zusammenarbeit mit VERBUND und voestalpine installiert. Siemens vertreibt:

- Industrielle Elektrolyseure für großskalige Wasserstoffproduktion.
- Lösungen zur Integration von Elektrolyseuren in industrielle Anwendungen, insbesondere für den Einsatz in der Stahlindustrie und in der chemischen Produktion.

Linde ist ein globaler Anbieter von Industriegasen und Wasserstofftechnologien und betreibt auch in Österreich Wasserstoffprojekte. Linde bietet:

- Alkalische und PEM-Elektrolyseure für industrielle Anwendungen.
- Komplettlösungen für die Wasserstoffproduktion, -lagerung und -verteilung.
- Integration von Elektrolyse-Technologien in Energie- und Industrieprojekte.

Als einer der größten Energieversorger in Österreich ist VERBUND stark in die Wasserstoffproduktion involviert, speziell im Bereich der PEM-Elektrolyse. VERBUND bietet zwar keine Elektrolyseure zum Verkauf an, arbeitet jedoch eng mit Partnern wie Siemens zusammen, um Projekte zur Wasserstoffproduktion zu realisieren. Die im H2FUTURE-Projekt verwendeten Elektrolyseure sind Teil solcher Großprojekte.

AVL List in Graz ist ein führender Anbieter von Entwicklungsdienstleistungen für die Automobil- und Energiewirtschaft und beschäftigt sich auch mit Wasserstofftechnologien. AVL bietet:

- Elektrolyse-Technologien und Testsysteme für die Entwicklung von Wasserstoffanwendungen.
- Lösungen zur Integration von Wasserstoff in Mobilitätskonzepte, einschließlich der Nutzung von grünem Wasserstoff als Energieträger.

Die deutsche Firma Sunfire ist ein bedeutender Hersteller von Hochtemperatur-Elektrolyseuren (SOEC) sowie PEM-Elektrolyseuren und vertreibt diese auch in Österreich.

McPhy ist ein französisches Unternehmen, das PEM- und alkalische Elektrolyseure produziert und vertreibt. McPhy arbeitet auch mit österreichischen Partnern zusammen.

3.5.2 End of life – Kreislaufwirtschaftsoptionen

Die Lebensdauer von Elektrolyseuren, die zur Wasserstoffproduktion eingesetzt werden, variiert je nach Technologie, Betriebsbedingungen und Wartung. Alkalische Elektrolyseure haben eine Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren. Sie erfordern regelmäßige Wartung, insbesondere zur Überprüfung des Elektrolyten und der Elektroden, um ihre Lebensdauer zu maximieren.

PEM (Proton Exchange Membrane) Elektrolyseure haben eine Lebensdauer von 5 bis 15 Jahren.

3.5.3 Zukünftige Technologien

Zukünftige Technologien zur Wasserstoffherstellung setzen auf höhere Effizienz, Kostensenkung und die Integration erneuerbarer Energien. Verbesserte Elektrolyseverfahren, biologische Prozesse, thermochemische Zyklen und Plasmatechnologien sind nur einige der Innovationen, die die Wasserstoffwirtschaft in den kommenden Jahren revolutionieren könnten. Dies alles zielt darauf ab, grünen Wasserstoff als zentrale Energiequelle der Zukunft zu etablieren.

Es wird an neuen Membranmaterialien und Katalysatoren geforscht, um die Effizienz zu steigern und die Kosten zu senken. PEM-Elektrolyseure sind besonders gut für schwankende erneuerbare Energiequellen (z. B. Solar- und Windkraft) geeignet, da sie schnell auf wechselnde Stromverhältnisse reagieren können.

Die nächste Generation von PEM-Elektrolyseuren wird voraussichtlich größere Produktionsmengen ermöglichen, was industrielle Anwendungen erleichtert.

Solid oxide electrolyzer cell (SOEC)-Elektrolyseure arbeiten bei hohen Temperaturen (700-1 000°C) und sind wesentlich effizienter als herkömmliche Elektrolyseure, da sie einen Teil der Energie in Form von Wärme nutzen. Diese Technologie eignet sich besonders gut für industrielle Anwendungen und Prozesse, die bereits große Mengen an Abwärme erzeugen.

Durch die Kombination von CO₂ und Wasser können SOEC-Elektrolyseure nicht nur Wasserstoff, sondern auch synthetische Kohlenwasserstoffe herstellen.

Eine der vielversprechendsten neuen Technologien ist die photokatalytische Wasserspaltung, bei der Sonnenlicht genutzt wird, um Wasser direkt in Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. Diese Technologie könnte die Kosten drastisch senken, da keine externe Stromquelle benötigt wird. Forschungsschwerpunkte umfassen:

- Entwicklung von neuen Katalysatoren, die Sonnenlicht effizienter absorbieren und in chemische Energie umwandeln.
- Erhöhung der Stabilität und Langlebigkeit von Photokatalysatoren, um eine kontinuierliche Produktion zu ermöglichen.

Mikroorganismen und Enzyme bieten eine weitere innovative Methode zur Wasserstoffproduktion: Mikroben können Wasserstoff aus Biomasse und Abwasser erzeugen, wobei sie elektrischen Strom nutzen, um biochemische Prozesse anzutreiben. Dies könnte besonders in ländlichen Gebieten oder in Abfallwirtschaftssystemen nützlich sein. Einige Algen und Cyanobakterien können durch Photosynthese Wasserstoff erzeugen. Diese Technologie befindet sich noch in der frühen Entwicklungsphase, könnte aber in Zukunft eine nachhaltige Wasserstoffquelle bieten.

In der Plasma-Wasserspaltung werden Plasmatechnologien verwendet, um Wasser direkt in Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. Plasma, ein energiereicher Zustand der Materie, kann durch elektrische Felder erzeugt werden. Vorteile dieser Technologie könnten sein:

- Hohe Effizienz bei niedrigen Temperaturen.
- Potenzial zur direkten Kopplung mit erneuerbaren Energiequellen, wie Solar- oder Windenergie, zur Maximierung der Effizienz.

Bei thermochemischen Zyklen wird Wasserstoff durch eine Serie chemischer Reaktionen unter hoher Hitze hergestellt. Diese Hitze kann aus Sonnenenergie (Solarthermie) oder Abwärme aus industriellen Prozessen stammen. Der bekannteste Prozess ist der Sulfur-Iodine-Cycle, der Temperaturen von über 800 °C benötigt. Die Forschung in diesem Bereich konzentriert sich auf:

- Materialforschung, um Reaktoren hitzebeständiger zu machen.
- Integration mit solarthermischen Kraftwerken, um eine nachhaltige Wärmequelle zu gewährleisten.

Die Methanpyrolyse ist eine vielversprechende Methode zur Herstellung von kohlenstofffreiem Wasserstoff aus Erdgas oder Biogas, wobei als Nebenprodukt festes Kohlenstoffpulver entsteht, das einfacher zu handhaben ist als CO₂. Dies könnte eine Übergangstechnologie sein, um Wasserstoff ohne CO₂-Emissionen herzustellen, während die Nutzung von Erdgasinfrastrukturen weiter möglich ist. Forschung konzentriert sich auf:

- Skalierung der Reaktortechnologie zur Methanpyrolyse.
- Verwendung von Biogas als Methanquelle, um eine komplett CO₂-freie Wasserstoffproduktion zu gewährleisten.

Innovative Ansätze zur Wasserstoffproduktion aus Abfallgasen und biogenen Reststoffen bieten Möglichkeiten, die Nutzung fossiler Ressourcen weiter zu reduzieren. Technologien zur Nutzung von Kohlenstoffquellen aus industriellen Abfallströmen oder der Vergasung von Biomasse können Wasserstoff erzeugen und gleichzeitig die CO₂-Bilanz verbessern.

Power-to-X-Technologien ermöglichen die Umwandlung von überschüssigem Strom aus erneuerbaren Energien in verschiedene Energieträger, wie Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe oder Methan. Dabei ist Wasserstoff die Schlüsselsubstanz für weitere chemische Prozesse. Der Schwerpunkt der Forschung liegt auf:

- Systemintegration von Wasserstoff in Industrie und Energieversorgung.
- Verwendung von grünem Wasserstoff als Ausgangsstoff zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen für den Verkehrssektor und chemische Industrie.

Mit dem Aufkommen von kleineren und flexiblen Elektrolyseanlagen wird die dezentrale Produktion von Wasserstoff immer realistischer. Diese Technologie ermöglicht es Unternehmen, ihre eigene Wasserstoffproduktion vor Ort aufzubauen und dadurch Transportkosten und Verluste zu minimieren.

3.5.4 Stakeholder im Bereich Elektrolyse

Das Austrian Institute of Technology (AIT) forscht aktiv an Wasserstofftechnologien. Die Forschung im Bereich Elektrolyse umfasst:

- Effizienzsteigerung von Elektrolyseuren, insbesondere Protonenaustauschmembran (PEM)-Elektrolyseuren und alkalischen Elektrolyseuren.
- Integration von erneuerbaren Energien (wie Wind- und Solarenergie) in die Elektrolyseprozesse.
- Materialforschung für langlebigere und kostengünstigere Elektroden und Membranen.
- Modellierung und Simulation von optimierten Elektrolyseprozessen, um die Effizienz zu erhöhen und die Produktionskosten zu senken.

Die Technische Universität Wien ist führend in der Grundlagen- und angewandten Forschung zur Wasserstoffelektrolyse. Zu den Schwerpunkten zählen:

- Materialforschung für Elektrolysekomponenten, insbesondere für Membranen und Elektroden.
- Entwicklung von neuen Katalysatoren, um den Elektrolyseprozess effizienter und kostengünstiger zu gestalten.
- Systemintegration von Wasserstoffproduktionsanlagen in bestehende Energienetze und industrielle Anwendungen.

- Forschungsprojekte im Bereich der PEM- und alkalischen Elektrolyse zur Verbesserung der Leistung und Reduzierung der Betriebskosten.

Die Montanuniversität Leoben ist bekannt für ihre Expertise in der Materialforschung. Ihre Forschung im Bereich der Wasserstoffelektrolyse konzentriert sich auf:

- Entwicklung von hochleistungsfähigen Materialien für den Einsatz in Elektrolyseuren, um die Korrosionsbeständigkeit und Langlebigkeit zu verbessern.
- Erforschung von neuen Elektrolysemembranen und Materialien für Elektroden, die höhere Wirkungsgrade und Kostensenkungen ermöglichen sollen.

Der österreichische Technologiekonzern Fronius war aktiv in der Entwicklung von Wasserstoffelektrolyseuren und forschte an Systemen zur Sektorkopplung (Verbindung von Strom-, Wärme- und Mobilitätssektoren). Fronius arbeitet an Lösungen zur effizienten Nutzung von grünem Wasserstoff, insbesondere in den Bereichen:

- Dezentrale Elektrolyse-Systeme für den Einsatz in kleinen und mittleren Unternehmen.
- Energiespeicherung und Nutzung von Wasserstoff in der Industrie.

Das HyCentA (Hydrogen Center Austria) ist ein in Graz ansässiges Forschungszentrum, das sich auf die Erforschung und Entwicklung von Wasserstofftechnologien spezialisiert hat. Im Bereich der Elektrolyse forscht HyCentA an:

- Entwicklung neuer Elektrolyseverfahren mit verbesserter Effizienz und geringeren Kosten.
- Test- und Demonstrationsprojekte für industrielle Anwendungen der Elektrolyse.
- Materialforschung und Entwicklung von Komponenten für langlebigere und effizientere Elektrolyseure.

In Österreich laufen zurzeit folgende Forschungsprojekte:⁹⁴

- H2i GreenHydrogen
- CSH2H Donawitz – voestalpine AG
- FossilFree4Industry – geplant 8 MW Elektrolyse – Region Weiz
- Renewable Gasfield 2.0 – Energie Steiermark
- Green Lime
- ABL – B2H2 – Zeltweg: Wasserstoff aus Biomasse (Holzrohgas)

Das H2FUTURE-Projekt ist eines der wichtigsten europäischen Projekte zur Erforschung und Demonstration der PEM-Elektrolyse. Das Projekt wird in Österreich von VERBUND, voestalpine, Siemens, dem AIT und anderen Partnern durchgeführt. Ziele des Projekts sind:

- Entwicklung einer PEM-Elektrolyseanlage mit einer Leistung von 6 MW, der grüne Wasserstoff für die Stahlproduktion bei voestalpine liefert.
- Integration von grünem Wasserstoff in industrielle Prozesse, um fossile Brennstoffe zu ersetzen.
- Untersuchung der Skalierbarkeit und wirtschaftlichen Machbarkeit von großflächigen Wasserstoffproduktionsanlagen.

⁹⁴ Elektrolyseure in Österreich, Hydrogen Partnership Austria, <https://www.hypa.at/umsetzung/elektrolyseure>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Die WIVA P&G ist ein Forschungsprojekt, das verschiedene Akteure aus Wissenschaft und Industrie zusammenbringt, um die Nutzung von Wasserstoff in der Energieversorgung und im Verkehr zu fördern. Im Bereich der Elektrolyse konzentriert sich die Forschung auf:

- Integration von Wasserstoffproduktionsanlagen in bestehende Energiesysteme, insbesondere in Kombination mit erneuerbaren Energien.
- Optimierung der Elektrolyse-Prozesse, um den erzeugten Wasserstoff effizient für Industrie, Verkehr und Energiespeicherung nutzbar zu machen.
- Entwicklung von regionalen Wasserstoffinfrastrukturen und Vorzeigeregionen für Wasserstoffanwendungen.

Folgende Institutionen bieten Ausbildungen zu Wasserstoff an:

Die TU Wien bietet verschiedene Studiengänge und Forschungsprojekte im Bereich Energietechnik und Wasserstofftechnologien an. Besonders relevant sind:

- Masterprogramme in Energietechnik und Verfahrenstechnik: Hier werden Themen wie Elektrolyse, Wasserstoffspeicherung und Nutzung von Wasserstoff in Energiesystemen behandelt.
- Forschungsprojekte, bei denen Studierende an der Entwicklung und Optimierung von Elektrolyseuren mitarbeiten können.

Die Montanuniversität Leoben bietet Studiengänge im Bereich Materialwissenschaften und Verfahrenstechnik an, die sich auch mit der Materialforschung für Elektrolyse und Wasserstofftechnologien befassen. Besonders relevant sind:

- Master in Metallurgie und Verfahrenstechnik, die auf die Materialentwicklung für korrosionsbeständige Elektrolyseure fokussiert sind.
- Forschung zu Membranen und Elektrodenmaterialien, die in der Elektrolyse eingesetzt werden.

Die FH OÖ bietet einen Bachelor- und Masterstudiengang in Energietechnik und Umwelttechnik an, der ebenfalls Module zu Wasserstofftechnologien und erneuerbaren Energiesystemen umfasst. Studierende lernen hier über die Integration von Elektrolyseuren in Energiesysteme und die Nutzung von grünem Wasserstoff.

Das AIT bietet spezielle Weiterbildungen und Workshops zu Wasserstoff- und Elektrolysetechnologien für Fachleute aus der Industrie und Forschung an. Diese Schulungen decken Themen wie:

- Planung und Betrieb von Elektrolyseuren.
- Systemintegration von Wasserstofftechnologien.
- Materialentwicklung und -testung für Elektrolyseanwendungen.

Das HyCentA bietet in Zusammenarbeit mit Industriepartnern und Universitäten Weiterbildungsprogramme und Schulungen für Fachleute an, die sich auf Wasserstoffproduktion und Elektrolyse spezialisieren möchten. Diese Schulungen decken die Grundlagen bis hin zu praktischen Anwendungen ab:

- Technologie der Elektrolyse.
- Integration von Wasserstoffsystemen in industrielle Anwendungen.
- Betriebsführung und Wartung von Elektrolyseuren.

Die Wirtschaftsförderungsinstitute (WIFI) bieten branchenspezifische Schulungen im Bereich Energietechnik und erneuerbare Energien an, darunter auch Schulungen zu Wasserstoff und Elektrolyse. Diese Kurse sind

oft für Fachkräfte aus der Energiewirtschaft oder verwandten Bereichen konzipiert und decken unter anderem:

- Grundlagen der Wasserstoffproduktion.
- Sicherheitsaspekte und Technologieeinsatz bei Elektrolyseuren.
- Wasserstoffspeicherung und -nutzung in verschiedenen Industrien.

Fronius bietet interne Schulungen und Weiterbildungen für Mitarbeiter und Partnerunternehmen an, die sich auf die Produktion und Nutzung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse konzentrieren. Diese Trainingsprogramme richten sich insbesondere an Fachkräfte in der Energie- und Umwelttechnologiebranche.

Die VERBUND Akademie, Teil des österreichischen Energieversorgers VERBUND, bietet verschiedene Schulungen und Weiterbildungen im Bereich erneuerbare Energien und Wasserstofftechnologien an. Die Akademie richtet sich an Fachleute der Energiewirtschaft, die sich mit der Planung, Umsetzung und Integration von Wasserstoffproduktionsanlagen auseinandersetzen.

3.5.5 Chancen und Risiken für potentielle österreichische Hersteller

10 umgesetzte Anlagen in Österreich werden auf der Webpage des Hydrogen Partnership Austria beschrieben.⁹⁵ Diese Anlagen haben eine gemeinsame Leistung von ca. 18 MW. 7 weitere sind in Bau. Der Verbund nimmt dabei eine Schlüsselrolle ein.⁹⁶

Die erste Produktionsanlage für grünen Wasserstoff in Österreich wurde in Gabersdorf eröffnet. Hersteller des PEM-Elektrolyseurs ist H-Tec Systems aus Augsburg.⁹⁷ Das Know-how von Eco-lyzers basiert auf der langjährigen Erfahrung des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) mit der druckbeaufschlagten alkalischen Elektrolyse, kombiniert mit der langjährigen Erfahrung von Ecoclean im Anlagenbau und Service weltweit.⁹⁸ Ein alternativer Anbieter ist Enapter.⁹⁹

Andritz AG ist derzeit auf dem Markt und bietet Lösungen für die alkalische Elektrolyse durch Partnerschaften mit führenden Technologieanbietern an. Andritz hat eine 100 MW PEM-Anlage für Salzgitter gebaut. Die Lösungen umfassen EP- und EPC-Angebote von der Strom- und Wasseraufbereitung bis hin zu gereinigtem und komprimiertem Wasserstoff und Sauerstoff.

AVL hat eine starke Grundlage in der Entwicklung von Antrieben und elektrischen Systemen, insbesondere für Elektrofahrzeuge (EVs) und Brennstoffzellensysteme. Diese Kompetenzen lassen sich direkt auf die Elektrolysetechnologie übertragen, da die Elektrolyse ähnliche technologische Anforderungen an Energiemanagement, Steuerungstechnik und Leistungselektronik stellt. AVL kann daher ihre Erfahrung mit komplexen elektrischen Systemen nutzen, um Elektrolyseure effizienter und kostengünstiger zu gestalten.

95 Elektrolyseure in Österreich, Hydrogen Partnership Austria, <https://www.hypa.at/umsetzung/elektrolyseure>, abgerufen am 30. Dezember 2024

96 VERBUND als Dekarbonisierungspartner, <https://www.verbund.com/de-at/geschaeftskunden/industrie/gruener-wasserstoff/projekte?srsltid=AfmBOoK0tBbuuPnZjyBWnYcGNEMHO7uXqQDY-QQIZ8UDYOi5LLKc76r>, abgerufen am 30. Dezember 2024

97 Schwarz, M. (2023): Österreichs erste öffentliche Anlage für grünen Wasserstoff nimmt Betrieb auf, H2 News, <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/oesterreichs-erste-oeffentliche-anlage-fuer-gruenen-wasserstoff-nimmt-betrieb-auf/#:~:text=Hersteller%20des%20PEM%20Elektrolyseurs%20im,Investitionsvolumen%3A%2010%2C5%20Mio.>, abgerufen am 30. Dezember 2024

98 Ecolyzer, Green hydrogen, https://ecolyzer.com/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwlbU2BhA3EiwA3yXyu13K1LRwG5iF52iT40bdoncr9cMnFXK6LNkx0MrZnKyHelesxtnjRBoCbuMQAvD_BwE, abgerufen am 30. Dezember 2024

99 AEM Elektrolyseure - das Beste aus zwei Welten, https://www.enapter.com/de/aem-electrolysers/?utm_medium=sea&utm_source=google&utm_campaign=nonbrand_de_elektrolyseur_kombis&utm_content=161374179064&utm_term=wasserstoff%20elektrolyseur&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwlbU2BhA3EiwA3yXyuwF3vVRuUBQISJpem7h6sUKWKVCK-fwuBXY5zyuKSJZDXNPHTcQiThoc4yMQAvD_BwE, abgerufen am 30. Dezember 2024

AVL meldete 2023 rund 9,4% der insgesamt 2 242 Patentanmeldungen in Österreich an. 2/3 der 2023 in Österreich angemeldeten Patente hält das Forschungs- und Entwicklungsunternehmen mit Hauptsitz in Graz auf dem Gebiet der nachhaltigen Mobilitäts- und stationären Technologien. Etwa 50% betreffen Brennstoffzellen- sowie Elektrolyseanwendungen. Es entsteht allerdings ein relativ geringer Anteil an Grundlagentechnologien.

Beobachtung: Fokussierte Unterstützung von Schlüsselfirmen und -institutionen in Kompetenzzentren könnte zu einer Verdichtung von Innovation in Schlüsselbereichen führen.

Beobachtung: Andritz AG hat sich zunächst zu einer Kooperation mit einem erfahrenen Hersteller von Elektrolyseanlagen entschlossen und sich in Folge dann an ihm beteiligt. So hat man Zugang zu Know-how.

In Tabelle 22 wird das Ergebnis der SWOT Analyse für Elektrolyseure dargestellt.

Tabelle 22: SWOT Analyse Elektrolyseure

Stärken Hohe technologische Expertise und Forschung Gut ausgebildete Fachkräfte Politische Unterstützung und Förderprogramme Zentrale Lage und Nähe zum europäischen Markt	Schwächen Hohe Produktions- und Lohnkosten Import von Membranen Geringe Skaleneffekte
Chancen Wachsender europäischer Wasserstoffmarkt Innovationen in der Elektrolysetechnologie Synergien mit erneuerbaren Energien Förderungen und Kooperationen in der EU Steigendes Interesse an Energiesicherheit	Risiken Starker internationaler Wettbewerb: Volatile Rohstoffpreise und Materialengpässe Abhängigkeit von Förderprogrammen und politischen Entscheidungen Regulatorische Unsicherheiten Hoher Energiebedarf und Kosten für grünen Wasserstoff.

Stärken

Hohe technologische Expertise und Forschung: Österreich verfügt über eine starke Forschungslandschaft und Innovationskultur im Bereich der Energietechnologien. Es gibt bereits spezialisierte Unternehmen und Forschungsinstitute, die an der Entwicklung von Elektrolyseuren arbeiten. Große Anlagenbauer können Anlagen im industriellen Maßstab herstellen. Energieversorger unterstützen die Entwicklungen mit Pilotprojekten. Synergien mit der Herstellung von synthetischen Kunststoffen bestehen.

Gut ausgebildete Fachkräfte: Österreich hat qualifizierte Fachkräfte in den Bereichen Maschinenbau, Elektrotechnik und Chemie. Diese Kompetenzen sind entscheidend für die Entwicklung und Produktion moderner und effizienter Elektrolyseure.

Politische Unterstützung und Förderprogramme: Die österreichische Regierung hat ehrgeizige Klimaziele und fördert die Produktion von grünem Wasserstoff und entsprechenden Technologien. Förderprogramme und Investitionen unterstützen die Entwicklung von Elektrolyseuren und die Marktentwicklung.

Zentrale Lage und Nähe zum europäischen Markt: Die geografische Lage Österreichs ermöglicht den einfachen Zugang zum EU-Markt und schafft gute Exportmöglichkeiten für Elektrolyseure. Österreich kann als zentrale Produktionsstätte für europäische Wasserstoffprojekte fungieren.

Schwächen

Hohe Produktions- und Lohnkosten: Die hohen Produktions- und Arbeitskosten in Österreich erhöhen die Produktionskosten von Elektrolyseuren im Vergleich zu Ländern mit geringeren Lohnkosten. Dies kann den Preiswettbewerb erschweren, insbesondere gegen internationale Anbieter.

Die Produktion von Elektrolyseuren in Österreich ist noch relativ klein und kann nur begrenzt von Skaleneffekten profitieren. Dies führt zu höheren Stückkosten und kann die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Großproduzenten einschränken.

Elektrolyseure benötigen spezialisierte Materialien und Komponenten, die teilweise importiert werden müssen. Dies schafft Abhängigkeiten von globalen Lieferketten und birgt Risiken durch Lieferengpässe oder steigende Rohstoffpreise.

In Österreich gibt es nur wenige Unternehmen, die sich auf die Produktion von Elektrolyseuren konzentrieren. Dadurch fehlt es an einer etablierten industriellen Basis und Wertschöpfungskette, was die Produktionskapazitäten limitiert.

Chancen

Der EU-„Green Deal“ und die Strategie für grünen Wasserstoff fördern den Einsatz von Elektrolyseuren und die Entwicklung einer Wasserstoffinfrastruktur. Dies eröffnet österreichischen Herstellern große Chancen auf dem europäischen Markt.

Fortschritte in den Elektrolyseverfahren (wie PEM-, AEM- oder Hochtemperatur-Elektrolyse) bieten Möglichkeiten zur Differenzierung. Österreichische Unternehmen könnten innovative Lösungen entwickeln, die spezifische Anforderungen in Nischenmärkten bedienen, etwa industrielle Anwendungen.

Österreichs starker Ausbau erneuerbarer Energien, insbesondere Wasserkraft und Photovoltaik, ermöglicht eine direkte Verbindung zur Produktion von grünem Wasserstoff. Diese Synergien machen Elektrolyseure in der heimischen Industrie attraktiver und können gleichzeitig die Exportchancen verbessern.

Die EU fördert verstärkt Projekte im Bereich der Wasserstoffproduktion und -nutzung, was Finanzierungsmöglichkeiten und Partnerschaften für österreichische Hersteller eröffnet. Auch Kooperationen innerhalb der DACH-Region können zur Wettbewerbsfähigkeit beitragen.

Der Wunsch nach Energiesicherheit und Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen fördert die Nachfrage nach Wasserstofftechnologien und Elektrolyseuren. Österreichische Unternehmen könnten hiervon profitieren, indem sie Lösungen für eine dezentrale und nachhaltige Energieversorgung anbieten.

Risiken

Große Hersteller in Ländern wie den USA, China und Deutschland investieren massiv in die Elektrolyseurproduktion und profitieren häufig von Skaleneffekten und niedrigeren Produktionskosten. Dies führt zu intensivem Preisdruck für österreichische Produzenten.

Elektrolyseure benötigen seltene Metalle und spezielle Materialien, deren Preise stark schwanken und deren Verfügbarkeit unsicher sein kann. Lieferengpässe oder Preisschwankungen können die Produktionskosten erheblich beeinflussen.

Die Produktion und Nutzung von Elektrolyseuren sind stark von staatlicher Unterstützung abhängig. Änderungen in der Förderpolitik oder weniger finanzielle Unterstützung könnten die Nachfrage schwächen und die Rentabilität der Produktion verringern.

Wasserstoffwirtschaft ist in vielen Bereichen noch in der Entwicklung, und rechtliche Vorgaben und Normen ändern sich regelmäßig. Diese regulatorischen Unsicherheiten könnten die Planung und Entwicklung neuer Projekte behindern.

Hoher Energiebedarf und Kosten für grünen Wasserstoff: Die Produktion von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse erfordert viel Strom, vorzugsweise aus erneuerbaren Energien. Steigende Energiekosten könnten die Rentabilität von Elektrolyseuren beeinträchtigen und die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konventionellen Technologien reduzieren.

3.6 Wärmepumpen

3.6.1 Wertschöpfungskette Wärmepumpen

3.6.1.1 Beschreibung der Technologie

Traditionell wurde im Salzkammergut, in der Ebenseer Saline zur Gewinnung von Salz große Mengen von Holz für die Verdampfung von Sole verbraucht, was schließlich, selbst in dieser holzreichen Region, zu einer Holzknappeit führte. Der Physiker und Mathematiker Peter Ritter von Rittinger konnte für ein von ihm erfundenes „Abdampfsystem“, die erste offene Wärmepumpe zur Brüdenverdichtung 1853 ein Patent¹⁰⁰ anmelden.

Eine moderne Kompressionswärmepumpe ist eine Vorrichtung, die thermische Energie von einem kälteren Ort auf ein wärmeres Niveau überträgt, indem sie mechanische Arbeit aufbringt. Sie nutzt die Verdichtung in einem Kompressor, um Wärme zu transportieren und kann sowohl zur Heizung als auch zur Kühlung verwendet werden. Eine Kompressionswärmepumpe funktioniert nach dem Prinzip des thermodynamischen Kreisprozesses, der als Carnot-Kreisprozess bekannt ist. Sie nutzt einen Kältemittelkreislauf, um Wärme von einem Ort mit niedriger Temperatur (Quelle) aufzunehmen und sie an einem Ort mit höherer Temperatur (Senke) abzugeben. Der Prozess besteht aus vier Hauptphasen: Verdampfung, Kompression, Kondensation und Expansion.

Im Verdampfer wird das Kältemittel durch die Wärmequelle (z.B. Luft, Wasser, Erdreich) erwärmt. Dabei verdampft das Kältemittel. Der Verdampfer besteht oft aus einem Wärmetauscher, der das Kältemittel mit der Umgebungsluft oder einem anderen Medium in Kontakt bringt.

Der Verdampfer liefert das gasförmige Kältemittel an den Kompressor, der das Gas komprimiert. Der Kompressor kann ein Schrauben-, Kolben- oder Scrollkompressor sein. Er funktioniert durch mechanische Arbeit, die von einem Elektromotor bereitgestellt wird.

Im Kondensator wird das heiße, unter hohem Druck stehende Kältemittelgas abgekühlt. Dabei gibt das Kältemittel seine Wärme an das Heizsystem (z.B. Wasser für die Fußbodenheizung oder die Raumluft) ab und kondensiert zurück in eine Flüssigkeit.

Der Kondensator besteht ebenfalls aus einem Wärmetauscher, der die Wärmeübertragung zwischen dem Kältemittel und dem Heizmedium ermöglicht. Das Expansionsventil reduziert den Druck des Kältemittels, bevor es wieder in den Verdampfer eintritt. Dadurch kühlt sich das Kältemittel ab und wird erneut bereit, Wärme aufzunehmen. Das Expansionsventil kann ein thermostatisches Ventil, ein elektronisches Ventil oder eine Drossel sein.

In der Wärmequelle wird die Wärme entnommen (z.B. Außenluft, Erdreich, Wasser). An die Wärmesenke wird Wärme abgegeben (z.B. Fußbodenheizung, Radiatoren, Warmwasserbereiter). Anwendungen bestehen in Wohngebäuden, Bürogebäuden und Industrieanlagen zur Bereitstellung von Heizwärme. Bei einigen Wärmepumpen kann der Prozess umgekehrt werden, um die Umgebung zu kühlen (Klimaanlage). Eine Anwendung ist auch die Erzeugung von warmem Wasser für Haushalte und industrielle Anwendungen.

Die weltweit größten Hersteller sind: Mitsubishi, Daikin, NIBE, Vaillant, LG, Samsung¹⁰¹

¹⁰⁰ HLK, Die Wärmepumpe: Geschichte – Technologie – Markt, <https://hlk.co.at/heizung/die-waermepumpe-geschichte-technologie-markt/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹⁰¹ Nesta (2022): How to reduce the cost of heat pumps, https://media.nesta.org.uk/documents/How_to_reduce_the_cost_of_heat_pumps_v4_1.pdf, abgerufen am 30. Dezember 2024

3.6.1.2 Materialien (Abbau und Metallurgie)

In Tabelle 23 werden die wesentlichen Materialien zur Herstellung von Wärmepumpen dargestellt. In der Tabelle sind die kritischen Rohstoffe rot hervorgehoben.

Tabelle 23: Materialien und Prozesse Wärmepumpen¹⁰²

Rohstoffe	Materialmengen pro Installation	Bedarf für 10 GW [t]	Bedarf Österreich [t/a]	IDEMAT [kg CO _{2e} /kg]	CF [kg CO _{2e} /MW]	CF %
Elastomere	16	16000		4	6400	19
HDPE	0,5	500		1,8	90	0
Kältemittel	4,9	4900		2,3	1127	3
Kohlenstoffstahl	152	152000		0,9	13680	40
Kupfer	37	37000		3,2	11840	35
Polyolesteröl	2,7	2700		2,7	729	2

3.6.1.3 Komponentenfertigung

Die Hauptkomponenten einer Wärmepumpe umfassen den Verdampfer, den Kompressor, den Kondensator und das Expansionsventil. Jede dieser Komponenten wird in spezialisierten Fabriken hergestellt:

Verdampfer bestehen oft aus Kupfer oder Aluminium, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Der Verdampfer wird durch das Zusammenfügen von Rohren und Lamellen hergestellt. Das Kältemittel verdampft im Verdampfer und nimmt Wärme aus der Umgebung auf.

Es gibt verschiedene Kompressortypen (z.B. Scroll-, Kolben- oder Schraubenkompressoren), die je nach Anwendung und Größe der Wärmepumpe ausgewählt werden. Der Kompressor wird in einem speziellen Fertigungsprozess hergestellt, der mechanische und elektrische Komponenten umfasst. Die Qualität des Kompressors ist entscheidend für die Effizienz der gesamten Wärmepumpe.

Der Kondensator wird so konstruiert, dass das Kältemittel, das durch den Kompressor verdichtet wurde, Wärme abgibt und dabei kondensiert.

Das Expansionsventil reguliert den Durchfluss des Kältemittels und reduziert den Druck, sodass es in den Verdampfer zurückkehren kann. Diese Bauteile werden präzise gefertigt, um eine genaue Steuerung des Kältemittelstroms zu gewährleisten.

Nachdem die einzelnen Komponenten hergestellt sind, erfolgt die Montage der Wärmepumpe: Die Komponenten (Verdampfer, Kompressor, Kondensator und Expansionsventil) werden in einem Gehäuse zusammengebaut. Dies erfolgt oft in einer Produktionslinie, in der die Teile zusammengefügt und getestet werden.

Elektrische Verbindungen und Steuerungssysteme werden installiert, um die Wärmepumpe effizient zu betreiben. Dies umfasst auch Sensoren zur Überwachung von Temperatur und Druck. Nach der Montage wird die Wärmepumpe umfassend getestet, um sicherzustellen, dass alle Systeme ordnungsgemäß funktionieren. Dies umfasst die Überprüfung von Temperatur, Druck, Energieverbrauch und der allgemeinen Effizienz.

Nach dem Test wird die Wärmepumpe an den endgültigen Standort transportiert und installiert.

Um die Effizienz und Lebensdauer der Wärmepumpe zu gewährleisten, sind regelmäßige Wartungsarbeiten erforderlich. Dazu gehören Inspektionen der Kältemittelmenge, der elektrischen Komponenten und der

¹⁰² Air source, B. Greening, A. , Energy 39 (2012)

Wärmetauscher. Komponenten wie Filter und Ventile können im Laufe der Zeit abgenutzt werden und müssen gegebenenfalls ersetzt werden.

In Österreich ist die Firma Ochsner ein wesentlicher Produzent¹⁰³. Die Firma setzt zur Optimierung der Fertigung auf den Einsatz künstlicher Intelligenz in allen Abteilungen.

Wird die Eigenproduktion der in einem Leistungssegment produzierenden Firmen auf den Gesamtabatz derselben Firmen bezogen, so lässt sich laut der „Marktanalyse erneuerbare Energien“ ein erstaunlich hoher Anteil an Eigenfertigung beobachten. Dieser Grad der Eigenfertigung beträgt im Segment der Heizungswärmepumpen in der Leistungsklasse bis 5 kW 100%, größer 5 kW bis 10 kW 84,4%, größer 10 kW bis 20 kW 94,2%, größer 20 kW bis 50 kW 98,9%, größer 50 kW bis 100 kW 100% und im Leistungssegment größer 100 kW bis 350 kW ebenfalls 100%¹⁰⁴. Demgegenüber stellt die Firma Ochsner den Eigenfertigungsgrad mit 25% richtig.¹⁰⁵

Beobachtung: In Österreich gibt es (mindestens) einen Technologieführer in Wärmepumpen.

Beobachtung: Der Technologieführer setzt auf KI zur weiteren Optimierung der Produkte, der Prozesse, der Produktivitätssteigerung.

In Tabelle 24 werden die Komponenten von Wärmepumpen und die österreichischen Hersteller dargestellt.

Tabelle 24: Komponenten von Wärmepumpen und österreichische Hersteller

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
Dokumentation und Zertifikate	Bedienungsanleitung: Detaillierte Anweisungen für Installation und Betrieb Wartungsplan: Vorlagen für die regelmäßige Wartung und Überprüfung der Anlage Zertifikate: TÜV- und andere Zertifikate, die die Effizienz und Sicherheit der Anlage bestätigen	TÜV Austria: Zertifiziert Wärmepumpen und deren Komponenten gemäß nationalen und internationalen Standards.
Heizkreis und Rohrleitungssystem	Heizkreisleitungen: Rohre für die Verteilung des Heizwassers zu den Heizkörpern oder zur Fußbodenheizung (z.B. Mehrschichtverbundrohr oder Kunststoffrohr) Verteilerbalken: Für die gleichmäßige Verteilung des Heizwassers auf verschiedene Heizkreise (bei Fußbodenheizungen)	REHAU Österreich: Heizkreisleitungen, Rohren und Verteilerbalken für Fußbodenheizungen. Uponor GmbH: Vorlauf- und Rücklaufleitungen sowie Komplettsysteme für den Heizkreis. Henco GmbH: Mehrschichtverbundrohren und anderen Rohrleitungssystemen.

¹⁰³ Ochsner Wärmepumpen, https://www.ochsner.com/de-at/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwaa2BhAiEiwAQBgYHgr34LarQoBXcLgaHTrx5_I4OopnI9YqAcJMCglYpHVotIn92oV2xoCKpEQAvD_BwE, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹⁰⁴ Biermayr, P., Prem, E. (2024): Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2023, Technologiereport Wärmepumpen, https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw_pdf/events/20240619-energiewende-marktstatistik/schriftenreihe-2024-17i-Waermepumpen.pdf, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹⁰⁵ Karl Ochsner, persönliche Mitteilung

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
	Vorlauf- und Rücklaufleitungen: Leitungen für den Transport des Wassers zwischen Wärmepumpe und Heizkörpern/Heizflächen	
Hydraulische Komponenten	Umwälzpumpe: Zirkulationspumpe zur Förderung des Heizwassers durch das System Ausdehnungsgefäß: Kompensiert das Volumen des Heizwassers bei Temperaturänderungen Druckventile und Entlüftungsventile: Sicherheitskomponenten, die Druck im System regulieren und Luft entfernen Rückschlagventile: Verhindern den Rückfluss des Heizmediums Sicherheitsventil: Schutz des Systems vor Überdruck Magnetventil: Steuerung des Kältemittelstroms im System	Wilo Pumpen Österreich GmbH: Umwälzpumpen und weiteren hydraulischen Komponenten für Heizsysteme. Grundfos Österreich: Umwälzpumpen und Sicherheitsventile für Wärmepumpensysteme. Oventrop GmbH & Co. KG: Ventile, Ausdehnungsgefäße und andere hydraulische Bauteile.
Inneneinheit (bei Split-Wärmepumpen)	Hydraulikmodul: Steuerung und Regelung des Heizkreises, oft integriert mit Speicher und Umwälzpumpe Regelungssystem: Steuerungseinheit mit Display zur Einstellung der Heizparameter und Überwachung des Betriebs	Hoval GmbH: Hydraulikmodule und Regelungssysteme mit integriertem Display. Vaillant Österreich: Inneneinheiten für Split-Systeme mit integriertem Heizkreisregler. Austria Email AG: Inneneinheiten für Wärmepumpen, die Speicher und Steuerungen beinhalten.
Kältemittel	Kältemittel: Arbeitsfluid in der Wärmepumpe (z.B. R410A, R32, CO ₂), das zur Wärmeübertragung genutzt wird	Frigopol Kälteanlagen GmbH: Anbieter von Kältemitteln und Kühlsystemen, auch für Wärmepumpen. Daikin Österreich: Hersteller von Wärmepumpen mit umweltfreundlichen Kältemitteln wie R32.
Schalldämmung und Vibrationselemente	Schalldämmmatten: Dämpfen das Betriebsgeräusch der Wärmepumpe Vibrationsdämpfer: Verhindern die Übertragung von Vibrationen auf das Gebäude	Getzner Werkstoffe GmbH: Vibrationsdämpfer und Schalldämmungslösungen für technische Anlagen. Schöck Bauteile GmbH: Schalldämmmatten und weitere Komponenten zur Schwingungsisolierung.
Speichersystem	Warmwasserspeicher (Boiler): Zur Speicherung des erwärmten Brauchwassers (z.B. 200-500 Liter) Pufferspeicher: Speicher für das Heizwasser, der als Puffer zwischen Wärmepumpe und Heizsystem dient Speichermodule: Optional bei Kombination mit anderen Wärmequellen (z.B. Solarthermie)	Austria Email AG: Bietet Warmwasser- und Pufferspeicher in verschiedenen Größen. Hoval GmbH: Pufferspeicher Sonnenkraft GmbH: Speichermodule, insbesondere für Solar- und Wärmepumpenkombinationen.

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
Verkabelung und Regelung	Elektrische Verkabelung: Stromversorgung für die Wärmepumpe und Steuerungseinheit Temperatursensoren und Fühler: Überwachen die Temperaturen im System (z.B. Außentemperatur, Vorlauf- und Rücklauf Temperatur) Raumthermostat: Steuerung der Raumtemperatur Smart Home Integration (optional): Module für die Fernsteuerung und Überwachung der Wärmepumpe via App oder Web-Interface	Siemens Österreich: elektrische Verkabelung und Regelungssysteme, inklusive Smart-Home-Integration. Honeywell Österreich: Regelungssystemen, Raumthermostaten und Sensoren für Heizsysteme. B&R Automation: Steuerungselektronik und Automatisierungslösungen.
Wärmepumpe (Hauptgerät)	Wärmepumpenmodul: Gerät zur Wärmeherzeugung aus der Umweltenergie (Luft, Wasser oder Erdreich) Verdichter (Kompressor): Wesentlicher Bestandteil zur Komprimierung des Kältemittels Verdampfer: Wandelt das flüssige Kältemittel durch die aufgenommene Umweltwärme in gasförmigen Zustand um Kondensator: Überträgt die gewonnene Wärme an das Heizsystem Expansionsventil: Reguliert den Druck des Kältemittels im System	Hoval: Luft-Wasser- und Sole-Wasser-Wärmepumpen, einschließlich Verdichter, Verdampfer und Kondensator, Regelung. Vaillant Österreich: Wärmepumpenmodule für verschiedene Umweltenergiequellen (Luft, Wasser, Erdreich). Viessmann Österreich: Wärmepumpen, inklusive Kompressoren und Verdampfern.
Wärmequellensystem	Luft-Wasser-Wärmepumpe: Ventilator für die Luftzufuhr Luftkanäle (optional bei bestimmten Installationen) Sole-Wasser-Wärmepumpe: Erdsonden oder Erdkollektoren Soleleitungen (aus Kunststoff, z.B. PE) Solepumpe Wasser-Wasser-Wärmepumpe: Brunnenbohrung (Entnahme- und Rückgabeburgen) Wasserleitungen und Pumpe für die Grundwasserförderung	Ochsner Wärmepumpen GmbH: Sole-Wasser-, Wasser-Wasser- und Luft-Wasser-Wärmepumpen. Grünbeck Wasseraufbereitung GmbH: Systeme zur Wasseraufbereitung und Bohrtechnik für Wasser-Wasser-Wärmepumpen.
Wartung und Sicherheitseinrichtungen	Filter und Schmutzfänger: Zum Schutz des Systems vor Schmutzpartikeln in Wasser oder Sole Manometer: Druckmesser zur Überwachung des Drucks im Heiz- und Kältekreislauf Frostschutzmittel (für Solekreisläufe): Schützt das System vor dem Einfrieren bei niedrigen Temperaturen	Oventrop GmbH & Co. KG: Filter, Manometer und Schmutzfänger für die Heiz- und Kältemittelkreisläufe. Grundfos Österreich: Pumpen mit integriertem Schutz vor Frost und Überdruck.

Komponente	Ausführung	Hersteller in Österreich
Zubehör und Installationsmaterial	Befestigungsmaterialien: Schrauben, Halterungen und Schienen für die Montage von Wärmepumpe und Speichern Kabelkanäle und Rohre: Für die Verlegung der elektrischen Leitungen und Rohrleitungen Dichtungen und Isolierungen: Zur Vermeidung von Wärmeverlust und zur Abdichtung der Verbindungen Kondensatablauf: Ableitung für anfallendes Kondenswasser (besonders bei Luft-Wasser-Wärmepumpen)	Geberit Österreich: Installationsmaterialien, Rohren und Dichtungen für Heizungssysteme. Hilti Österreich: Befestigungsmaterialien und Werkzeuge zur Montage von Wärmepumpensystemen. REHAU Österreich: Kabelkanäle und Installationszubehör.

Die Firma Ochsner Wärmepumpen GmbH ist ein führender Hersteller von Wärmepumpensystemen in Österreich. Folgende Komponenten werden bei Ochsner selbst gefertigt:

- Kompressoren: Ochsner verwendet zwar auch Fremdkomponenten, entwickelt aber einige Kompressoren speziell für ihre Systeme weiter, um sie für den Einsatz in Wärmepumpen zu optimieren.
- Wärmetauscher: Diese sind eine Schlüsselkomponente in Wärmepumpensystemen und werden zum großen Teil von Ochsner selbst entwickelt und gefertigt.
- Regelungstechnik: Ochsner entwickelt eigene Regelungssysteme, um eine hohe Effizienz und einen störungsfreien Betrieb der Wärmepumpen zu gewährleisten.
- Gehäuse und Konstruktion: Auch die Gehäuse und Rahmen der Wärmepumpensysteme werden größtenteils in den eigenen Produktionsstätten hergestellt.

3.6.1.4 Wertstrom der Komponenten

Der Inlandsmarkt für Heizungswärmepumpen exklusive Luft/Luft-Wärmepumpen und Wohnraumlüftungen mit Wärmepumpe zeigt im Jahr 2023 einen deutlichen Rückgang um 5 753 Stück oder 11,7%. Dieser Rückgang resultiert vor allem aus einem Rückgang der Verkaufszahlen in den Leistungssegmenten bis 20 kW, während höhere Leistungsklassen eine de facto Stagnation oder sogar ein Wachstum zeigen. Der in Stückzahlen gemessene Rückgang ist in der Leistungsklasse von >5 kW bis 10 kW mit einem Minus von 3 900 Stück am größten, während in der Leistungsklasse von 100 kW bis 350 kW ein Anstieg der Verkaufszahlen um 32 Stück zu verzeichnen ist.

Insgesamt produzierten österreichische Wärmepumpenhersteller im Jahr 2023 26 546 Wärmepumpen aller Kategorien und Leistungsklassen. Bezogen auf den Gesamtabsatz der Produktionsdaten meldenden 38 Firmen im Umfang von 59 367 Stück entspricht dies einem Anteil von 44,7%. Die in diesem Bereich meldenden Firmen produzierten im Jahr 2023 also weniger als die Hälfte der von ihnen im Inlandsmarkt und im Exportmarkt abgesetzten Wärmepumpen selbst. Bezogen auf den Gesamtabsatz aller 49 erfassten Firmen im Umfang von 80 289 Stück entspricht die Eigenproduktion einem Anteil von 33,1%.

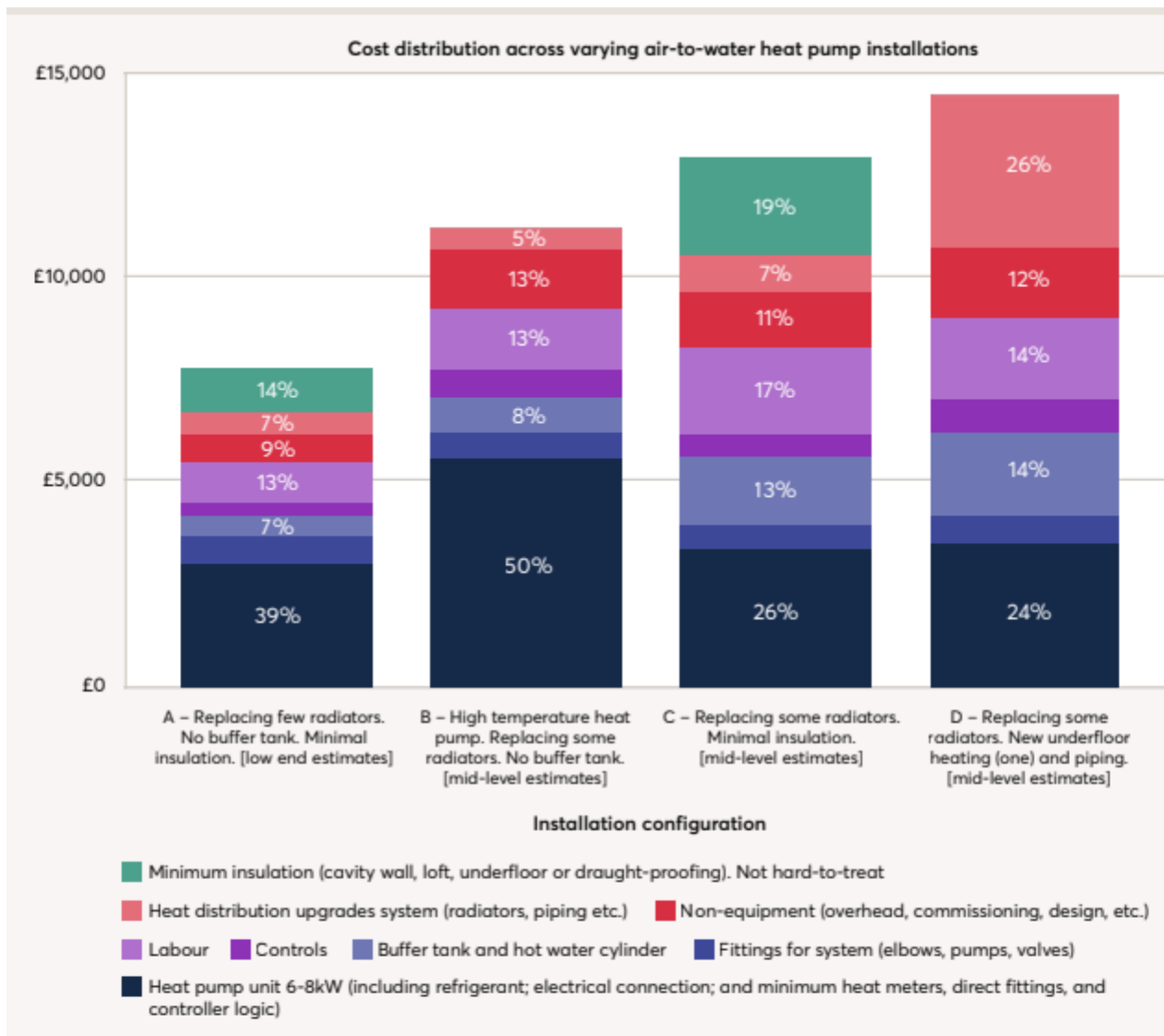


Abbildung 12: Zusammensetzung der Kosten von Wärmepumpen

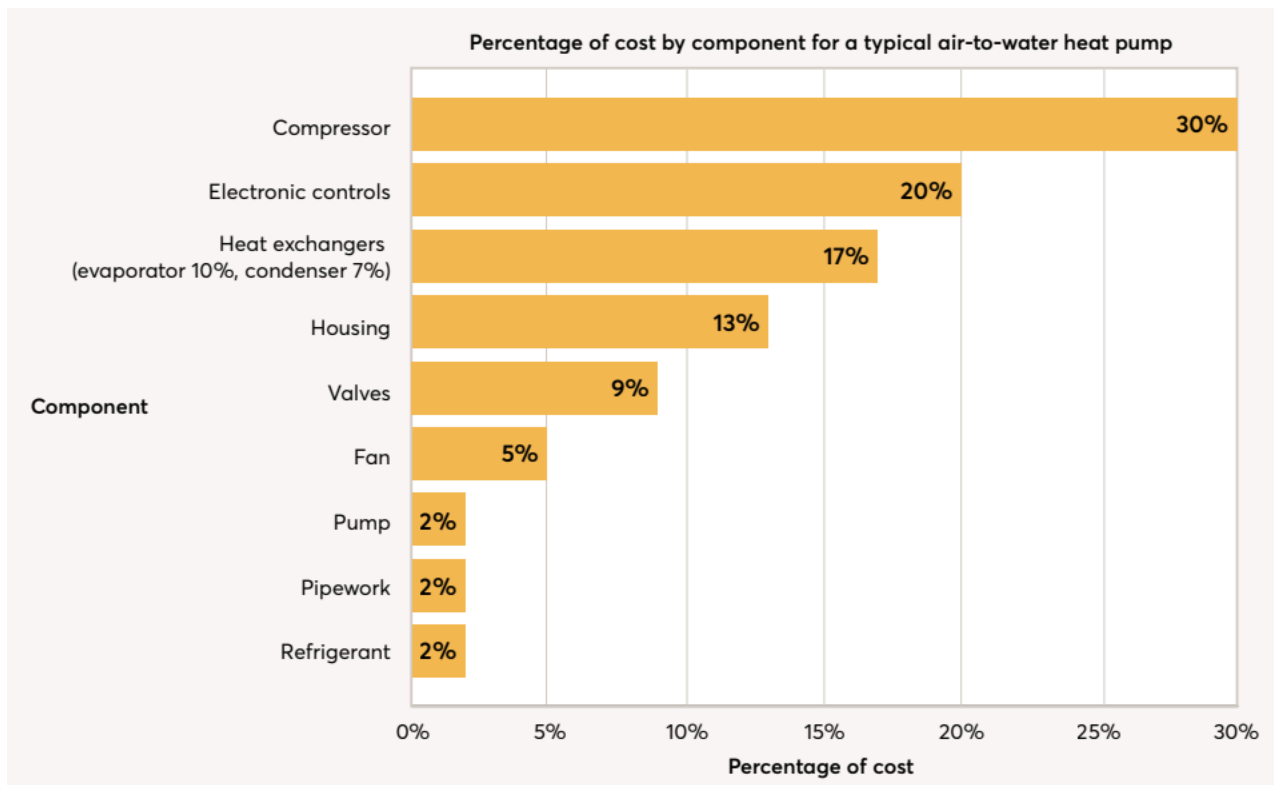


Abbildung 13: Zusammensetzung der Kosten von Komponenten von Wärmepumpen

Für Anlagen zur Wärmepumpenherstellung liegen die Kapitalkosten im Bereich von 65-150 USD/kW bzw. 60-175 USD/kW.¹⁰⁶ Für eine Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 10 kW liegen die Kosten in Österreich typischerweise zwischen 7 000 und 30 000 EUR, je nach Typ und Installation.

Ein Vergleich der Wertströme der fünf betrachteten erneuerbaren Energietechnologien ist in Tabelle 28 zusammengefasst.

3.6.1.5 Vertrieb und Installation

Folgende Anbieter sind in Österreich relevant:

1. Vaillant Group Austria GmbH

Spezialisierung: Vaillant ist einer der führenden Anbieter von Wärmepumpensystemen in Österreich. Sie bieten Luft-, Erd- und Wasserwärmepumpen für verschiedene Anwendungen an, sowohl für private Haushalte als auch für gewerbliche Projekte.

2. Bosch Thermotechnik (Junkers)

Spezialisierung: Bosch bietet hochwertige Wärmepumpensysteme an, darunter Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen, sowie diverse Zubehörkomponenten wie Regelungstechnik und Warmwasserspeicher.

3. Hoval Gesellschaft m.b.H.

Spezialisierung: Hoval ist ein führender Anbieter für Heizungssysteme, darunter auch Wärmepumpen. Sie bieten Komplettlösungen für Heizung, Lüftung und Kühlung mit Luft- und Erdreichwärmepumpen an.

¹⁰⁶ Hartl, M., Biermayr, P., Schneeberger, A., Schöffmann, P. (2016): Österreichische Technologie Roadmap für Wärmepumpen, BMVIT, <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/e2050/publikationen/biblio/oesterreichische-technologie-roadmap-fuer-waermepumpen.php>, abgerufen am 30. Dezember 2024

4. Stiebel Eltron GmbH

Spezialisierung: Stiebel Eltron ist ein Pionier auf dem Gebiet der Wärmepumpen und bietet eine breite Palette an Wärmepumpensystemen an, darunter Luft/Wasser-, Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen.

5. Ochsner Wärmepumpen GmbH

Spezialisierung: Ochsner ist spezialisiert auf hocheffiziente Wärmepumpensysteme. Das Unternehmen bietet Lösungen für Einfamilienhäuser, Gewerbe und industrielle Anwendungen sowie spezielle Hochtemperatur-Wärmepumpen an.

6. Wolf Heiztechnik GmbH

Spezialisierung: Wolf bietet eine breite Palette von Heiz- und Klimasystemen, darunter auch moderne Wärmepumpensysteme, an. Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen gehören zu ihrem Portfolio.

7. Glen Dimplex Austria GmbH

Spezialisierung: Dimplex, eine Marke von Glen Dimplex, bietet eine große Auswahl an Wärmepumpen für private, gewerbliche und industrielle Anwendungen. Ihr Sortiment umfasst Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen.

8. Weider Wärmepumpen GmbH

Spezialisierung: Weider ist auf die Herstellung von innovativen Wärmepumpensystemen spezialisiert. Sie bieten sowohl Standard-Wärmepumpenlösungen als auch maßgeschneiderte Systeme für spezielle Anforderungen.

9. Alpha-InnoTec Austria GmbH

Spezialisierung: Alpha-InnoTec bietet ein breites Sortiment an Wärmepumpensystemen für verschiedene Anwendungsbereiche. Die Palette reicht von Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen bis hin zu kombinierten Heiz- und Kühlsystemen.

10. Austria Email AG

Spezialisierung: Austria Email ist einer der führenden Hersteller von Warmwasserbereitern und bietet auch Wärmepumpenspeicher und Kombigeräte an, die mit Wärmepumpen gekoppelt werden können.

11. Heliotherm Wärmepumpentechnik Ges.m.b.H.

Spezialisierung: Heliotherm ist ein hochspezialisierter Anbieter für Wärmepumpensysteme mit einem Fokus auf besonders energieeffiziente Lösungen. Das Unternehmen bietet Luft-, Erdreich- und Wasserwärmepumpen an.

12. Danfoss Ges.m.b.H.

Spezialisierung: Danfoss ist ein führender Hersteller von Wärmepumpenkomponenten wie Verdichter und Regelungssysteme. Sie bieten umfassende Lösungen für die Wärmepumpenbranche.

13. Novelan

Spezialisierung: Novelan bietet effiziente Wärmepumpenlösungen für den privaten Wohnbau. Sie sind spezialisiert auf kostengünstige Systeme für Ein- und Mehrfamilienhäuser.

3.6.2 End of life – Kreislaufwirtschaftsoptionen

Die Lebensdauer von Luft-Wasser- und Luft-Luft-Wärmepumpen ist von äußeren Umweltbedingungen abhängig, insbesondere von der Temperatur. Sie haben tendenziell eine Lebensdauer im Bereich von 15 bis 20 Jahren, da sie bei extremen Temperaturen stärker beansprucht werden.

Erdwärmepumpen haben oft eine längere Lebensdauer, da sie von den stabileren Bodentemperaturen profitieren. Ihre Lebensdauer kann bis zu 25 Jahre oder mehr betragen.

Wasser-Wasser-Wärmepumpen nutzen das Grundwasser als Wärmequelle und haben, ähnlich wie Erdwärmepumpen, oft eine längere Lebensdauer von 20 bis 25 Jahren.

Kupfer ist zu 100% ohne Qualitätsverlust recycelbar und damit ein perfekter Kandidat für ein nachhaltiges Recycling. Fast 80% des jemals geförderten Kupfers wird dank seiner Recyclingfähigkeit auch heute noch verwendet. Die Recyclingquote von Kupfer ist im Vergleich zu anderen Metallen recht hoch: In der Europäischen Union und den USA können die Recyclingquoten für Kupfer 40-50% betragen. Weltweit werden schätzungsweise jährlich etwa 8,5 Millionen Tonnen Kupfer recycelt.

Aluminium ist zu 100% recycelbar, ohne seine Eigenschaften zu verlieren. Es kann unbegrenzt recycelt werden und ist damit ein Eckpfeiler der Kreislaufwirtschaft. Das Recycling von Aluminium benötigt nur 5% der Energie, die für die Herstellung von neuem Aluminium aus Roherz verwendet wird, was zu erheblichen Energieeinsparungen und reduzierten Kohlenstoffemissionen führt. Die Recyclingquote für Getränkedosen aus Aluminium ist sehr hoch und liegt weltweit oft bei über 70%. Einige Länder, wie Brasilien, erreichen aufgrund starker Recyclingprogramme Quoten von bis zu 97-99%. Die Gesamtrecyclingquote für Aluminiumprodukte (einschließlich Dosen, Baumaterialien, Fahrzeuge und Elektronik) wird weltweit auf etwa 60-65% geschätzt.

Ochsner hat Anfang 2024 eine „Second-Life-Initiative“ gestartet. Ziel des Unternehmens ist es, die Lebensdauer der Geräte deutlich zu verlängern und damit Ressourcen zu schonen, Energie zu sparen und Abfall zu vermeiden.

Die Wärmepumpen von Ochsner sind so ausgelegt, dass man die verbauten Komponenten einzeln austauschen kann. Das lohnt sich ökologisch wie auch ökonomisch. Künftig will das Unternehmen Geräte, die sich nicht mehr reparieren lassen, für eine sogenannte Second-Life-Nutzung aufbereiten. Dazu werden sie technisch überarbeitet und geprüft, erhalten eine neue Verpackung und können wiederverkauft werden. Ist dies nicht mehr möglich, werden die intakten Komponenten aus der Wärmepumpe ausgebaut und nach einer Überprüfung als Ersatzteile eingesetzt.

Beobachtung: Reparieren und Second-Life-Nutzung sind etablierte Geschäftsmodelle für Wärmepumpen.

Beobachtung: Wärmepumpen sind in hohem Maße recycelbar.

3.6.3 Zukünftige Technologien

Eine steigende Nachfrage nach Kühlung und Klimatisierung in Wohn- und Servicegebäuden ist durch den sukzessiven Anstieg der Sommertemperaturen durch die globale Erderwärmung und die zahlreichen Hitzerekorde der letzten Dekade bereits in breiten Kundengruppen gegeben. In diesem Marktsegment können Wärmepumpen konkurrenzlos die drei Endenergiedienstleistungsbereiche Raumheizung,

Raumkühlung bzw. Klimatisierung und Brauchwassererwärmung in einem System anbieten (monovalente Bereitstellung).

Das Marktsegment der Altbausanierung, welches aufgrund des großen Altgebäudebestandes seit dem Jahr 2020 rasch an Bedeutung gewinnt, ist auch aus der Sicht der Entfeuchtung ein zukünftiges Anwendungsgebiet der Wärmepumpe mit einem sehr großen Potenzial. Der im Sanierungsmarkt oftmals höhere Heizungsvorlaufemperaturbedarf kann von modernen Heizungswärmepumpen mittlerweile in den meisten Fällen problemlos abgedeckt werden. Die Marktentwicklung der einzelnen Leistungsklassen von Heizungswärmepumpen im Jahr 2023 deutet bereits auf eine starke Entwicklung des Kesseltausch- und Sanierungsmarktes hin. Die genannten Anwendungsbereiche und Energiedienstleistungen von Wärmepumpen werden in weltweiten Massenmärkten mit bewährter Technologie bereits langfristig genutzt. Sie stellen deshalb keine Innovationen im strengeren Sinne dar. Zu diesem Thema laufen gegenwärtig FFG Projekte (z. B. Gasthermenersatz).

Technologiespezifische Innovationen betreffen die Nutzung neuer Wärmequellen in geothermischen oder auch tiefbautechnischen Bereichen. Beispielsweise kann in Tunnelbauwerken geothermische Wärme auf niedrigem Temperaturniveau mit Wärmepumpen genutzt werden. Hinzu kommt die indirekte Nutzung von Betriebsabwärme wie z. B. in Autobahntunnels oder U-Bahn Schächten. Hartl et al. (2016) strukturieren die Innovationsbereiche mit den jeweils zuzuordnenden Forschungs- und Entwicklungsthemen der Wärmepumpentechnologie in der "Österreichischen Technologie- und Umsetzungsroadmap für Wärmepumpen".¹⁰⁷

Karl Ochsner setzt auf KI zur Produktivitätssteigerung¹⁰⁸, auch im Marketing, Verwaltung und Kundendienst. Fraunhofer entwickelt elektrokalorische Wärmepumpen, die ohne Kompressoren auskommen und zukünftig höhere Effizienzen erzielen sollen.

Beobachtung: KI ist wesentlich zur Produktivitätssteigerung.

Beobachtung: Österreichische Forschungsinstitute könnten sich international stärker zu neuen Technologien wie elektrokalorischen Wärmepumpen vernetzen.

Das Prinzip der elektrokalorischen Wärmepumpe¹⁰⁹ bildet der elektrokalorische Effekt: Wird an speziellen Keramiken oder Polymeren eine elektrische Spannung angelegt, erwärmt sich das Material. Sobald die Spannung entfernt wird, kühlt das Material wieder ab. Der gesamte Vorgang ist nahezu vollständig reversibel ist. Die elektrokalorischen Materialien bilden eine elektrische Kapazität. Damit kommt der Leistungselektronik in dem System die Aufgabe zu, die elektrokalorischen Kapazitäten mehrmals pro Sekunde

¹⁰⁷ Hartl, M., Biermayr, P., Schneeberger, A., Schöffmann, P. (2016): Österreichische Technologie Roadmap für Wärmepumpen, BMVIT, <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/e2050/publikationen/biblio/oesterreichische-technologie-roadmap-fuer-waermepumpen.php>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹⁰⁸ Ochsner, K. (2024): Künstliche Intelligenz sichert den Standort Österreich, <https://tga.at/branche/karl-ochsner-kuenstliche-intelligenz-sichert-den-standort-oesterreich/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹⁰⁹ Bach, D. (2024): Messen, Kontrollieren, Optimieren. Fraunhofer IPM Jahresbericht 2022/2023, Freiburg i.B., 2023. S. 64-65, <https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/energiewandler-thermische/komp/kalorische-systeme/elektrokalorische-systeme.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

möglichst hocheffizient und damit so verlustfrei wie möglich elektrisch zu laden und wieder zu entladen, wobei in jedem Zyklus Wärme gepumpt wird.

Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsprojekte des Fraunhofer-Instituts deuten darauf hin, dass elektrokalarische Wärmepumpen in der Zukunft eine tragfähige und umweltfreundliche Option für das Heizen und Kühlen von Wohnräumen sein könnten.

3.6.4 Stakeholder im Bereich Wärmepumpen

Die wichtigsten Forschungsbereiche, Institutionen und Projekte im Bereich Wärmepumpen in Österreich sind:

Die TU Wien forscht im Bereich Wärmepumpensysteme vor allem an der Effizienzsteigerung und der Integration in Gebäudeenergieversorgungssysteme. Ein besonderer Fokus liegt auf Erdwärmepumpen, der Integration von Wärmepumpen mit Photovoltaik sowie der Gebäudesanierung mithilfe von Wärmepumpen.

Die Montanuniversität Leoben forscht intensiv an Materialien und Technologien für kalorische Wärmepumpen. Dabei werden magnetische und elektrokalarische Materialien untersucht, die eine effizientere Nutzung von thermischer Energie ermöglichen könnten.

Die Fachhochschule Technikum Wien betreibt angewandte Forschung im Bereich der Systemoptimierung von Wärmepumpen. Dazu gehören intelligente Steuerungssysteme, die Wartungsoptimierung und die Integration in Smart-Grid-Systeme.

Das AIT ist einer der führenden Forschungsakteure in Österreich für Wärmepumpen und energieeffiziente Gebäude. Hier wird an innovativen Wärmepumpensystemen gearbeitet, die sich an neue Umweltbedingungen anpassen können, sowie an großtechnischen Lösungen für die Industrie. Zu den Forschungsfeldern gehören Hybride Wärmepumpensysteme, die mit anderen Technologien wie Solarthermie oder Fernwärme kombiniert werden und smart Cities und intelligente Gebäudetechnologien, bei denen Wärmepumpen eine Schlüsselrolle spielen, um den Energieverbrauch zu senken.

Das Kompetenzzentrum Building Technologies arbeitet an neuen Lösungen für Gebäudetechnologien, bei denen Wärmepumpen als zentrale Komponente zur Erzeugung von Heiz- und Kühlenergie eingesetzt werden. Es wird untersucht, wie Wärmepumpen effizient in Null-Energie-Gebäude und Plus-Energie-Gebäude integriert werden können.

In einigen Projekten wird an der Optimierung von Wärmepumpen für kalte Klimazonen gearbeitet, um auch bei sehr niedrigen Außentemperaturen hohe Effizienz zu erreichen. Diese Forschung ist besonders relevant für alpine Regionen Österreichs, wo Wärmepumpen oft an ihre Leistungsgrenzen stoßen.

Das internationale GEOTeCH-Projekt, an dem österreichische Partner beteiligt sind, untersucht innovative geothermische Wärmepumpensysteme. Dabei geht es um die Weiterentwicklung von Erdwärmepumpen sowie die Optimierung von Bohr- und Speichertechnologien für Geothermie.

Die Forschung an thermoelektrischen Wärmepumpen ist ein wachsendes Feld. Hier wird an Technologien geforscht, die keine mechanischen Teile benötigen und sich daher besonders für kleine und dezentrale Anwendungen eignen könnten.

Vaillant betreibt Forschung und Entwicklung im Bereich hocheffizienter Wärmepumpen in Österreich. Schwerpunkte sind dabei Luft-Wasser-Wärmepumpen, die Weiterentwicklung von geräuscharmen Systemen und die Kombination von Wärmepumpen mit anderen erneuerbaren Technologien wie Solarthermie.

In Zusammenarbeit mit internationalen Forschungspartnern wie dem Fraunhofer ISE werden große Wärmepumpensysteme entwickelt, die für den Einsatz in Fernwärmenetzen geeignet sind. Dies ist ein wachsendes Forschungsfeld, da Wärmepumpen zunehmend in urbanen Wärmenetzen eingesetzt werden.

Forschung zu Hochtemperatur-Wärmepumpen zielt darauf ab, Systeme zu entwickeln, die Temperaturen von 100 °C oder mehr erzeugen können. Diese Systeme sind besonders für industrielle Prozesse interessant, bei denen hohe Temperaturen für Trocknung, Sterilisation oder Dampferzeugung benötigt werden.

Die Entwicklung von Wärmepumpen mit umweltfreundlichen Kältemitteln wie Ammoniak oder CO₂ ist ein weiterer wichtiger Forschungsschwerpunkt. Diese natürlichen Kältemittel haben ein geringes Treibhauspotenzial und sind daher wesentlich nachhaltiger als herkömmliche Kältemittel.

Adsorptions- und Absorptionswärmepumpen nutzen chemische Reaktionen zur Erzeugung von Wärme und Kälte. Besonders Adsorptionswärmepumpen gelten als vielversprechend für die industrielle Abwärmenutzung und die Kombination mit Solarthermie.

Wärmepumpen spielen eine Schlüsselrolle in der Sektorkopplung, also der Verbindung des Elektrizitätssektors mit dem Wärmesektor. Hier wird erforscht, wie Wärmepumpen flexibel auf das Stromangebot (z.B. aus erneuerbaren Energien wie Wind- und Solarstrom) reagieren können, um das Energiesystem zu stabilisieren.

Andere Projekte konzentrieren sich auf die Integration von Wärmepumpen in intelligente Stromnetze (Smart Grids), um Lastmanagement und Flexibilität zu ermöglichen. Wärmepumpen können in solchen Systemen als Lastenverschieber fungieren, indem sie Energie speichern und dann verbrauchen, wenn sie am günstigsten ist.

Der Klima- und Energiefonds sowie das Austrian Climate Research Program (ACRP) fördern zahlreiche Forschungsprojekte im Bereich der erneuerbaren Energien und Wärmepumpentechnologien.

In Horizon Europe gibt es zahlreiche Fördermittel für innovative Wärmepumpenlösungen, insbesondere im Kontext von energieeffizienten Gebäuden und urbanen Energiesystemen.

Folgende Ausbildungen und Schulungen im Bereich Wärmepumpen werden angeboten. Diese richten sich an unterschiedliche Zielgruppen, von Fachkräften in der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik bis hin zu Installateuren, Planern und Ingenieuren, die sich auf erneuerbare Energien spezialisieren möchten.

Die Technische Universität Wien und die TU Graz bieten im Rahmen von Energietechnik-, Gebäudetechnik- und Maschinenbau-Studiengängen Module an, die sich mit Wärmepumpentechnologien und energetischer Gebäudeversorgung beschäftigen. Diese Programme richten sich vor allem an Ingenieure und Planer.

Fachhochschulen wie die FH Technikum Wien oder die FH Oberösterreich bieten Bachelor- und Masterstudiengänge an, die sich auf erneuerbare Energien, Energie- und Umwelttechnik und Gebäudetechnik konzentrieren. Hier werden oft auch spezialisierte Kurse und Praktika zu Wärmepumpen angeboten.

HTL wie die HTL Mödling oder die HTL Pinkafeld bieten technische Ausbildungen im Bereich Heizungstechnik und Gebäudetechnik, wo Wärmepumpen eine zentrale Rolle im Lehrplan spielen.

Der Österreichischer Wärmepumpen-Verband (Wärmepumpe Austria) bietet regelmäßig Seminare und Schulungen für Installateure, Planer und Berater an. Diese richten sich an Fachleute, die bereits in der Branche tätig sind und ihre Kenntnisse vertiefen oder aktualisieren möchten. Themen umfassen die Planung, Installation, Wartung und Optimierung von Wärmepumpensystemen.

Das AIT ist ein führendes Forschungsinstitut und bietet neben Forschungstätigkeiten auch Fachseminare und Weiterbildungen im Bereich Wärmepumpen und Gebäudetechnik an.

Das WIFI bietet eine breite Palette an Aus- und Weiterbildungen für Fachleute in den Bereichen Heizung, Klima, Lüftung und Energie an. Darunter finden sich Kurse zu Wärmepumpensystemen, die sich an Installateure, Techniker und Planer richten. Die Kurse umfassen praxisnahe Themen wie Installation, Inbetriebnahme, Wartung und Störungsdiagnose.

Ähnlich wie das WIFI bietet das bfi verschiedene Schulungen im Bereich Energietechnik an, einschließlich Kursen zur Installation und Wartung von Wärmepumpen.

Viele Installateur-Innungen in den Bundesländern bieten spezielle Fortbildungen für ihre Mitglieder an, die sich auf den Einsatz von Wärmepumpen in der Gebäudetechnik konzentrieren. Diese Schulungen beinhalten oft praxisnahe Übungen zur Installation und Wartung von Wärmepumpenanlagen.

Vaillant, Viessmann, Bosch, Hoval und andere führende Wärmepumpenhersteller bieten in Österreich Schulungen an, die auf ihre spezifischen Produkte und Technologien abgestimmt sind. Diese Schulungen sind oft für Fachbetriebe und Installateure gedacht und vermitteln Kenntnisse zur Installation, Inbetriebnahme und Fehlerbehebung von Wärmepumpensystemen.

Stiebel Eltron bietet in Österreich umfangreiche Schulungsprogramme für Installateure und Fachpartner an. Diese Schulungen umfassen theoretische und praktische Inhalte zu Luft-Wasser- und Sole-Wasser-Wärmepumpen.

Der österreichische Wärmepumpenhersteller Ochsner bietet ebenfalls Schulungen und Workshops an, die sich auf ihre Produkte konzentrieren und Installateure sowie Planer in die Technologien und Anwendungen einführen.

Einige Schulungsanbieter, darunter das WIFI und bfi, bieten Zertifizierungskurse an, bei denen Fachleute eine anerkannte Zertifizierung als Wärmepumpeninstallateur erwerben können. Diese Zertifizierungen sind in der Branche oft Voraussetzung, um anspruchsvollere Projekte durchführen zu können.

Der Fachverband für Kälte- und Klimatechnik bietet spezielle Schulungen zur Kältetechnik an, die auch für Wärmepumpentechnologien relevant sind, da viele Wärmepumpensysteme auf Kältetechnik basieren.

Folgende Firmen sind in Österreich im Verband Wärmepumpe-Austria¹¹⁰ organisiert.

- Heliotherm¹¹¹
- Drexel und Weiss
- Kronoterm aus Slowenien beliefert auch Austria Email¹¹², einen der größten europäischen Wärmepumpen-Hersteller
- M-TEC GmbH
- Neura
- Ochsner Wärmepumpen GmbH ist einer der ersten europäischen Hersteller von Wärmepumpen und gilt heute als einer der Technologieführer und zu den bekanntesten Wärmepumpen-Herstellern. Ochsner stellt Wärmepumpen von 2 bis 1.000 kW für Heizung, Kühlung und Warmwasserbereitung in den

¹¹⁰ Übersicht von deutschen und internationalen Wärmepumpen-Herstellern, <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/hersteller>, abgerufen am 30. Dezember 2024

h Wärmepumpe Austria, Mitgliederverzeichnis, <https://www.waermepumpe-austria.at/unser-verband/mitgliederverzeichnis>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹¹¹ Heliotherm Wärmepumpentechnik Ges.m.b.H, <https://www.europages.de/HELIOTHERM-WARMEPUMPENTECHNIK-GESMBH/AUT019845-00101.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹¹² Handwerk+Bau, <https://www.handwerkundbau.at/wirtschaft/austria-email-mit-guter-performance-54013>, abgerufen am 30. Dezember 2024

verschiedensten Systemen sowohl für Neubauten als auch für die Heizungssanierung und für alle Wärmequellen (Wasser, Erdwärme und Luft) her.

- OVUM Heiztechnik GmbH¹¹³
- SOLARFOCUS
- FläktGroup Austria GmbH, 4673 Gaspoltshofen
- Grabner Haustechnik GmbH, 4020 Linz
- HARGASSNER Ges mbH¹¹⁴, 4952 Weng
- Harreither GmbH, 3334 Gafrenz
- Hoval Gesellschaft m.b.H., 4614 Marchtrenk (Regelungen)
- KNV Energietechnik GmbH¹¹⁵, 4861 Schörfling am Attersee
- IDM¹¹⁶
- Lambda-wp¹¹⁷
- M-TEC GmbH, 4812 Pinsdorf
- OCHSNER Wärmepumpen GmbH, 4020 Linz
- ÖkoFENForschungs- und EntwicklungsGesmbH¹¹⁸, 4133 Niederkappel
- SOLARFOCUS GmbH, 4451 St.Ulrich/Steyr
- Stiebel Eltron GmbH, 4063 Hörsching
- Viessmann Ges.m.b.H.¹¹⁹, 4641 Steinhaus
- Windhager¹²⁰
- WOLF Klima- und Heiztechnik GmbH¹²¹, 4030 Linz

Die Entwicklung des Marktes ist positiv.¹²²

3.6.5 Chancen und Risiken für potentielle österreichische Hersteller

Chancen für österreichische Hersteller sind

- Wachsende Nachfrage nach umweltfreundlichen Heizsystemen

¹¹³ Ovum Wärmepumpen, <https://www.ovum.at/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹¹⁴ Hargassner Wärmepumpen, https://www.hargassner.com/de-de/waermepumpen/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwiaa2BhAiEiwAQBgYHpLJgC0GkerPJm9V6RVVa9r_YKWnZDQ0ISEqm_ED8H42jb_b8JoUrhoC9KQQAyD_BwE, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹¹⁵ KNV Wärmepumpen, <https://www.knv.at/unternehmen/das-ist-knv/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹¹⁶ IDM WÄRMEPUMPEN sorgen für nachhaltige Wärme, die unabhängig macht!, <https://www.idm-energie.at/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹¹⁷ Das ist LAMBDA Wärmepumpen, <https://lambda-wp.at/ueber-uns/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹¹⁸ ÖkoFen, Luft-Wasser-Wärmepumpe GreenFOX, https://www.oekofen.com/de-at/greenfox-luftwaermepumpe/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwiaa2BhAiEiwAQBgYHnGN0hnnAydAa0Kc7LH6358CT4bmTNZLdUjOlsAyG9jakby3ppWNwxoCTz0QAyD_BwE, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹¹⁹ Viessmann Gesellschaft m.b.H., <https://www.europages.de/VIESSMANN-GESELLSCHAFT-MBH/AUT052923-490075001.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹²⁰ Windhager, Wärmepumpen aus Österreich, <https://www.windhager.com/de-at/waermepumpen-made-in-austria/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹²¹ Wolf Klima- und Heizungstechnik GmbH Linz, <https://www.europages.de/WOLF-KLIMA-UND-HEIZTECHNIK-GMBH-LINZ/00000005343330-001.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

¹²² HLK (2023): Entwicklung des Wärmepumpenmarktes in Österreich, <https://hlk.co.at/heizung/halbjahresbilanz-2023-entwicklung-des-marktes-fuer-waermepumpen-in-oesterreich/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

- Staatliche Förderungen und Subventionen
- Nachrüsten von Bestandsgebäuden
- Technologischer Fortschritt und Innovationen zur Effizienzsteigerung und Smart Homes

Steigender Exportanteil Risiken für österreichische Hersteller von Wärmepumpen sind:

- Internationale Konkurrenz
- Preisdruck
- Volatile Rohstoffmärkte
- Lieferkettenprobleme
- Technologische Disruption durch neue Technologien wie Wasserstoff-Brennstoffzellen
- Notwendigkeit von F&E-Investitionen
- Fachkräftemangel
- Mangel an qualifiziertem Personal
- Hohe Lohnkosten

In Tabelle 25 wird das Ergebnis der SWOT Analyse für die Herstellung von Wärmepumpen dargestellt.

Tabelle 25: SWOT Analyse Wärmepumpen

Stärken Technologisches Know-how und Qualitätsstandard Hoher Eigenfertigungsanteil Hohe Umweltstandards und Energiebewusstsein Gut ausgebildete Fachkräfte Staatliche Förderung und politische Unterstützung	Schwächen Hohe Produktions- und Lohnkosten Kleine Skaleneffekte Abhängigkeit von importierten Komponenten (Elektronik) Begrenzter Heimmarkt
Chancen Wachsende Nachfrage nach erneuerbaren Heizsystemen Technologische Innovation und Spezialisierung Zunehmender Bedarf an energieeffizienten Gebäudelösungen Expansion in osteuropäische Märkte: Die Nachfrage nach nachhaltigen Heizlösungen steigt auch in Osteuropa	Risiken Intensiver internationaler Wettbewerb. Regulatorische Unsicherheiten Steigende Rohstoffpreise und Lieferkettenprobleme Fachkräftemangel in technischen Berufen Umweltschutzauflagen für Kältemittel:

Stärken

Österreich hat eine lange Tradition in der Entwicklung und Produktion von Heiztechnologien und Wärmepumpen. Österreichische Hersteller sind bekannt für ihre qualitativ hochwertigen und langlebigen Produkte, was das Vertrauen der Kunden stärkt.

Das Umweltbewusstsein und die Akzeptanz für nachhaltige Heizlösungen sind in Österreich besonders ausgeprägt. Dies unterstützt die Nachfrage nach umweltfreundlichen Heizlösungen wie Wärmepumpen.

Österreich verfügt über hochqualifizierte Fachkräfte und eine starke Maschinenbau- und Energietechnologieindustrie. Dies ermöglicht die Entwicklung innovativer Wärmepumpentechnologien und optimierter Produktionsprozesse. Es wird laufend an Verbesserung von Einzelkomponenten und der Systemintegration geforscht.

Die österreichische Regierung fördert den Ausbau erneuerbarer Energien und umweltfreundlicher Heizsysteme. Wärmepumpen werden durch Subventionen und steuerliche Anreize gefördert, was die Nachfrage ankurbeln kann. Entwicklungsprojekte für Nachrüstwärmepumpen für Gasthermen in Bestandsgebäuden werden von der FFG gefördert.

Schwächen

Im internationalen Vergleich sind die Produktions- und Personalkosten in Österreich relativ hoch, was die Produktionskosten für Wärmepumpen in die Höhe treibt und den Preiswettbewerb erschwert.

Die österreichische Industrie ist stark von kleinen und mittelständischen Unternehmen geprägt. Die begrenzten Skaleneffekte im Vergleich zu Großproduzenten in Asien oder den USA können die Kosten pro Einheit erhöhen und die Wettbewerbsfähigkeit einschränken.

Viele Komponenten für Wärmepumpen, wie z. B. Kompressoren oder spezielle Elektronik, müssen importiert werden, was die Kosten und das Risiko von Lieferkettenunterbrechungen erhöht.

Der Markt in Österreich ist relativ klein, was bedeutet, dass Unternehmen auf Exporte angewiesen sind, um zu wachsen. Dies bringt zusätzliche Kosten und potenzielle regulatorische Hürden in den Zielmärkten mit sich. Ein Wachstumsmarkt ist der Ersatz von Gasthermen in Bestandsgebäuden.

Chancen

Die europäische Energiewende und die Dekarbonisierungsziele führen zu einer stark steigenden Nachfrage nach Wärmepumpen als Alternative zu fossilen Brennstoffen. Österreichische Hersteller könnten von dieser Entwicklung profitieren.

Es gibt zahlreiche Förderungen und Finanzierungsprogramme der EU für erneuerbare Energien und umweltfreundliche Heizsysteme. Diese Unterstützungen könnten österreichische Hersteller bei der Expansion und Forschung fördern.

Fortschritte in der Wärmepumpentechnologie, wie verbesserte Effizienz, leiserer Betrieb oder Anpassungen an kalte Klimazonen, bieten Chancen, sich durch spezialisierte Produkte zu differenzieren und neue Märkte zu erschließen.

Die Nachfrage nach energieeffizienten Neubauten und Renovierungen wächst stetig, vor allem durch striktere Bauvorschriften und ein wachsendes Bewusstsein für Nachhaltigkeit. Wärmepumpen sind hier eine bevorzugte Lösung, insbesondere in Verbindung mit Gebäudedämmung und Photovoltaikanlagen.

Die Nachfrage nach nachhaltigen Heizlösungen steigt auch in Osteuropa. Österreichische Hersteller könnten von ihrer geografischen Nähe profitieren und diese aufstrebenden Märkte gezielt ansprechen.

Risiken

Die weltweite Nachfrage nach Wärmepumpen wächst, was zunehmend auch große internationale Hersteller anzieht, die Skalenvorteile und niedrigere Produktionskosten bieten können. Dies könnte den Preis- und Konkurrenzdruck auf österreichische Produzenten erhöhen.

Änderungen in der Förderpolitik oder unerwartete neue Standards könnten die Marktbedingungen rasch ändern. Reduzierte Subventionen für Wärmepumpen oder neue Auflagen könnten die Nachfrage beeinflussen und Investitionen riskanter machen.

Die Preise für wichtige Materialien wie Kupfer, Stahl und Kältemittel sind volatil. Engpässe oder Preisanstiege können die Produktionskosten stark erhöhen und die Margen reduzieren.

Der Mangel an qualifizierten Arbeitskräften in technischen Berufen könnte das Wachstum der Wärmepumpenproduktion bremsen. Die Konkurrenz um gut ausgebildetes Personal ist hoch, was die Kosten weiter erhöhen kann.

Die EU und andere Märkte verschärfen die Regulierung von Kältemitteln, die häufig in Wärmepumpen verwendet werden. Unternehmen müssen möglicherweise in alternative, umweltfreundlichere Technologien investieren, was zu zusätzlichen Entwicklungskosten führen könnte.

Die Wärmepumpenproduktion in Österreich hat ein großes Potenzial, insbesondere durch hohe Qualität, technologische Innovation und das wachsende Marktinteresse an erneuerbaren Heizsystemen. Der internationale Wettbewerb und hohe Produktionskosten bleiben jedoch herausfordernd. Österreichische Hersteller könnten sich durch Spezialisierung und technologische Differenzierung sowie durch den gezielten Ausbau in wachstumsstarke Exportmärkte behaupten.

4 Ansätze zur Strategieentwicklung

4.1 Übergreifende Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Eine Beschreibung der Ergebnisse der Analyse ist in Tabelle 26 zusammengefasst.

Tabelle 26: SWOT Analyse für die Herstellung von erneuerbaren Energietechnologien in Österreich

Stärken Hohe Qualitätsstandards und Innovationskraft Starkes Umweltbewusstsein und politische Unterstützung Kurze Transportwege für den DACH-Markt Gut ausgebildete Arbeitskräfte und Technologiestandort Vorhandene Fördermittel Hohe Kompetenz und Kapazität von international bekannten Forschungsinstitutionen Gut etablierte Netzwerke	Schwächen Hohe Produktionskosten Begrenzter Zugang zu Rohstoffen Kleiner Heimatmarkt Abhängigkeit von Subventionen Marktsegmentierung und kleine Betriebsgröße Sehr hoher Anteil an Importen bei Wafern und Batteriezellen Umsetzung von im Labor erprobten Technologien in der industriellen Fertigung
Chancen Wachsender europäischer Markt für erneuerbare Energien Technologische Innovationen in der PV-Produktion Umstellung auf „Grüne Energie“ in der Industrie Energieunabhängigkeit und Sicherheit der Lieferketten Verfügbarkeit von „Green Financing“ und ESG-Investitionen Nutzung von digitalen Technologien	Risiken Starke internationale Konkurrenz Schwankende Rohstoffpreise und Abhängigkeit von Importen Regulatorische Unsicherheiten Mangelnde Infrastruktur für erneuerbare Energien Arbeitskräftemangel und hohe Lohnkosten Verfügbarkeit von Wafern, Batteriezellen, Membranen und elektronischen Komponenten Verfügbarkeit von Risikokapital für Unternehmenswachstum

Generelle Stärken österreichischer Unternehmen in erneuerbaren Energietechnologien sind:

Österreichische Unternehmen sind international bekannt für ihre Expertise in Wasserkraft, Biomasse und Photovoltaik. Weltweit führende Technologien in erneuerbaren Energietechnologien sind z. B. die ANDRITZ AG. Österreich hat eine gut ausgebaute Infrastruktur für erneuerbare Energien. Zahlreiche staatliche Förderprogramme und Forschungseinrichtungen, die Innovationen in erneuerbaren Energietechnologien unterstützen (z. B. Austrian Climate and Energy Fund). Gut etablierte Netzwerke und Kooperationen zwischen Unternehmen, Universitäten und Forschungszentren bestehen. Österreichische Unternehmen sind erfahren in Exportmärkten.

Schwächen dagegen sind:

Im Vergleich zu anderen Ländern sind Produktions- und Installationskosten für erneuerbare Energietechnologien manchmal deutlich höher. Der Markt für erneuerbare Energien ist in Österreich oft klein und fragmentiert, wodurch Skaleneffekte schwer zu erreichen sind. Genehmigungsverfahren für neue Projekte sind teilweise langwierig und komplex.

Chancen sind:

Die internationale Nachfrage nach erneuerbaren Energielösungen, insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern, wächst. Strenge EU-Klimaziele (Netto-Null bis 2050) treiben Investitionen und Innovationen in erneuerbare Energien. EU- und nationale Förderungen für die Entwicklung und Implementierung erneuerbarer Energien sind verfügbar. Die Integration von digitalen Technologien für

Energieprognosen und smarte Netze und der Einsatz von neuen, kostengünstigen KI-Instrumenten zur Identifikation von Materialien, technischen Lösungen, Kostenreduktion ermöglichen neue Chancen zur Effizienzsteigerung bei der Herstellung und Nutzung.

Risiken sind:

Starker Wettbewerb besteht durch günstigere Technologien aus China und anderen Ländern. Änderungen in der Förderpolitik könnten Investitionen gefährden. Engpässe bestehen bei qualifizierten Arbeitskräften im Bereich der erneuerbaren Energietechnologien. Die Abhängigkeit von Rohstoffen wie seltenen Erden für Technologien (z. B. Photovoltaik und Windkraft) könnte Risiken durch Lieferkettenprobleme bergen.

Die Entwicklung einer nationalen Strategie zur Förderung von Technologiesouveränität für erneuerbare Energietechnologien in Österreich erfordert einen umfassenden und koordinierten Ansatz, der sowohl politische, wirtschaftliche, wissenschaftliche als auch gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt.

Eine detaillierte Analyse der bestehenden Technologien, Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Fachkräfte im Bereich der erneuerbaren Energien ist der erste Schritt. Diese Bestandsaufnahme sollte sowohl Stärken und Schwächen als auch Chancen und Risiken in Form von SWOT-Analysen für die erneuerbaren Energietechnologien Photovoltaik, Windkraft, Energiespeicher, Elektrolyseure und Wärmepumpen identifizieren.

Wichtige Fragen dabei sind:

- Welche Technologien sind bereits entwickelt?
- Wo gibt es Forschungs- und Produktionslücken?
- Welche Abhängigkeiten bestehen von ausländischen Technologien und Rohstoffen?

Untersuchungen der nationalen und internationalen Marktentwicklungen und Trends im Bereich erneuerbare Energien zeigen potenzielle Wachstumsbereiche und technologische Nischen, in denen Österreich sich spezialisieren kann. Dabei sind mehrere Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. In einer Studie von aktuellen Problemen in der europäischen Industrie beschreibt McKinsey folgende Probleme, die auch als relevant für die österreichischen Akteure in erneuerbaren Energietechnologien beobachtet wurden:

- Fragmentierte Märkte und Mangel an kritischen Größen, die eine Kostendegression ermöglichen
- Mangel an etablierten, technischen Ökosystemen
- Geringes Angebot an Risikokapital
- Fehlende Unterstützung für Innovation und disruptive Innovation durch das politische und rechtliche Umfeld

In einigen EU-Ländern wird Technologiesouveränität zudem defensiv und protektionistisch interpretiert. Schließen sich österreichische und europäische Politiker dieser Sichtweise an, riskieren sie, protektionistische Interessen zu privilegieren und die Vorteile globaler Handels- und Investitionsnetzungen zu verringern. Eine protektionistische Auslegung könnte Europas Offenheit für Handel und Investitionen untergraben, was die Attraktivität für künftige Investitionen, Spitzenforschung und technologiegestützte Fertigung mindern würde.¹²³ Dies wurde auch in mehreren Interviews betont.

Einige Interviewpartner halten das Ziel von „absoluter Technologiesouveränität“ in Europa für unrealistisch. Zur Herstellung von Photovoltaikmodulen importiert man kostengünstig Wafer aus China. Es besteht eine

¹²³ Bauer, M., Erixon, F. (2020): Europas Streben nach Technologiesouveränität: Chancen und Risiken für Deutschland und die Europäische Union, <https://ecipe.org/publications/europas-streben-nach-technologiesouveranitat/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Abhängigkeit von China in Bezug auf Rohstoffe und elementare Bauteile. Die relativ niedrigen Kosten haben ein rasches Marktwachstum ermöglicht. Auf nationaler Ebene fordert man Technologiesouveränität, jedoch behindern aus Sicht mehrerer Interviewpartner Bürokratie und Regulierung die Produktionsverlagerung nach Europa. Eine modernisierte Energiepolitik sowie vereinfachte Genehmigungsverfahren sollen die Umsetzung beschleunigen. Die Fertigung in Nachbarländern wird erwogen, um Risiken mit globalen Lieferketten zu verringern. McKinsey gibt dazu drei generelle strategische Handlungsempfehlungen¹²⁴.

- Europa soll seine Ressourcen aufstocken und bündeln sowie die grenzüberschreitende Zusammenarbeit und die Konsolidierung unterstützen
- Europa soll die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen im globalen Kontext fördern
- Europa muss sein Vorsorgeprinzip und sein Bemühen um Konsens mit beschleunigter Entscheidungsfindung und Fehlertoleranz in Einklang bringen

Beobachtung: Der Markt für erneuerbare Technologien in Europa ist fragmentiert. Das politische Umfeld schätzt konzentrierte technische Innovation und die Bereitschaft, Risiken einzugehen, wenig.

Beobachtung: Österreichische Akteure sind im internationalen Vergleich sehr klein.

Trotz einiger struktureller Nachteile bietet Österreich durch die Fokussierung auf spezialisierte Produkte, Innovationen und internationale Kooperationen bedeutende Chancen, sich im Bereich der sauberen Technologien erfolgreich zu positionieren. Der Schlüssel liegt in der intelligenten Nutzung von Ressourcen, Effizienzsteigerung, nachhaltige und ressourceneffiziente Praktiken, Diversifizierung, der Unterstützung durch staatliche Innovationsförderungen und der Zusammenarbeit mit internationalen Partnern.

Österreich hat das Potenzial, in mehreren Marktbereichen der erneuerbaren Energietechnologie Technologiesouveränität zu erreichen, indem es seine Kompetenzen in Forschung, Entwicklung und Produktion stärkt.

Insgesamt betonen die Experten die Notwendigkeit strategischer Fokussierung auf Schlüsseltechnologien, langfristiger Planung und Programmierung, Monitoring, kontinuierlichem Lernen, der Förderung internationaler Kooperationen und des Abbaus bürokratischer Hürden. Langfristige Investitionen und eine stärkere Eigenproduktion sollen Europas Wettbewerbsfähigkeit sichern und die Abhängigkeit von asiatischen Märkten reduzieren.

Der Maschinenbau, die Elektronik und das Recycling bieten die größten Chancen für den Erfolg am internationalen Markt. In diesen Bereichen hat Österreich traditionell eine starke Position, die durch technologische Innovation und spezialisierte Produkte weiter ausgebaut werden kann. Insbesondere das Recycling von Rohstoffen bietet erhebliche Zukunftspotenziale im Kontext der Kreislaufwirtschaft.

¹²⁴ Smit, S., et al (2022): Even amid war in Europe and the energy and cost of living crisis that has resulted, the region needs to pay attention to its slow-motion corporate and technology crisis, <https://www.mckinsey.com/capabilities/strategy-and-corporate-finance/our-insights/securing-europes-competitiveness-addressing-its-technology-gap>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Österreichische Hersteller können in verschiedenen Marktsegmenten der erneuerbaren Energietechnologie erfolgreich sein, insbesondere dort, wo sie auf bestehende Kompetenzen und Erfahrungen zurückgreifen können.

Österreich sollte sich auf Bereiche konzentrieren, in denen es besondere Stärken hat, wie hochspezialisierte Maschinenbauprodukte, spezielle Module oder Wärmepumpen oder Recyclingtechnologien und hier Prioritäten setzen. Die Interviewpartner hoben hervor, dass Nachentwickeln in Bereichen, in denen österreichische Firmen nicht schon Marktführer sind, wenig Erfolgswahrscheinlichkeit birgt, weil die notwendigen Investitionen sehr hoch und Skalen- und Lernkurveneffekte bedeutend sind.

Empfehlung: Österreich sollte sich auf Bereiche konzentrieren, in denen es heute schon besondere Stärken aufweist.

Durch die Fokussierung auf hochwertige, spezialisierte Produkte und Lösungen sowie durch die Anpassung an neue Marktanforderungen und Technologien können österreichische Unternehmen ihre Wettbewerbsfähigkeit auf dem internationalen Markt stärken.

Österreich sollte sich auf Sonderkonstruktionen und Designelemente konzentrieren, bei denen Kosten eine geringere Rolle spielen. Hier bietet sich insbesondere die Möglichkeit, in Bereichen wie teiltransparenten, vertikalen und bifazialen Photovoltaikanlagen zu agieren. Auch Sensortechnik und Regeltechnik bieten solche Ansatzpunkte.

Die Investition in diese Schlüsseltechnologien stärkt die technologische Souveränität von Unternehmen. Unternehmen wie Fronius, Kreisel, Andritz oder AVL List EVN, Verbund, und große Industriebetriebe in der Energie- und Maschinenbauindustrie könnten Technologien vorantreiben und die technologische Unabhängigkeit stärken.

Langfristige Strategien sind erforderlich, um sowohl die technologische Souveränität als auch die wirtschaftliche Resilienz zu sichern. Eine vorausschauende Industriepolitik hilft dabei, langfristige Investitionen in Innovation und Infrastruktur zu tätigen, um auf künftige Marktanforderungen reagieren zu können und gleichzeitig Investoren, die relevante Mittel bewegen können, anzuziehen.

Empfehlung: Österreich sollte einen strategischen Zugang zu standortorientierter Innovationspolitik entwickeln.

Einen wichtigen Rahmen bildet die Entwicklung einer klaren Vision und langfristiger Ziele für die Technologiesouveränität im Bereich erneuerbare Energien. Diese Ziele sollten messbar, realistisch und zeitlich gebunden sein.

Ein gezieltes Scouting könnte dabei helfen, herauszufinden, welche österreichischen Unternehmen Beiträge leisten können, wo Umsätze erzielt werden und welche Betriebe Potenzial für internationale Exporte haben. Dieser Prozess schafft eine solide Grundlage für fokussierte Innovationen und maßgeschneiderte Förderungen. Eine Möglichkeit zur Produktivitätssteigerung stellt Automatisierung dar, allerdings sind die Investitionen in diesem Bereich sehr kostenintensiv.

Man plädiert für nachhaltige, unabhängige europäische Ansätze. Langfristige Investitionen in flexible Energiesysteme und eine europäische Ladeinfrastruktur seien zielführender als hohe Subventionen für teure Elektroautos.

Technologische Souveränität wird durch den Aufbau und die Nutzung von Kompetenzzentren in Europa gefördert. Die Zusammenarbeit mit akademischen und industriellen Partnern, wie etwa der FFG und Universitäten, wird intensiviert, um innovative Technologien wie neue Batterietechnologien und Wechselrichterlösungen zu fördern.

Zur weiteren Vorgehensweise wurde in den Interviews empfohlen:

- Langfristige Schwerpunktsetzung mit Kontinuität: Beispielsweise die Elektrolyse von Wasserstoff, Langzeitspeicherung von Energiespeicher, Hochtemperaturwärmepumpen, Nachrüsten in Bestandsgebäuden, Fassadenintegration: Themen, die international noch nicht abgedeckt oder von großen Akteuren beherrscht werden (wie Photovoltaikmodule, Batterien, große Windkraftanlagen)
- Die Bildung oder fokussierte Förderung von Kompetenzzentren, die den Bogen von Grundlagenforschung bis zum marktfähigen Geschäftsmodell spannen
- Einrichtung von Stiftungsprofessuren, um Forschung und Ausbildung zu verbinden, den Kern der Kompetenzzentren zu bilden und Kontinuität zu gewährleisten
- Zusätzlich zu Grundlagenforschung und Prototypenentwicklung Förderung von Demo-Anlagen und Business cases. Kooperation mit industriellen Investoren.
- Förderung von langfristigen fokussierten nationalen, europäischen und internationalen Kooperationen, auch mit den bestehenden Clustern.

Die Interviewpartner befürworten die Teilnahme an Netzwerken und Kooperationen. Erfolgversprechend wäre z. B. die Konzentration auf Wasserstoff und Wasserkraft. Grüner Wasserstoff gilt als Schlüsseltechnologie für die Industrie. Für den Privatverkehr wird die direkte Stromnutzung empfohlen.

Empfehlung: Österreich sollte sich gezielt in internationale Netzwerke und strategische Partnerschaften einbringen.

Die Teilnahme an internationalen Netzwerken ist von entscheidender Bedeutung. Netzwerke ermöglichen den Zugang zu Wissen, Technologien und Märkten und fördern die Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Österreichische Unternehmen sollten aktiv daran arbeiten, sich in europäische und globale Netzwerke zu integrieren, um ihre Innovationskraft zu steigern und ihre Marktposition zu festigen.

Netzwerke bieten eine wichtige Plattform für den Wissensaustausch, die Zusammenarbeit bei Forschung und Entwicklung und die Erschließung internationaler Märkte. Unternehmen, die in Netzwerke eingebunden sind, können schneller auf neue Technologien zugreifen und ihre Innovationskraft stärken.

AVL und Andritz zeigen die Bedeutung von Kooperationen im internationalen Umfeld. Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette und die Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen sowie Forschungseinrichtungen sind entscheidend, um technologischen Fortschritt und industrielle Stärke zu sichern.

Durch Kooperationen mit europäischen Partnern wird versucht, eine robuste Produktionsbasis in Europa zu schaffen. Diese Partnerschaften ermöglichen die Nutzung gemeinsamer Ressourcen und technischer Expertise und tragen dazu bei, die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Gleichzeitig wird die Abhängigkeit von asiatischen Lieferketten reduziert, was auch zur Risikominderung beiträgt. Internationale Kooperationen entlang der gesamten Lieferkette stärken die Marktposition.

Die gezielte Zusammenarbeit mit wichtigen Förderinstitutionen und politischen Akteuren ist entscheidend, um den Innovationsprozess zu unterstützen. Die Nutzung von Förderprogrammen und die Unterstützung

durch Institutionen wie die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und das Klimaschutzministerium (KPC) ermöglichen die Finanzierung von Forschungsprojekten und Pilotanwendungen. Diese strategischen Partnerschaften sind von großer Bedeutung, um Grundlagenforschung und technologische Entwicklungen voranzutreiben. Kooperationen mit Universitäten und der Industrie stärken das technologische Know-how und fördern die Entwicklung neuer Technologien wie Wasserstoffherzeugung, Wärmespeicherung und Recyclingtechnologien. Kooperationen mit Universitäten und Forschungsinstitutionen wie der AIT, der MUL, TU Graz und der TU Wien sind notwendig, um Grundlagenforschung und technologische Entwicklungen zu fördern

Die gezielte Nutzung von Förderprogrammen wie jenen der FFG und AWS sowie die Unterstützung durch politische Maßnahmen zur Stärkung der heimischen Produktion und lokaler Technologien sind zentrale Bestandteile der Strategie. Zudem liegt ein Schwerpunkt auf der Erschließung neuer Exportmärkte in Europa, Afrika und Südamerika, um die internationale Marktposition zu festigen. Generell sind länderübergreifende Partnerschaften von entscheidender Bedeutung, um die Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu erhöhen.

Ein zentraler Schwerpunkt liegt auf dem Aufbau von Lieferketten für kritische Rohstoffe wie seltene Erden und Metalle. Partnerschaften mit europäischen und internationalen Lieferanten sollen mögliche Engpässe verhindern und die langfristige Versorgungssicherheit gewährleisten. Langfristige Verträge mit europäischen Zulieferern sind essenziell, um die Rohstoffversorgung zu sichern, Kosten zu senken und nachhaltige Produktionsprozesse zu fördern. Solche Partnerschaften können nicht nur Lieferengpässe minimieren, sondern auch die Versorgungssicherheit erhöhen. Zudem bietet die Integration der Lieferkette Potenzial für Kosteneinsparungen und eine gesteigerte Effizienz.

Ein weiterer zukunftsweisender Ansatz ist die Bildung von Clustern und Kooperationen in strategisch relevanten Bereichen wie Wafer, PV-Glas und Elektrolyseuren. Durch die Bündelung von Know-how und Ressourcen innerhalb dieser Cluster wird die Innovationsfähigkeit erheblich gestärkt. Solche Kooperationen beschleunigen die Entwicklung neuer Technologien und Prozesse, die für eine nachhaltige Produktion und die Bewältigung zukünftiger Marktanforderungen entscheidend sind. Das gemeinsame Engagement fördert nicht nur den Technologietransfer, sondern schafft auch neue Geschäftsmöglichkeiten und erschließt zusätzliche Marktpotenziale. Unternehmen wie Meyer Burger oder Siltronic AG, die bereits im Bereich der Solarzellenproduktion aktiv sind, könnten hierbei wertvolle Partner sein.

Dies soll durch den Import von hochwertigen Materialien weitergeführt werden, jedoch mit verstärkten Qualitätskontrollen, um langfristige Kosteneinsparungen zu sichern. Die Reduzierung von Abhängigkeiten durch die Förderung lokaler Produktion und die enge Zusammenarbeit mit europäischen Partnern ist ebenfalls ein entscheidender Bestandteil. Unternehmen wie VA Erzberg, TCW, Brixlegg könnten Partner für seltene Erden und Metalle sein, um mögliche Lieferengpässe zu minimieren und die Rohstoffsicherheit zu stärken. Dies soll insbesondere den technologischen Bereich betreffen, wie zum Beispiel die Entwicklung eigener Photovoltaik- und Speicherlösungen.

Österreich sollte seine Teilnahme an EU-Projekten und internationalen Forschungsprogrammen ausweiten, um Zugang zu Know-how und finanzieller Unterstützung zu erhalten. Die Interviewpartner stellten dem entgegen, dass die bestehenden Lieferketten wirtschaftlich optimiert sind und Veränderungen zu Verteuerungen führen würden

Die Strategie sollte auch die Bedeutung von Nachhaltigkeit und ESG-Standards beinhalten. Technologien zur Wiederverwertung und zum Recycling von Rohstoffen wie Metallen und seltenen Erden sollten national gefördert werden, um die Unabhängigkeit von Importen zu erhöhen. Strategische Handelsabkommen können Marktunsicherheiten bei Rohstoffen reduzieren und eine stabile Wertschöpfungskette sicherstellen.

Empfehlung: Österreich sollte gezielt auf wettbewerbsfähige Produktionstechnologien fokussieren.

Österreichische Unternehmen sollten sich auf die Produktion hochwertiger und spezialisierter Produkte konzentrieren. Aufgrund des intensiven internationalen Wettbewerbs und der geringeren Produktionskapazitäten im Vergleich zu anderen Ländern, ist es entscheidend, sich durch Qualität und Innovation von der Masse abzuheben. Produkte, die spezifische Bedürfnisse abdecken und sich in hochpreisigen Segmenten positionieren, bieten dabei die besten Erfolgsaussichten.

Ein zentrales Anliegen sollte auch die Optimierung der Produktionskosten und -effizienz sein. Eine umfassende Strategie zur Optimierung der Kostenstruktur und Effizienzsteigerung umfasst sowohl kurzfristige Kostensenkungen als auch langfristige Innovationspotenziale. Ein zentraler Bestandteil der Strategie sollte die Förderung von Automatisierung und Digitalisierung sein. Durch die Einführung automatisierter Prozesse in der Produktion werden Fertigungskosten gesenkt, während gleichzeitig die Effizienz gesteigert wird. Diese Maßnahme trägt nicht nur zur Senkung der operativen Kosten bei, sondern verbessert auch die Qualität und Konsistenz der produzierten Solarmodule und Speicherlösungen.

Investitionen in automatisierte Produktionsprozesse sind essenziell, um Fertigungskosten zu senken und die Qualität der Produkte zu verbessern. Unternehmen wie AT&S, Infineon, NXP oder Siemens könnten hierbei führend sein. Die befragten Unternehmen bejahten die Möglichkeit, mehr in größerer Fertigungstiefe herzustellen, allerdings zu höheren Preisen als den gegenwärtigen Marktpreisen.

Effizienzsteigerung erfordert die Förderung von Automatisierung und Digitalisierung als Kernkomponenten der Produktionsprozesse, um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben.

Der Einsatz von Big Data und KI kann erhebliche Produktivitätssteigerungen ermöglichen. Durch die Optimierung von Produktionsprozessen, vorausschauende Wartung und bessere Ressourcenverwaltung können Unternehmen ihre Effizienz steigern und Kosten senken, was ihnen einen Wettbewerbsvorteil verschafft. KI kann

- Effizienz steigert durch smarte Recherche in unstrukturierten Daten (Beispiel: Suche nach neuen Batteriematerialien)¹²⁵
- Sprachbarrieren überwindet und für nahtlose Kommunikation sorgt¹²⁶
- Fachkräftemangel meistert mit automatischem Wissensaufbau¹²⁷
- Qualität sichert durch datenbasierte, präzise Entscheidungen.

Nachhaltige und ethisch verantwortliche Produktion wird zunehmend gefordert und sollte in den Herstellungsprozessen priorisiert werden.

¹²⁵ Microsoft-KI findet neues Material für Feststoffbatterien, <https://futurezone.at/science/microsoft-ki-feststoffbatterie-akku-microsoft-forschung-material-lithium-ionen/402736708>, abgerufen am 10. 01. 2024

¹²⁶ Wie KI Sprachbarrieren sprengt, <https://www.ki-praxisbeispiele.de/ki-gestuetzte-spracherkennung-eine-welt-ohne-sprachbarrieren/>, abgerufen am 10. 01. 2024

¹²⁷ Fraunhofer IKS, Künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen, <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/kuenstliche-intelligenz.html>, abgerufen am 10. 01. 2024

Empfehlung: Betriebe in Österreich sollten dazu angehalten werden, eigene Ressourcen in Forschung und Innovation zu investieren.

Der Fokus auf Forschung und Entwicklung, insbesondere in Schlüsseltechnologien wie Wasserstoffherzeugung und Kreislaufwirtschaft, sollte gefördert werden. Internationale Kooperationen und Partnerschaften sollten strategisch aufgebaut werden, um von globalen Best Practices zu lernen und Synergien zu nutzen.

Eine F&E-Quote von mindestens 3% des Umsatzes sollte das Ziel sein, um kontinuierliche Innovationen zu gewährleisten und wettbewerbsfähig zu bleiben. Investitionen in Forschung und Entwicklung sind entscheidend, um neue Technologien zu entwickeln und bestehende Produkte zu verbessern. Ohne eigene große Produktionskapazitäten hingegen bleibt der Maschinenbau für Industrien eine Herausforderung, da die Entwicklung ohne eigene Fertigung eingeschränkt ist.

Empfehlung: Österreich braucht Innovationskultur, strategische Innovationsprozesse und Risikokultur.

Die Klärung der Ziele und der strategischen Ausrichtung bilden den Start des Innovationsprozesses. Dabei kann es sich um inkrementelle Verbesserungen bestehender Produkte oder Prozesse handeln, aber auch um disruptive Innovationen, die neue Geschäftsmodelle oder Technologien in den Vordergrund stellen. Die Innovationsstrategie sollte klar definieren, welche Prioritäten gesetzt werden und wie Innovation zum Gesamterfolg des Unternehmens beiträgt.

Parallel dazu ist der Aufbau einer Innovationskultur essenziell. Unternehmen sollten ermutigt werden, neue Ideen einzubringen, Risiken einzugehen und aus Fehlschlägen zu lernen. Die Förderung von interdisziplinärer Zusammenarbeit und das Aufbrechen von Silos schaffen zusätzliche Möglichkeiten für kreative Synergien. Anreize, wie etwa Belohnungen für erfolgreiche Innovationen oder die Anerkennung von Ideengebern, unterstützen die Motivation der Beteiligten.

Langfristige Förderprogramme schaffen Stabilität und Planungssicherheit für Unternehmen. Strategische Investitionen in Forschung und Startups fördern Innovationen und ziehen Investoren an. Gemeinsame Investitionen und Projekte beschleunigen den technologischen Fortschritt. Staatliche Unterstützung kann helfen, Kostenlücken bei der Entwicklung und Produktion neuer Technologien zu schließen.

Die Nutzung von Subventionen für Technologien mit Zukunftspotenzial und der Aufbau strategischer Partnerschaften sowie langfristiger Lieferverträge sind wesentliche Elemente einer Strategie.

Kleine und mittlere Unternehmen und innovative Start-ups sollten durch gezielte Förderprogramme, Venture Capital und Netzwerkbildung unterstützt werden. Kleine und mittlere Unternehmen (KMUs) und innovative Start-ups sollten durch gezielte Förderprogramme, Venture Capital und Netzwerkbildung unterstützt werden.

Ein klar definierter Innovationsprozess bildet das Fundament für die Umsetzung. Dieser Prozess sollte verschiedene Phasen umfassen, die in einem logischen Ablauf aufeinander aufbauen. Zunächst steht die Ideengenerierung im Fokus, bei der Ideen aus unterschiedlichen Quellen gesammelt werden. Dies kann durch Brainstorming-Sitzungen, Markt- und Trendanalysen oder die Einbindung von Kundenfeedback geschehen. Ein Ideenmanagementsystem, das beispielsweise durch digitale Plattformen unterstützt wird, kann helfen, die Ideen systematisch zu erfassen und zugänglich zu machen. Dazu können auch bisherige Projektergebnisse aus FFG Projekten oder die Protokolle der Jahresgespräche der FFG mit Betrieben dienen.

In der anschließenden Bewertungsphase werden die gesammelten Ideen nach festgelegten Kriterien wie Machbarkeit, Marktrelevanz und potenzieller Wertschöpfung analysiert. Hierbei ist es hilfreich, ein Gremium einzurichten, das aus Fachexperten und Entscheidungsträgern besteht. Ziel ist es, die vielversprechendsten Ideen zu identifizieren und diese in die Prototyping-Phase zu überführen. Während dieser Phase werden die ausgewählten Konzepte als Modelle, Pilotprojekte oder Simulationen getestet. Dies ermöglicht es, Stärken und Schwächen der Ideen frühzeitig zu erkennen und Anpassungen vorzunehmen.

Open-Innovation-Ansätze, bei denen externe Experten, Start-ups oder Kunden in den Innovationsprozess eingebunden werden, erweitern den Horizont und führen häufig zu lösungsorientierten Ansätzen. Auch Kooperationen mit Forschungseinrichtungen oder der Austausch mit anderen Unternehmen innerhalb eines Innovationsökosystems können entscheidende Impulse liefern.

Ein gut gestalteter Innovationsprozess erfordert eine kontinuierliche Überprüfung und Verbesserung. Durch kontinuierliche Datenerhebung und Analyse kann der Fortschritt überwacht und optimiert werden. Klare Kennzahlen (KPIs) wie die Anzahl umgesetzter Ideen, die Geschwindigkeit von der Idee bis zur Marktreife oder der Umsatzanteil durch neue Produkte helfen dabei, den Erfolg des Prozesses messbar zu machen. Regelmäßiges Feedback von Mitarbeitern, Kunden und anderen Stakeholdern liefert wertvolle Hinweise für Optimierungen.

Ein wichtiger Punkt aus der Erfahrung von Villas construct GmbH ist, dass zu frühes Handeln in einem noch unreifen Markt oft mit hohen Risiken verbunden ist. Dies zeigt, dass eine klare Marktorientierung und das Abwägen des richtigen Timings für Investitionen entscheidend sind.

Die Reduktion bürokratischer Hürden erleichtert den Zugang zu Fördermitteln und ermöglicht eine schnellere Umsetzung von Innovationsprojekten. Dies stärkt die unternehmerische Flexibilität und fördert eine dynamische Marktanpassung. Eine effiziente Förderlandschaft ist dabei entscheidend, um die Ergebnisse von Förderprojekten nachhaltig zu nutzen und die Rahmenbedingungen für Unternehmen zu verbessern. Durch klimapolitische Maßnahmen und nationale Initiativen kann der Markt für saubere Technologien gestärkt werden. Durch schnellere Prozesse, von der Planung bis zur Produktion, können Hersteller Wettbewerbsvorteile erzielen.

Empfehlung: Österreich braucht Fach(arbeits)kräfte zur Installation und Weiterentwicklung erneuerbarer Energietechnologien.

Die steigende Nachfrage nach sauberen Technologien wird auch den **Arbeitskräftebedarf** in Österreich erhöhen. Es wird mehr Fachkräfte in den Bereichen Forschung und Entwicklung, Maschinenbau, Elektronik und Recycling benötigt.

Die enge Zusammenarbeit mit Hochschulen ermöglicht die Schaffung von Talenten und Innovationen. Durch gemeinsame Forschungsprojekte und Programme können Synergien genutzt und die Entwicklung neuer Technologien unterstützt werden. Programme mit MUL, AIT, TU Graz, TU Wien könnten dazu beitragen, innovative Nachwuchskräfte zu entwickeln. Ein kooperatives Umfeld fördert den Austausch von Wissen und Ressourcen.

Die Schaffung von Aus- und Weiterbildungsprogrammen für spezialisierte Fachkräfte in den Bereichen Energiespeicher, Wasserstofftechnologien, PV und Wärmepumpen ist entscheidend, um den Fachkräftemangel zu lindern.

Gleichzeitig sind Qualifizierungsprogramme erforderlich, um sicherzustellen, dass Arbeitskräfte mit den neuen Technologien Schritt halten können. Die technologische Weiterentwicklung, insbesondere der Einsatz von Big Data und KI, wird ebenfalls neue Anforderungen an die Fähigkeiten der Beschäftigten stellen.

Die folgende Tabelle fasst erfolgversprechende technische Bereiche für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Österreich zusammen.

Tabelle 27: Aktionsfelder Technologiesouveränität

	Stärken	Fehlende Elemente	Aktivität
Photovoltaik	Herstellung, Spezialanwendungen (Carport, Gebäudeintegration), Systemtechnik	Wafer, Kupfer	Kooperation mit Siltronic AG, Recycling, Montagesysteme, Regeltechnik
Windkraft	Systemtechnik	Große Rotoren ¹²⁸ , Direktantriebe	Kooperation mit Vestas, Repowering, Kleinanlagen, vertikale Rotoren
Energiespeicher	Systemtechnik	Zellen	Systeme, Netzintegration, Netz als „Backbone“
Elektrolyse		Membranen, Elektroden	Kooperation Baden Württemberg, Aufbau eines Kompetenzzentrum mit Andritz AG, AVL, Fronius, MUL
Wärmepumpen	Bodensonden, Optimierung		Einsatz von KI, Produktivitätssteigerung; Kooperation mit Ochsner Wärmepumpen GmbH
Kreislaufwirtschaft	Kupferrecycling		Recycling (Hub and Spoke), Hydrometallurgische Verfahren

Um Technologiesouveränität in den genannten Marktbereichen zu erreichen, sollte Österreich:

- Die Entwicklung von Fachkräften im Bereich erneuerbare Energien und Technologie als entscheidend für die Schaffung einer nachhaltigen und innovativen Industrie vorantreiben
- Investitionen in Forschung und Entwicklung fördern für technologische Innovationen, das Verbessern bestehender Technologien, und die Produktivitätssteigerung von Produktionstechnologien
- Lokale Produktion von Schlüsselkomponenten und Technologien fördern, die die Abhängigkeit von ausländischen Wertschöpfungsketten zu reduzieren
- Eine starke Startup-Kultur aufbauen, um neue und disruptive Technologien zu fördern. Startups treiben Innovationen voran, vor allem in Nischenbereichen, die von größeren Unternehmen nicht sofort bedient werden. Risikokapital ist notwendig, um diese Startups zu unterstützen und ihnen das Wachstum zu ermöglichen, das für den internationalen Wettbewerb erforderlich ist

¹²⁸ Bundesverband WindEnergie (2022): Faktencheck: Balsaholz in Rotorblättern von Wind-Energieanlagen, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20220311_Faktencheck_Balsaholz_Final.pdf, abgerufen am 30. Dezember 2024

- Durch politische Maßnahmen und finanzielle Anreize die Einführung und Weiterentwicklung erneuerbarer Energietechnologien fördern
- Kooperationen, auch mit ausländischen Netzwerkpartnern, fördern

4.2 Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen

4.2.1 Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Photovoltaik

Asiatische Hersteller dominieren den globalen Markt für Photovoltaikmodule. Österreich gehört nicht zu den großen Herstellern von Photovoltaikmodulen. Bei Komponenten, die wirtschaftlich in großen Mengen und mit einer starken Lernkurve produziert werden, ist Österreich im Nachteil. Standardprodukte sind hier schwer konkurrenzfähig. Die Schließung von Produktionsstätten von Meyer Burger in Deutschland und der Fokus auf den amerikanischen Markt zeigen, dass Unternehmen flexibel auf internationale Marktbedingungen reagieren müssen.

Österreichische Unternehmen haben in Nischenmärkten, wie der Herstellung von Hochleistungsmodulen und spezialisierten Solarsystemen, Erfolg. Es gibt Potenzial, insbesondere in der Entwicklung von spezialisierten Solarsystemen und Energiespeicherlösungen. Unternehmen wie Kioto sind auf hochwertige Solarmodule spezialisiert, die in Regionen mit weniger Sonnenstunden effizient arbeiten. Zu den Nischenprodukten zählen auch Carports oder fassadenintegrierte Anlagen. Österreichische Firmen bieten spezialisierte innovative Produkte wie bifaziale Module.

Unternehmen wie Fronius arbeiten an fortschrittlichen Wechselrichtern und Speichersystemen, die die Nutzung von Solarenergie effizienter und zuverlässiger machen.

Technologien wie Halterungen, Nachführungen sind für die Maximierung des Wertes des lokalen Einsatzes relevant. Dazu gibt es eine Reihe von Unternehmen, die auf die Integration von PV-Systemen spezialisiert sind. Sie bieten maßgeschneiderte Lösungen für Privathaushalte, Gewerbe und landwirtschaftliche Betriebe. Diese Unternehmen können auf die zunehmende Nachfrage nach dezentraler Energieerzeugung und Eigenverbrauch setzen.

Österreich hat einen technologischen Vorsprung¹²⁹ bei Technologien rund um die Integration erneuerbarer Energiequellen in Gebäude, darunter Photovoltaik, Solarthermie oder Windkraftanlagen und Wärmepumpen und bei Energieeffizienz. Schwächen bestehen in IKT. Durch den Ausbau der Forschung und Entwicklung in diesem Bereich und die Förderung von lokal produzierten Solarkomponenten könnte Österreich seine Abhängigkeit von ausländischen Herstellern reduzieren.

Tabelle 28 zeigt eine Aufschlüsselung der Kostenstrukturen für verschiedene erneuerbare Energietechnologien in Österreich, gegliedert nach Rohstoffen, Komponenten, Installation, Planung und Vertrieb sowie Wartung.

Im Bereich Photovoltaik entfallen etwa 11% der Modulkosten auf Silizium. Komponenten wie Module, Wechselrichter und Montagesysteme machen rund 50 % der Gesamtkosten aus, während für Installation und Systemeinsbindung ca. 20 bis 30% anfallen. Die Planung und der Vertrieb betragen zwischen 5 und 20%, und die Wartung rund 2%. Die Vertriebsmodelle über Großhändler und Installateure erhöhen die Kosten für den Anwender signifikant. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis eigener Recherchen über die Kostenstrukturen von Angeboten für Photovoltaikinstallationen und die relativ relevanteren Installationskosten bei kleinen

¹²⁹ Vollebergh, H., Van der Werf, E., Vogel, J. (2023): A descriptive framework to evaluate instrument packages for the low-carbon transition, https://www.researchgate.net/publication/366699958_A_descriptive_framework_to_evaluate_instrument_packages_for_the_low-carbon_transition, abgerufen am 30. Dezember 2024

Anlagen. Die unterstreicht die Relevanz von Planung, Systemintegration und Montage für die heimische Wertschöpfung. Insgesamt liegt das Marktvolumen bei 5,7 Milliarden Euro.¹³⁰

Probleme entstehen durch Preisdruck für österreichische Hersteller. Eine Verlagerung der Lieferkette nach Europa würde die Kosten (deutlich) erhöhen.

Schlüsseltechnologien, die für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit entscheidend sind Wafer-, und Gleichrichtertechnologien. Der Ausbau von Nischenmärkten, wie etwa gebäudeintegrierte Photovoltaik oder Carport-Systeme, bietet Potenzial für neue Marktsegmente und stärkt die heimische Industrie.

Um die Abhängigkeit von importierten Silizium-Wafern zu verringern, sollte der Aufbau einer europäischen Produktion gefördert werden. Investitionen in Forschungszentren und Produktionsanlagen sind entscheidend. Dieser Ansatz ist sehr kostenintensiv und aufgrund der Economy of Scale und Lernkurve nur auf europäischer Ebene erfolgversprechend. Eine gangbare Alternative stellt die Kooperation mit bestehenden europäischen Herstellern wie Siltronic dar. Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass österreichische Modulherstellern wie Kioto strategische Partnerschaften mit globalen Akteuren wie Siltronic weiter ausbauen sollten.

Der Aufbau von Recyclinganlagen für PV-Module und andere Komponenten wie Wechselrichter könnte zur Ressourcenschonung beitragen und die Wiederverwendung von Rohstoffen wie Silizium fördern. Dieser Ansatz erfordert Vorbereitung, der Business Case ist allerdings erst in ca. 20 Jahren zu erwarten. Die Kapazität entsprechender Anlagen würde wahrscheinlich den nationalen Bedarf übersteigen.

Investitionen in Recyclinglösungen für Verbundmaterialien und Solarmodule verbessern die ESG-Bilanz und sichern Marktanteile im Bereich nachhaltiger Technologien.

Die Produktion von Photovoltaik-Modulen kann in Österreich wirtschaftlich sinnvoll sein, wenn gezielte Fördermaßnahmen ergriffen werden. Investitionen in die Fertigungskapazitäten und der gezielte Einsatz staatlicher Subventionen können dazu beitragen, dass die heimische PV-Industrie international konkurrenzfähig bleibt.

Internationale Märkte bieten große Chancen, die jedoch nur durch umfassende Skalierung genutzt werden können. Unternehmen müssen ihre Produktionskapazitäten deutlich erweitern, um von Skaleneffekten zu profitieren und auf dem globalen Markt wettbewerbsfähig zu bleiben. Dies gilt besonders in stark umkämpften Bereichen wie erneuerbaren Energien.

China dominiert viele Märkte durch massive Produktionskapazitäten und die Fähigkeit zur Skalierung. Österreich hat hier aufgrund seiner kleineren Märkte und Produktionskapazitäten Nachteile, besonders bei Produkten, die in großen Stückzahlen und kostengünstig hergestellt werden müssen. Dies verdeutlicht, dass Standardprodukte in Österreich schwer konkurrenzfähig sind und ein Fokus auf spezialisierte Lösungen sinnvoll ist. Kioto und ISOVOLTAIC zeigen, dass Spezialisierung in der Produktion von Photovoltaik-Modulen und speziellen Komponenten erfolgversprechend ist. Besonders in Nischenmärkten, wie bifazialen oder teiltransparenten Modulen, hat Österreich Chancen, sich durch innovative Ansätze zu positionieren.

Empfehlung: Österreich sollte auf spezielle Produkte und Nischenmärkte fokussieren

Österreich kann durch strategische Fokussierung, Investitionen in Innovation und gezielte Fördermaßnahmen eine führende Rolle im Bereich sauberer Technologien einnehmen. Im Bereich

¹³⁰ Biermayr, P., et al (2024): Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2023, <https://pvaustria.at/wp-content/uploads/Kurzfassung-Marktstatistik-2023.pdf>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Photovoltaik liegen die Stärken in der Herstellung, in Spezialanwendungen wie Carports und Gebäudeintegration sowie in der Systemtechnik, während Wafer und Kupfer als fehlende Elemente identifiziert wurden. Hier konzentrieren sich die Aktivitäten auf Kooperationen mit der Siltronic AG, Recycling und die Entwicklung von Montagesystemen.

Zur Stärkung der Marktposition sollte auf spezielle Produkte fokussiert werden, wie Carports, große Solaranlagen, Ausbau von Solaranlagen auf Dächern und Fassaden, insbesondere in städtischen Gebieten, Nutzung von Freiflächen entlang von Autobahnen und Bahnstrecken, Agri-Photovoltaik. Diese bieten nicht nur hohe Margen, sondern decken auch den zunehmenden Bedarf an maßgeschneiderten und individuellen Lösungen ab. Ein klar strukturiertes, Vertriebsmodell wird etabliert, um Transparenz zu gewährleisten und die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

Großes Potential wird der Entwicklung von Sensoren und Regeltechnik beigemessen. Österreichische Hersteller von Sensoren und Software könnten hier bei zukünftigen Entwicklungen unterstützt werden. In diesem Bereich ist der Materialaufwand gering. Der Fokus wird auf die Entwicklung von Smart Home-kompatiblen PV-Systemen gelegt, um neue Marktpotenziale zu erschließen und einen langfristigen Wettbewerbsvorteil zu sichern.

Mit der wachsenden Bedeutung der Integration erneuerbarer Energien in das Stromnetz gibt es in Österreich eine Reihe von Unternehmen, die auf die Entwicklung von Smart-Grid-Technologien und Energiemanagementsystemen spezialisiert sind. Diese Systeme ermöglichen eine effiziente Verteilung und Nutzung von Energie und unterstützen die Netzstabilität.

4.2.2 Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Energiespeicher

Die Energiespeicherung ist ein wachsender Markt, und europäische Hersteller spielen eine bedeutende Rolle bei der Entwicklung von Batteriespeicherlösungen, insbesondere für erneuerbare Energiesysteme. Unternehmen in Deutschland und Frankreich entwickeln fortschrittliche Batterietechnologien und Energiespeicherlösungen, die für die Integration in smart Grids geeignet sind. Neben Batterien können systemische Maßnahmen, die das Stromnetz als Rückgrat benutzen, dem Austausch von Angebot und Nachfrage unterstützen. Europäische Unternehmen sind führend in der Entwicklung von smart Grid-Technologien, die eine effiziente Verwaltung und Integration von erneuerbaren Energien in das Stromnetz ermöglichen. Dies umfasst die Entwicklung von Software, Hardware und Technologien zur Verbesserung der Netzstabilität und Energieeffizienz.

In Österreich ist die Firma Kreisel führend in Batteriesystem für spezielle Nischen wie Ladestationen mit integrierten Speichern, marine Anwendungen, oder Off-highway Anwendungen.

Mit dem Aufschwung der Elektromobilität gibt es in Österreich eine zunehmende Nachfrage nach Ladeinfrastrukturen. Unternehmen wie KEBA und Kreisel Electric sind in diesem Bereich aktiv und bieten fortschrittliche Ladegeräte und Lösungen für die Elektromobilität an.

Für Energiespeicher entfallen etwa 50% der Kosten auf Lithium-Ionen-Zellen, während andere Komponenten 30% ausmachen. Die Installation kostet 10 bis 20%.

Europäische Investitionen in Halbleiter und Batteriezellen zielen auf die lokale Fertigung von Chips und Batteriekomponenten. LFP-Batterien gelten als sicherer und langlebiger für stationäre Anwendungen, wobei NorthVolt in Schweden als europäischer Vorreiter agiert.

Die Energiewende erfordert verstärkt Energiespeicher, nicht nur den (teuren) Ausbau von Netzkapazitäten, wie er zurzeit verfolgt wird. Österreich könnte sich als internationaler Anbieter für Wärmespeicher und

speichergekoppelte PV-Anlagen etablieren. Automatisierung und Digitalisierung gelten als wichtige Investitionsbereiche, um Europa wettbewerbsfähig zu halten.

Die Entwicklung einer europäischen Produktionsinfrastruktur für Lithium-Ionen-Batterien und die konsequente Entwicklung alternativer Speichertechnologien wie Feststoffbatterien könnte die Abhängigkeit von asiatischen Märkten zu reduzieren. Dies erscheint aus wirtschaftlichen Gründen wenig erfolgversprechend.

Potentiell erfolgversprechende Themen sind:

- Batteriespeicher für dezentrale Anwendungen.
- Pumpspeicherkraftwerke
- Wasserstoff als Energiespeicher.
- Smart-Grid-Technologien zur Steuerung des Energieverbrauchs.

Die Förderung von F&E in neuen Technologien wie NaCl-Batterien, Wasserstoffspeichern oder der Entwicklung von Recyclingprozessen für Batteriematerialien (Lithium, Nickel, Kobalt) erscheint unerlässlich.

Neue Technologien sind

- Festkörperbatterien (Solid-State-Batterien), die festen Elektrolyte anstelle von flüssigen verwenden und dadurch höhere Energiedichten, verbesserte Sicherheit und längere Lebensdauern bieten.
- Natrium-Ionen-Batterien als kostengünstige und umweltfreundlichere Alternative zu Lithium-Ionen-Batterien
- Redox-Flow-Batterien besonders für stationäre Anwendungen
- Sauerstoff-Ionen-Batterien, z. B. entwickelt von der TU Wien
- Lithium-Luft-Batterien

Empfehlung: Österreich sollte die Forschung auf NaCl-Batterien und anderen neuen Technologien fokussieren.

Durch Anreize für dezentrale Energiespeicherlösungen und deren Integration in das Stromnetz (bidirektionales Laden) können systemweite Vorteile erzielt werden. Entsprechende Standards und rechtliche Regelungen wären noch zu schaffen.

Eine zentrale Rolle spielt der Ausbau öffentlicher Infrastruktur. Die Unterstützung für Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge und Produktionsstätten für PV und Wasserstoff ist notwendig, um den Zugang zu nachhaltigen Technologien zu verbessern. Die Schaffung dieser Infrastruktur fördert nicht nur den Einsatz erneuerbarer Energien, sondern schafft auch neue Marktchancen. Unternehmen wie Verbund und OMV könnten hier Pionierarbeit leisten, indem sie die nötige Infrastruktur für grüne Wasserstoffspeicherung und die Integration von Solarenergie schaffen.

Zur Umsetzung dieser Strategie gehört der beschleunigte Ausbau dezentraler Ladeparks, die Integration von erneuerbaren Energien wie PV und Wärmepumpen. Dies unterstützt den Marktdurchbruch für Elektrofahrzeuge und speichert saisonale Energie effizient. Zudem wird die öffentliche Infrastruktur durch die Entwicklung von Energiemanagementsystemen für die Integration von Solaranlagen und Speichern unterstützt.

Ein umfassendes Recyclingnetzwerk für Batterien sollte etabliert werden, um Rohstoffe zurückzugewinnen und die Kreislaufwirtschaft zu stärken. Diese könnte im Rahmen eines europäischen Spokes and Hub-Konzeptes erfolgen.

Schlüsseltechnologien, die für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit entscheidend sind Batterietechnologien, einschließlich innovativer Ansätze wie NaCl-Batterien, die eine sichere, langlebige und umweltfreundliche Alternative darstellen. Diese Technologien sind nicht nur für die Solarenergie von Bedeutung, sondern auch für die Unterstützung von Energiespeichersystemen und die nachhaltige Nutzung von Energie in verschiedenen Bereichen.

Aktuelle Initiativen fokussieren sich auf die Entwicklung von Speichersystemen, die Netzintegration, die Nutzung des Netzes als „Backbone“ sowie Recyclingkonzepte wie „Hub and Spoke“.

4.2.3 Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Elektrolyseure

Europa investiert stark in die Entwicklung von Wasserstofftechnologien, insbesondere in die Produktion von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse, die mit erneuerbarer Energie betrieben wird. Länder wie Deutschland, die Niederlande und Frankreich sind Vorreiter in diesem Bereich, und europäische Unternehmen entwickeln fortschrittliche Elektrolysetechnologien sowie Infrastrukturen für die Speicherung und den Transport von Wasserstoff.

Die Wasserstofftechnologie ist ein aufstrebender Sektor, in dem Österreich Potenzial hat, eine führende Rolle einzunehmen. **Der Fokus liegt dabei auf der Produktion von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse, betrieben mit erneuerbaren Energien.** Unternehmen wie AVL List und Andritz arbeiten bereits an innovativen Lösungen für die Wasserstoffproduktion, -speicherung und -nutzung. Durch die Förderung von Forschung und Entwicklung in diesem Bereich sowie die Investition in eine entsprechende Infrastruktur kann Österreich Technologien entwickeln, die es ermöglichen, Wasserstoff als wichtigen Bestandteil einer kohlenstofffreien Wirtschaft zu nutzen.

Bei Elektrolyseuren machen der Elektrolyseblock 40% und weitere Komponenten 60% der Gesamtkosten aus. Installationen verursachen ca. 20% der Kosten.

Für die Elektrolyse werden Membranen und Elektroden als fehlende Komponenten genannt, wobei bereits Kooperationen mit Baden-Württemberg, der Andritz AG und AVL laufen oder geplant sind.

Im Bereich Wasserstoff werden Elektrolyse, Wasserstoffherstellung, die Herstellung von Massenchemikalien aus Wasserstoff, die Kavernenspeicherung als Schlüsseltechnologien identifiziert. Die Aktivität österreichischer Anlagenbauer wird hier als stark und zukunftssträftig eingeschätzt.

In der Elektrolysetechnologie sind Fortschritte in der Materialentwicklung entscheidend. Österreich sollte gezielte F&E-Förderungen bereitstellen, um leistungsfähigere und kostengünstigere Elektrolyseure zu entwickeln.

Es sollte darauf abgezielt werden, die industrielle Fertigung von Elektrolyseuren hochzufahren, um Österreich zu einem europäischen Zentrum für Wasserstofftechnologien zu machen. Implementierung von Wasserstoffprojekten, bei denen Elektrolyseure im industriellen Maßstab eingesetzt werden, fördert die Praxiserfahrung und erhöht das Marktpotenzial. Die Nutzung bestehender Erdgasinfrastrukturen für grüne Wasserstoffspeicherung könnte Ansätze für die Speicherung von grünem Wasserstoff bieten.

Strategische Partnerschaften mit globalen Unternehmen wie Andritz und AVL sowie regionalen Akteuren könnten den Technologietransfer beschleunigen und die Marktführerschaft im Bereich Wasserstofftechnologien sichern.

4.2.4 Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Wärmepumpen

Österreich hat Potenzial im Bereich der geothermischen Energie, vor allem durch geothermische Wärmepumpen für die Beheizung von **Gebäuden**. Im Sektor Wärmepumpen wird Österreich als sehr innovativ und stark eingeschätzt. Hier können weitere Optimierungen helfen, diese Position zu behalten und auszubauen. **Unternehmen wie IDM Energiesysteme und Ochsner Wärmepumpen entwickeln und produzieren fortschrittliche Wärmepumpen, die sowohl auf dem heimischen als auch auf internationalen Märkten gefragt sind.** Durch die Förderung von Forschung und Entwicklung in diesem Bereich, insbesondere durch geologische Erkundungen und die Verbesserung der Bohrtechnologien, kann Österreich seine eigenen geothermischen Ressourcen besser nutzen und so die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen weiter reduzieren.

Für Wärmepumpen entfallen ca. 60% der Kosten auf das System selbst, während 30% für die Integration in bestehende Systeme aufgewendet werden.

Die hohe Abhängigkeit von einzelnen Chip-Lieferanten schafft Unsicherheiten bezüglich der Verfügbarkeit von elektronischen Elementen. Durch stabile Lieferketten und mögliche europäische Chipwerke könnten Risiken gemindert werden. Innovationen, wie der Einsatz von Künstlicher Intelligenz zur Steuerung von Wärmepumpen oder die Entwicklung energieeffizienterer Systeme, sollten intensiv gefördert werden.

Die Kooperation mit nationalen Unternehmen wie Ochsner Wärmepumpen und anderen österreichischen Anbietern könnte gefördert werden, um lokale Produktionskapazitäten zu sichern und Innovationen voranzutreiben: Die Nachfrage in der Industrie steigt, um Prozesswärme mit Temperaturen von 80–150°C zu erzeugen. Hochtemperatur-Wärmepumpen sind für ältere Gebäude mit bestehenden Radiatorsystemen besonders attraktiv. Fortschritte bei Kompressortechnologien und Kältemittelanpassungen ermöglichen höhere Effizienz bei hohen Temperaturen. Der Aufbau von Fertigungslinien für optimierten Komponenten von Wärmepumpen, wie Kompressoren, Expansionsventilen und Bodensonden, könnte die heimische Wertschöpfung erhöhen. Weitere Innovationsfelder sind: KI-gestützte Steuerung zur Anpassung an Wetterprognosen und Energiepreise, Integration in Smart-Home-Systeme für höhere Komfort- und Effizienzwerte, automatische Wartung und Diagnose durch IoT-gestützte Sensorik, Ejektor-Technologie zur Steigerung der Effizienz durch Rückgewinnung von Druckenergie, optimierte Inverter-Kompressoren zur Steigerung der Effizienz bei Teillast und niedrigen Außentemperaturen, Zwei-Phasen-Wärmeübertrager zur Optimierung des Wärmeübergangs bei niedrigen Temperaturen.

Wärmepumpen sollten verstärkt in intelligente Energienetze integriert werden, um die Flexibilität und Effizienz des Gesamtsystems zu verbessern.

4.2.5 Technologiespezifische Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Windkraft

Um die Abhängigkeit von ausländischen Herstellern bei Rotoren oder Direktantriebsgeneratoren zu reduzieren, sollte der heimische Maschinenbau stärker gefördert werden. Hier besteht allerdings aufgrund der Wirtschaftlichkeit der Trend zu Großanlagen.

Neben großen Onshore-Anlagen sollten auch kleinere Windkraftanlagen für dezentrale Energieproduktion gefördert werden, insbesondere für ländliche Gebiete oder für vertikale Rotoren, die spezifische lokale Vorteile bieten.

In der Windkraft liegt der Schwerpunkt auf der Systemtechnik, jedoch fehlen Rotoren und Direktantriebe für Generatoren. Die Aktivitäten umfassen Kooperationen mit Vestas, Re-Powering, die Entwicklung von Kleinanlagen sowie den Einsatz vertikaler Rotoren.

Bei der Herstellung kleiner Windkraftanlagen treffen österreichische Hersteller auf technische Herausforderungen. Die Herstellung von großen Rotorblättern oder speziellen Aluminiumussteilen verlangt innovative Lösungen und stärkere Zusammenarbeit.

Im Bereich Windkraft machen Komponenten 50% der Kosten aus. Die Installation umfasst ca. 20%, insbesondere für den Wegebau, Fundamente und Netzanschluss.

Österreich sollte Anreize für das Re-Powering bestehender Anlagen schaffen, um deren Effizienz zu erhöhen und die Gesamtleistung zu steigern.

Kooperationen mit internationalen Unternehmen wie Vestas können den Wissenstransfer sichern und helfen, technologische Lücken im Bereich der Direktantriebe zu schließen. Österreichische Hersteller von Sensoren und Software könnten hier bei zukünftigen Entwicklungen unterstützt werden.

Die mögliche Gesamtwertschöpfung durch erneuerbare Energietechnologien in Österreich zeigt Tabelle 28. Die Daten stammen aus verschiedenen Literaturquellen.

Tabelle 28: Wertströme erneuerbarer Energietechnologien

Technologie	Rohstoffe	Komponenten	Installation, Systemeindeinbindung	Planung und Vertrieb	Wartung	Insgesamt mindestens [Milliarden EUR/a, 2023]
Photovoltaik	11% der Modulkosten für Silizium	ca. 50% (Module, Wechselrichter, Montagesystem)	ca. 20 - 30%	5 - 20	2	5,7
Energiespeicher	Lithium-Ionen Zellen 50%	Andere Komponenten außer den Zellen 30%	10 - 20%	5 - 25		0,5
Elektrolyse	Anteilig der Komponenten: 40% für den Elektrolyseblock, 60% den Rest	ca. 60 – 80% mit Elektrolyseblock	ca. 20%	10 - 20		0,6
Windkraft		50%	ca. 20% (i. A. des Wegebbaus, Fundament und Netzanschluss)	ca. 10	Ca. 15	1,7
Wärmepumpen		ca. 60% (i. A. des Systems)	ca. 30% (i. A. des Systems) plus Integration in das bestehende System (bis zu 30%)	15		1,6

4.2.6 Technologiespezifisch Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Kreislaufwirtschaft

Die Entwicklungen im Bereich sauberer Technologien haben direkte Auswirkungen auf Stoffströme und den Bedarf an Rohstoffen. Mit dem Ausbau der Märkte und einem steigenden Marktanteil in den erneuerbaren Energien wird der **Rohstoffbedarf** für die Produktion neuer Technologien wie Photovoltaik und Batteriespeicher signifikant steigen. Gleichzeitig gewinnt **Recycling** an Bedeutung, da es zur Sicherstellung

der Rohstoffversorgung und zur Minimierung der Umweltauswirkungen beiträgt. Neue Technologien im Recyclingbereich bieten daher großes Potenzial.

Ein strategisch wichtiger Aspekt ist die Entwicklung von Recyclingtechnologien. Die Entwicklung von Recyclingtechnologien für Solarmodule und Wechselrichter ist eine wichtige Priorität. Diese Technologien ermöglichen es, wertvolle Materialien wie Silber und Silizium zurückzugewinnen und erneut in den Produktionskreislauf zu integrieren.

Recyclingoptionen bestehen für alle relevanten Komponenten. Die Möglichkeiten und Schwierigkeiten, sowie möglich zukünftige Entwicklungen sind in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben. Der Bedarf an Lithium, Nickel und Kobalt in der Batteriezellenproduktion könnte im Jahr 2035 bis zu 30 Prozent aus Recycling abgedeckt werden und bis 2040 das Doppelte. Die Kombination aus hohem Materialaufkommen und niedrigen Recycling-Kosten schafft ein ideales Marktumfeld für die Batterieindustrie. In den kommenden Jahren wird sich die technologische Entwicklung von der Pyrometallurgie hin zur Hydrometallurgie verlagern, bei höheren Recyclingeffizienzen. Eine Wertschöpfungskette bestehend aus Präparation, Vorbehandlung und Hauptbehandlung wird derzeit aufgebaut. Eine weitere Spezialisierung und Skalierung entlang der Wertschöpfungskette könnten die Investitionen um bis zu 50% reduzieren.

Die hohen Investitionskosten für die Hauptbehandlung beim Recycling verlagern die Wertschöpfungskette in Richtung zentralisierten Hubs, wobei die Aufbereitung und Vorbehandlung in dezentralen Speichen in der Nähe der Kunden platziert wird. Große Mengen an Photovoltaiketeilen sind 20 bis 25 Jahre nach dem Installationsboom von 2020 zu erwarten.

Saubermacher zeigt durch seine Innovationen im Batterierecycling, dass technologischer Fortschritt im Batterierecycling möglich ist. Die Entwicklung von Unternehmen wie Redux Recycling und die Übernahme durch Redwood zeigt, dass die Optimierung durch Skalierung essenziell für den Erfolg in der Kreislaufwirtschaft ist. Hier zeigt sich, dass technologische Vorreiterrolle und nachhaltige Konzepte im internationalen Wettbewerb eine Schlüsselrolle spielen, dass für langfristigen wirtschaftlichen Erfolg in diesen Technologien aber auch hoher Kapitaleinsatz relevant ist. Dies verdeutlicht auch, dass der Skalierungseffekt entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit ist. Unternehmen müssen auf globalen Märkten agieren, um von Skalierungseffekten zu profitieren.

5 Offene Fragen

Folgende Forschungsfragen sollten in Nachfolgeprojekten untersucht werden

- Die Identifikation von Schlüsseltechnologien und Potentialabschätzung sollte durch eine systematische Analyse laufender österreichischer und europäischer Forschungsprojekte erfolgen unterstützt durch die Befragung von Experten. Erhoben werden sollten erneuerbare Energietechnologien, die grundsätzlich im Labor funktionieren und die mit Kompetenzen österreichischer Firmen kompatibel sind.
- Der Fokus sollte dabei auf wissensintensiven, materialextensiven Schwerpunkten liegen
- Um Schlüsseltechnologien herum sollten Fokusgruppen den Handlungsbedarf dokumentieren und programmieren (z. B.: Wechselrichter, effizientere Solarzellenmaterialien, Gebäudeintegration, neue Wärmepumpen, zuverlässige Windkraftanlagen für Schwachwindstandorte und bergige Standorte, neue Batterietechnologien, Prozessoptimierung für Schlüsselprozesse, Optimierung der Netzstabilität bei einem hohen Anteil an fluktuierenden erneuerbaren Energien, Forschung an digitalen Technologien wie Blockchain zur Energieverteilung, Entwicklung von Demand-Response-Systemen zur Flexibilisierung des Verbrauchs....)
- Forschungslandkarte erneuerbare Energietechnologien mit Themen und Mittelbedarf und mögliche Clusterbildung
- Tatsächliche praktische Kostenstrukturen, deren Gestaltbarkeit, und Arbeitsmarkteffekte sollten gemeinsam mit Firmen an tatsächlichen Fallbeispielen erhoben werden. Dies sollte tatsächliche Beschaffungskosten, Herstellkosten, Montagekosten und Ertragserwartungen der Lebenszyklusteilnehmer umfassen.
- Der heutige tatsächliche Eigenfertigungsanteil der verschiedenen Technologien, Möglichkeiten der Verlagerung und Kostenwirksamkeit anhand von Fallbeispielen
- Kooperation und Kooperationsbereitschaft
- Verfügbare (Risikokapital-)Finanzierung und Möglichkeiten der Förderung speziell von Startups, Fertigungsüberleitung, Automatisierung

6 Literatur

AEM Elektrolyseure - das Beste aus zwei Welten, https://www.enapter.com/de/aem-electrolysers/?utm_medium=sea&utm_source=google&utm_campaign=nonbrand_de_elektrolyseur_kombis&utm_content=161374179064&utm_term=wasserstoff%20elektrolyseur&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwIbu2BhA3EiwA3yXyuwF3vVRuUBQISJpem7h6sUKWKVck-fwuBXY5zyuKSjZDXNPHTcQiThoC4yMQAvD_BwE, abgerufen am 30. Dezember 2024

Air source, B. Greening, A., Energy 39 (2012)

AIT, ait.ac.at, abgerufen am 30. Dezember 2024

Assadi, A.: ReNaRe – Recycling – Nachhaltige Ressourcennutzung, <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/ReNaRe.html>, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, abgerufen am 30. Dezember 2024

Austrian Technology Platform Photovoltaics Photovoltaic Industry and Research in Austria 2024, Vienna 2024

Automobil Produktion, Österreichisches Projekt pusht Lithium-Ionen-Batterien

Automobilproduktion, <https://www.automobil-produktion.de/technologie/oesterreichisches-projekt-pusht-lithium-ionen-batterien-813.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

AVL, <https://www.avl.com/de/engineering/e-mobility-engineering/battery-development/battery-modules-and-packs>, abgerufen am 30. Dezember 2024

aws Energie & Klima - spezielle Konditionen/Bedingungen: aws Fertigungsüberleitung von Energie- und Umwelttechnologien bei Start-ups, <https://www.aws.at/aws-energie-klima/aws-fertigungsueberleitung-von-energie-und-umwelttechnologien-bei-start-ups/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Bach, D. (2024): Messen, Kontrollieren, Optimieren. Fraunhofer IPM Jahresbericht 2022/2023, Freiburg i.B., 2023. S. 64-65, <https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/energiewandler-thermische/komp/kalorische-systeme/elektrokalorische-systeme.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Bauer, M., Erixon, F. (2020): Europas Streben nach Technologiesouveränität: Chancen und Risiken für Deutschland und die Europäische Union, <https://ecipe.org/publications/europas-streben-nach-technologiesouveranitat/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Behrendt, S., Erdmann, L., Marwede, M., Caporal, S., Ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+ Arbeitspaket 9 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess), Wuppertal, November 2010

Bett, A., Erneuerbare Energie – Chancen einer industriellen Wertschöpfung in Europa, FVEE Themen 2020

Bett, A., et al: Erneuerbare Energie – Chancen einer industriellen Wertschöpfung in Europa, FVEE – Jahrestagung 2020: Forschung für den European Green Deal

Bierbauer, P., Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2022, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 36a/2023

Biermayr P., Aigenbauer, S., Dißauer, C., Eberl, M., Enigl, M., Fechner, H., Fink, C., Fuhrmann, M., Hengel, F., Jaksch-Fliegenschnee, M., Leonhartsberger, K., Matschegg, D., Moidl, S., Prem, E., Riegler, T., Savic, S., Schmidl, C.,

Biermayr P., Aigenbauer, S., Dißauer, C., Eberl, M., Enigl, M., Fechner, H., Fink, C., Fuhrmann, M., Hengel, F., Jaksch-Fliegenschnee, M., Leonhartsberger, K., Matschegg, D., Moidl, S., Prem, E., Riegler, T., Savic, S., Schmidl, C.,

Biermayr, P., et al (2024): Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2023, <https://pvaustria.at/wp-content/uploads/Kurzfassung-Marktstatistik-2023.pdf>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Biermayr, P., Prem, E. (2024); Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2023, Technologiereport Wärmepumpen, https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw_pdf/events/20240619-energiewende-marktstatistik/schriftenreihe-2024-17i-Waermepumpen.pdf, abgerufen am 30. Dezember 2024

Bilfinger, <https://www.bilfinger.com/de/at/ueber-uns/bilfinger-in-oesterreich/bilfinger-industrial-services-austria/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

BMK, Patente für Stromspeicher-Technologien schnellen in die Höhe, <https://infothek.bmk.gv.at/patente-fuer-stromspeicher-technologien-schnellen-in-die-hoehe/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Bossert, O., Kürtz, K., Richter, G.: Not all tech trends are created equal. Keeping a clear eye on what matters can help steer to better decisions .https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/false-friends-or-good-ends-the-cios-four-point-guide-to-navigating-technology-trends?cid=other-eml-ofl-mip-mck&hlkid=ca822e87c32243e38518e925b4674047&hctky=1298066&hdpid=b7a18c17-867a-48e5-b5fb-b0dc116d7af3#/, abgerufen am 30. Dezember 2024

Brinner, A. (2022): Technologieentwicklung Elektrolyse und Projekt "Elektrolyse made in Baden-Württemberg, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

Bruckner, R. (2024): Österreichs Autozulieferer wollen mit chinesischem Autobauer BYD ins Geschäft kommen, <https://www.derstandard.at/story/3000000229667/oesterreichs-autozulieferer-wollen-mit-chinesischem-autobauer-byd-ins-geschaeft-kommen>, Der Standard, abgerufen am 30. Dezember 2024

Bundesministerium Finanzen, Critical Raw Materials Act, <https://www.bmf.gv.at/themen/bergbau/mineralrohstoffpolitik/europaeische-union/kritische-rohstoffe.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Bundesministerium Finanzen: Masterplan Rohstoffe 2030 <https://www.bmf.gv.at/themen/bergbau/mineralrohstoffpolitik/oesterreich/masterplan-rohstoffe-2030.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024, Österreichische Photovoltaik-Strategie

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024: Made in Europe: Höhere Förderung für Photovoltaik-Anlagen mit europäischen Komponenten

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Energie in Österreich Zahlen, Daten, Fakten 2023

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, PHOTOVOLTAIK Industrie und Forschung in Österreich 2024

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung:Natürliche Ressourcen werden stark belastet, <https://www.bmz.de/de/laender/indien/umweltsituation->

10350#:~:text=Auf%20der%20Weltklimakonferenz%20im%20Herbst,aus%20erneuerbaren%20Energien%20bis%202030, abgerufen am 30. Dezember 2024

Bundesverband Windenergie (2022): Faktencheck: Balsaholz in Rotorblättern von Wind-

Bundesverband Windenergie, Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen, 2023

Bürgi, R. (2023): Wärmepumpen richtig entsorgen, <https://www.energie-experten.ch/de/wissen/detail/waermepumpen-richtig-entsorgen.html>, Energie Experten, abgerufen am 30. Dezember 2024

BVSE (2023): Redwood übernimmt Batterierecyclinganlage, <https://www.bvse.de/sachverstand-bvse-recycling/themen-ereignisse/10163-chinesische-papierfabrik-nimmt-andritz-deinking-anlage-im-3-loop-design-in-betrieb.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

China veröffentlicht Erlassentwurf zur Förderung einer gesunden Entwicklung der Photovoltaikindustrie, <https://german.cri.cn/2024/07/11/ARTI0Kevxenn7n7Pz4ENxSnA240711.shtml>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Chinesisches E-Moped mit Natrium Batterie, https://futurezone.at/produkte/china-yadea-guanneng-q50-elektrisches-e-moped-natrium-batterie-440-euro/402996512?dicbo=v2-tS0e1e4&utm_source=outbrain_widget&utm_medium=display&utm_campaign=kurierat_traffic, abgerufen am 10. 1. 2025

Dada, M., Popoola, P. Recent advances in solar photovoltaic materials and systems for energy storage applications: a review. Beni-Suef Univ J Basic Appl Sci 12, 66 (2023). <https://doi.org/10.1186/s43088-023-00405-5>

Das ist LAMBDA Wärmepumpen, <https://lambda-wp.at/ueber-uns/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

DAS, <https://das-energy.com/de/home>, abgerufen am 30. Dezember 2024

David Fritz, D., Heinfellner, H., Lambert, S. (2023): Rohstoffe der Elektromobilität, Kurzstudie zur Analyse derzeitiger und möglicher künftiger Rohstoffabhängigkeiten von Elektrofahrzeugen, Umweltbundesamt 2023

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH: Deutsch-chinesische Zusammenarbeit in der Klimapolitik
<https://www.giz.de/de/weltweit/130700.html#:~:text=China%20hat%20sich%20bis%202030,dem%20Jahr%202060%20kohlenstoffneutral%20werden>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Die bayerische Wirtschaft: Industrielle Arbeitskosten 2018 im internationalen Vergleich, https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Volkswirtschaft/2019/Downloads/Industrielle-Arbeitskosten-im-internationalen-Vergleich_2018.pdf, abgerufen am 30. Dezember 2024

Die sechs wichtigsten Fragen zu Lithium, <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/die-wichtigsten-fragen-zu-lithium.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Dowell, Market Insight: Global Energy Storage Market Outlook to 2030, <https://www.dowellelectronic.com/blogs/market-insight-global-energy-storage-market-outlook-to-2030/#:~:text=According%20to%20the%20research%2C%20the,the%20expected%20figure%20for%202023>, abgerufen am 30. Dezember 2024

EBS, https://e-batterysystems.com/standardsysteme/battery-packs/?utm_source=google&utm_medium=search&utm_campaign=code006&utm_id=code006&gad_sour

ce=1&gclid=Cj0KCQjwz7C2BhDkARIsAA SZKZ78NpgXRyVDlr8O uDTBzNiAeyW1qOovlEyRO9-Zmx5RBoWOHCCkQaAgBGEALw_wcB, abgerufen am 30. Dezember 2024

Ecolyzer, Green hydrogen, https://ecolyzer.com/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwlbu2BhA3EiwA3yXyu13K1LRwG5iF52iT40bdoncr9cM NfXK6LNkxoMrZnKyHelesxtnjRBoCbuMQAvD_BwE, abgerufen am 30. Dezember 2024

Ecosolifer, Powering the next solar revolution, <https://www.energytechreview.com/ecosolifer>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Electricity Storage With a Solid Bed High Temperature Thermal Energy Storage System (HTTES) - A Methodical Approach to Improve the Pumped Thermal Grid Storage Concept, January 2021, DOI: 10.2991/ahe.k.210202.005, Conference: 14th International Renewable Energy Storage Conference 2020 (IRES 2020)

Elektrizität in Indien im Jahr 2023/2024, <https://lowcarbonpower.org/de/region/Indien>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Elektrizität in Volksrepublik China im Jahr 2023/2024, https://lowcarbonpower.org/de/region/Volksrepublik_China, abgerufen am 30. Dezember 2024

Elektrolyseure in Österreich, Hydrogen Partnership Austria, <https://www.hypa.at/umsetzung/elektrolyseure>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Emergence and Economic Dimension of Airborne Wind Energy, April 2018 Green Energy and Technology, DOI: 10.1007/978-981-10-1947-0_1, In book: Airborne Wind Energy

ENERCON – Globaler Hersteller von Windenergieanlagen www.enercon.de, abgerufen am 30. Dezember 2024
Energieanlagen, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20220311_Faktencheck_Balsaholz_Final.pdf, abgerufen am 30. Dezember 2024

ERTEX-Solar, <https://www.ertex-solar.at/unternehmen/unser-team/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

EU-Kommission, 2020 https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ac_20_260 abgerufen am 30. Dezember 2024

European Aluminium Association, Aluminium im Nutzfahrzeugbau, 2011

European Solar PV Industry Alliance, <https://www.innoenergy.com/about/about-eit-innoenergy/industrial-value-chains/solaralliance/> abgerufen am 30. Dezember 2024

FFG Projektdatenbank, <https://projekte.ffg.at/projekt?go=1&q=W%C3%A4rmepumpe&thema%5B%5D=1>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Fleischman, J., How batteries will drive the zero-emission truck transition, McKinsey, 2024

Fraunhofer Austria (2024): Pressemitteilung, Für Nachhaltigkeit und Versorgungssicherheit: Projekt MoLiBity widmet sich dem Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, <https://www.fraunhofer.at/de/presse/pressemitteilungen/fuer-nachhaltigkeit-und-versorgungssicherheit.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Fraunhofer IKS, Künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen, <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/kuenstliche-intelligenz.html>, abgerufen am 10. 01. 2024

Fraunhofer ISI, Technologiesouveränität: Von der Forderung zum Konzept, 2020

FVEE – Jahrestagung 2020: Forschung für den European Green Deal, Erneuerbare Energie – Chancen einer

Gbadegeshin, S., Natsheh, A. (2022): Sustainable Futures Volume 4, 2022, 100077 Sustainable Futures
Overcoming the Valley of Death: A New Model for High Technology Startups

Gepp, J., Hahn, A. (2024): Wo Europa wirtschaftlich noch richtig stark ist
https://www.derstandard.at/story/3000000230130/wo-europa-wirtschaftlich-noch-richtig-stark-ist?xing_share=news, Der Standard, abgerufen am 30. Dezember 2024

Global Studies, Uni Graz: Rohstoffabbau in Österreich, <https://globalstudies.at/rohstoffabbau-in-oesterreich/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Global Wind Energy Council: Global Wind Report 2024, <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Hamdan, A., et al. Next-generation batteries and U.S. energy storage: A comprehensive review: Scrutinizing advancements in battery technology, their role in renewable energy, and grid stability, January 2024 World Journal of Advanced Research and Reviews 21(1):1984-1998

Handelsblatt, Viessmann investiert in neues Leben für E-Auto-Batterien, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/start-up-voltfang-viessmann-investiert-in-neues-leben-fuer-e-auto-batterien/29300328.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Handwerk+Bau, <https://www.handwerkundbau.at/wirtschaft/austria-email-mit-guter-performance-54013>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Hargassner Wärmepumpen, https://www.hargassner.com/de-de/waermepumpen/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwiaa2BhAiEiwAQBgYHpLJgCOGkerPJm9V6RVVa9r_YKWnZDQ0ISEqm_ED8H42jb_b8JoUrhoC9KQQAyD_BwE, abgerufen am 30. Dezember 2024

Hartl, M., Biermayr, P., Schneeberger, A., Schöffmann, P. (2016): Österreichische Technologie Roadmap für Wärmepumpen, BMVIT, <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/e2050/publikationen/biblio/oesterreichische-technologie-roadmap-fuer-waermepumpen.php>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Heliotherm Wärmepumpentechnik Ges.m.b.H, <https://www.europages.de/HELIOTHERM-WARMEPUMPENTECHNIK-GESMBH/AUT019845-00101.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

HLK (2023): Entwicklung des Wärmepumpenmarktes in Österreich, <https://hlk.co.at/heizung/halbjahresbilanz-2023-entwicklung-des-marktes-fuer-waermepumpen-in-oesterreich/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

HLK, Die Wärmepumpe: Geschichte – Technologie – Markt, <https://hlk.co.at/heizung/die-waermepumpe-geschichte-technologie-markt/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

How Much Lithium is in a Li-Ion Vehicle Battery? <https://www.linkedin.com/pulse/how-much-lithium-li-ion-vehicle-battery-paul-martin/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

lawei Wu, Mengting Zheng, Tiefeng Liu, Yao Wang, Yujing Liu, Jianwei Nai, Liang Zhang, Shanqing Zhang, Xinyong Tao, Direct recovery: A sustainable recycling technology for spent lithium-ion battery, Energy Storage Materials, Volume 54, 2023

iDM WÄRMEPUMPEN sorgen für nachhaltige Wärme, die unabhängig macht!, <https://www.idm-energie.at/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

IEA, Globaler Ausblick für kritische Mineralien, 2024

IEA, <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024/executive-summary>

IEA, National Survey Report of Photovoltaic Applications in Austria 2017

IEA, National Survey Report of Photovoltaic Applications in Austria 2017

IEEE, <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10398193>, abgerufen am 30. Dezember 2024

IG Windkraft, <https://www.igwindkraft.at/mmedia/download/2024.05.27/1716798033629463.pdf>

industriellen Wertschöpfung in Europa, <https://www.fvee.de/wp-content/uploads/2021/12/folie-2-3-chancen-industrieller-wertschoepfung.pdf>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Intelegain Team (2023): Essential ways for start-ups to survive the Death Valley curve, <https://www.intelegain.com/essential-ways-for-start-ups-to-survive-the-death-valley-curve/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Interessensgemeinschaft Windkraft, Bericht 2023/2024

Interessensgemeinschaft Windkraft, <https://www.igwindkraft.at/?>, abgerufen am 30. Dezember 2024

International Energy Agency (2020): Projected Costs of Generating Electricity <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>, abgerufen am 30. Dezember 2024

International Energy Agency (2022): Installation of about 600 million heat pumps covering 20% of buildings heating needs required by 2030, <https://www.iea.org/reports/installation-of-about-600-million-heat-pumps-covering-20-of-buildings-heating-needs-required-by-2030>, abgerufen am 30. Dezember 2024

International Energy Agency (2024): Advancing Clean Technology Manufacturing, An Energy Technology Perspectives Special Report <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7e7f4b17-1bb2-48e4-8a92-fb9355b1d1bd/CleanTechnologyManufacturingRoadmap.pdf>, abgerufen am 30. Dezember 2024

International Energy Agency Publications, 2024, Global Critical Minerals Outlook 2024

International Energy Agency, Advancing Clean Technology Manufacturing An Energy Technology Perspectives Special Report, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7e7f4b17-1bb2-48e4-8a92-fb9355b1d1bd/CleanTechnologyManufacturingRoadmap.pdf>, abgerufen am 30. Dezember 2024

International Energy Agency: Snapshot of Global PV Markets 2024, <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2024/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

IRMA Invests, <https://irma.investments/portfolio/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

ISOVOLTAIC AG, <https://www.ecotechnology.at/betriebe/isovoltic-ag/#:~:text=Die%20ISOVOLTAIC%20AG%20ist%20Weltmarkt,sind%20die%20Hersteller%20von%20Solarmodulen>, abgerufen am 30. Dezember 2024

John Deere, Electrification, <https://about.deere.com/en-us/our-company-and-purpose/technology-and-innovation/alternative-energy/electrification>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Joint study between Strategy& and PEM of RWTH Aachen University (2023): EU recycling market <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/automotive/european-battery-recycling-market-analysis/strategyand-eu-battery-recycling-market-study.pdf>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Keller, M. (2024): Seltene Erden schürfen - aus Elektroschrott, <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2024/07/seltene-erden-schuerfen-aus-elektroschrott.html>, ETH Zürich, abgerufen am 30. Dezember 2024

KIOTO Photovoltaics GmbH Company profile Product benefits, 2013

Kleine Zeitung, Preisverfall, Betrugsoffer: PV-Hersteller Energetica schlittert erneut in die Insolvenz, <https://www.kleinezeitung.at/wirtschaft/17897344/pv-hersteller-enegetica-schlittert-erneut-in-die-insolvenz>, abgerufen am 30. Dezember 2024

KNV Wärmepumpen, <https://www.knv.at/unternehmen/das-ist-knv/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Koch, N., Schwarz, M. (2024): Our Climate Policy Explorer shows which climate policies have succeeded and which have failed, <https://www.inet.ox.ac.uk/news/our-climate-policy-explorer-shows-which-climate-policies-have-succeeded-and-which-have-failed>; <https://climate-policy-explorer.shinyapps.io/climate-policies-dashboard/explorer/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Kreiselectric, <https://www.kreiselectric.com/de/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Lebreton, T. (2024): How China became a solar superpower, <https://www.theecoexperts.co.uk/solar-panels/china-solar-industry-dominance#:~:text=According%20to%20the%20International%20Energy,more%20than%20European%20countries%20combined> the ecoexperts, abgerufen am 30. Dezember 2024

Leitwind, www.leitwind.com, abgerufen am 30. Dezember 2024

Leonhartsberger, K., Savic, S. (2024): Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2023 Technologiereport Photovoltaik Batteriespeicher, Nachhaltig Wirtschaften https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw_pdf/events/20240619-energiewende-marktstatistik/schriftenreihe-2024-17f-PV-Batteriespeicher.pdf, abgerufen am 30. Dezember 2024

Lim, H.: Innovation Policy in Singapore, Singapore Institute of international affairs, https://www.eria.org/uploads/media/8.ERIA_Innovation_Policy_ASEAN_Chapter_7.pdf, abgerufen am 30. Dezember 2024

Mangelberger, <https://www.mangelberger.com/leistungen/mangelberger#circular-economy>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Baur, S.-J.; Billaud, M.; Deubzer, O.; Eberling, E.; Erdmann, L.; Haendel, M.; Krail, M.; Loibl, A.; Maisel, F.; Marwede, M.; Neef, C.; Neuwirth, M.; Rostek, L.; Rückschloss, J.; Shirinzadeh, S.; Stijepic, D.; Tercero Espinoza, L.; Tippner, M. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. – DERA Rohstoffinformationen:50: 366 S., Berlin.

McKinsey & Company, Global Materials Perspective 2024 September 2024

Microsoft-KI findet neues Material für Feststoffbatterien, <https://futurezone.at/science/microsoft-ki-feststoffbatterie-akku-microsoft-forschung-material-lithium-ionen/402736708>, abgerufen am 10. 01. 2024

MGT, <https://www.mgt-esys.at/referenzen/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Montanuniversität Leoben,
[https://pureadmintest.unileoben.ac.at/portal/de/publications/recyclingkonzepte-fur-photovoltaikmodule\(d0ad778a-4ec7-4104-9643-c5f4ce324973\).html](https://pureadmintest.unileoben.ac.at/portal/de/publications/recyclingkonzepte-fur-photovoltaikmodule(d0ad778a-4ec7-4104-9643-c5f4ce324973).html), , abgerufen am 30. Dezember 2024

Nafion™ Sulfonsäuremembranen, Membranen für verschiedenste elektrochemische Anwendungen, <https://www.nafion.de/products/sulfonic-membranes>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Nesta (2022): How to reduce the cost of heat pumps, https://media.nesta.org.uk/documents/How_to_reduce_the_cost_of_heat_pumps_v4_1.pdf, abgerufen am 30. Dezember 2024

Netzwerk Elektrolyse, <https://www.bw-elektrolyse.de/industriedialog/netzwerk-elektrolyse/> abgerufen am 30. Dezember 2024

Nordex, www.nordex-online.com, abgerufen am 30. Dezember 2024

NREL, An Updated Life Cycle Assessment of Utility-Scale Solar Photovoltaic Systems Installed in the United States, NREL Technical Report (2024)

NREL, Energy and Carbon Payback Times for Modern U.S. Utility Photovoltaic Systems, NREL Fact Sheet (2024)

NREL, Expanding the Photovoltaic Supply Chain in the United States: Opportunities and Challenges, NREL Technical Report (2019)

NREL, Floating Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2021 Installations on Artificial Water Bodies, NREL Technical Report (2021)

NREL, <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-manufacturing-basics#:~:text=The%20manufacturing%20typically%20starts%20with,interconnect%20pathway%20between%20adjacent%20cells>, abgerufen am 30. Dezember 2024

NREL, Solar Installed System Cost Analysis, <https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/solar-installed-system-cost.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

NREL, Solar Photovoltaic (PV) Manufacturing Expansions in the United States, 2017–2019: Motives, Challenges, Opportunities, and Policy Context, NREL Technical Report (2021)

NREL, Terawatt-Scale Photovoltaics: Transform Global Energy, Science (2019)

NREL, U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2023, NREL Technical Report (2023)

NREL, U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2022, NREL Technical Report (2022)

NREL, U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2021, NREL Technical Report (2021)

NREL, Utility-Scale Battery Storage https://atb.nrel.gov/electricity/2023/utility-scale_battery_storage, abgerufen am 30. Dezember 2024

Ochsner Wärmepumpen, https://www.ochsner.com/de-at/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwiaa2BhAiEiwAQBgYHgr34LarQoBXcLgaHTrx5_l4Oopnl9YqAcJMCglgYpHVotIn92oV2xoCKpEQAvD_BwE, abgerufen am 30. Dezember 2024

Ochsner, K. (2024): Künstliche Intelligenz sichert den Standort Österreich, <https://tga.at/branche/karl-ochsner-kuenstliche-intelligenz-sichert-den-standort-oesterreich/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Ochsner, K., persönliche Mitteilung

Oestrand, A. (2011): Dr. Uffe Bundgaard-Jørgensen: “Nanotechnology researchers need to approach investors to reach the market”

<https://www.youris.com/nano/markets/druffebundgaardjrgensenresearcherswithinthenanotechnologyfieldneedtoapproachinvestorstoreachthemarket.kl>, abgerufen am 30. Dezember 2024

ÖkoFen, Luft-Wasser-Wärmepumpe GreenFOX, https://www.oekofen.com/de-at/greenfox-luftwaermepumpe/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwiaa2BhAiEiwAQBgYHnGN0hnnAydAa0Kc7LH6358CT4bmTNZLdUjOlsAyG9jakby3ppWNwxoCTz0QAvD_BwE, abgerufen am 30. Dezember 2024

Orsted, Woraus Windräder bestehen, 2024

Ortner, M., Grüne Jobs durch Photovoltaik-Forschung, Wiener Zeitung, 26. 4. 2021

Österreichische Photovoltaik- Strategie, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024

Ovum Wärmepumpen, <https://www.ovum.at/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Palla, D.: (2024): Trinasolar stellt PV-Module aus recycelten Materialien her, <https://www.euwid-recycling.de/news/forschung-praxis/trinasolar-stellt-pv-module-aus-recycelten-materialien-her-300924/>, Euwid, Recycling und Entsorgung, abgerufen am 30. Dezember 2024

Photovoltaic Austria, <https://pvaustria.at/pv-profi/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Photovoltaik Austria, Die österreichische Photovoltaikindustrie in Zahlen, 2023

Pro-Kopf-Verbrauch von Aluminium in Österreich in den Jahren 2007 bis 2010 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/319946/umfrage/pro-kopf-verbrauch-von-aluminium-in-oesterreich/> abgerufen am 30. Dezember 2024

Prototyp europäischer Industriepolitik, <https://www.deutschlandfunk.de/fuenfzig-jahre-airbus-100.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

PV Installations Will Reach up to 660 GW in 2024, <https://www.bernreuter.com/newsroom/press-releases/pv-installations-will-reach-up-to-660-gw-in-2024/#:~:text=Top%20six%20solar%20module%20suppliers%20aim%20for%20a%20growth%20rate%20of%2040%25&text=Based%20on%20global%20PV%20installations,622%20GWdc%20in%202024>, abgerufen am 30. Dezember 2024

PV Magazine: Mehr als 570.000 neu installierte Photovoltaik-Speicher in 2023, <https://www.pv-magazine.de/2024/01/17/mehr-als-570-000-neu-installierte-photovoltaik-speicher-in-2023/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Reichelstein, S., Cost- and Price Dynamics of Solar PV Modules, 2015

Responsible supply chain - Environmental and social responsibility embedded in the supply chain, <https://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/responsible-supply-chain>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Rosendahlnextrom, <https://rosendahlnextrom.com/de/ueber-uns/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

S. Gnanavendan et al.: Challenges, Solutions and Future Trends in EV-Technology: A Review, IEEE Access, Volume 12, 2024

Saubermacher (2023): Saubermacher schließt mit Red-wood strategische Partnerschaft für nachhaltiges Batterierecycling, <https://saubermacher.at/presse/saubermacher-schliesst-partnerschaft-mit-redwood/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Schwarz, M. (2023): Österreichs erste öffentliche Anlage für grünen Wasserstoff nimmt Betrieb auf, H2 News, [https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/oesterreichs-erste-oeffentliche-anlage-fuer-gruenen-wasserstoff-nimmt-betrieb-auf/#:~:text=Hersteller%20des%20PEM%2DElektrolyseurs%20im,Investitionsvolumen%3A%2010%2C5%20Mio.,abgerufen am 30. Dezember 2024](https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/oesterreichs-erste-oeffentliche-anlage-fuer-gruenen-wasserstoff-nimmt-betrieb-auf/#:~:text=Hersteller%20des%20PEM%2DElektrolyseurs%20im,Investitionsvolumen%3A%2010%2C5%20Mio.,abgerufen%20am%2030.12.2024)

Seiler, E., Bilitewski, B., Woidasky, J.: Recycling von Windkraftanlagen, https://www.ict.fraunhofer.de/content/dam/ict/de/documents/medien/ue/UE_klw_Poster_Recycling_von_Windkraftanlagen.pdf, abgerufen am 30. Dezember 2024

Sica, J. (2024): Von 1500 Maßnahmen für weniger Emissionen waren nur 63 sehr erfolgreich, <https://www.derstandard.at/story/3000000233384/von-1500-massnahmen-fuer-weniger-emissionen-waren-nur-63-sehr-erfolgreich>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Siemens-Gamesa, www.siemensgamesa.com, abgerufen am 30. Dezember 2024

Siltronic <https://www.siltronic.com/de/index.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

SMATRICS, <https://smatrics.com/de>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Smit, S., et al (2022): Even amid war in Europe and the energy and cost of living crisis that has resulted, the region needs to pay attention to its slow-motion corporate and technology crisis, <https://www.mckinsey.com/capabilities/strategy-and-corporate-finance/our-insights/securing-europes-competitiveness-addressing-its-technology-gap>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Solarics, <https://www.solarics.at/collections/jolywood>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Solarpowereurope, <https://www.solarpowereurope.org/features/make-solar-eu-wacker-s-role-in-reshoring-solar-manufacturing-to-europe>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Strasser, C., Wonisch, P., Wopienka, E. (2023): Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2022, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/publikationen/schriftenreihe-2023-36-marktentwicklung-energietechnologien.php>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Systemdemonstrator "made in Baden-Württemberg", <https://www.bw-elektrolyse.de/industriedialog/systemdemonstrator0/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Technologieplattform Photovoltaik, Photovoltaikforschung Mission 2030 und Green Deals, 2024

Thomas Ritter, T.,Lund Pedersen, C. (2022): An Entrepreneur's Guide to Surviving the "Death Valley Curve", <https://hbr.org/2022/04/an-entrepreneurs-guide-to-surviving-the-death-valley-curve>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Top 2024: Hersteller von Stromspeichern und Speicherkomponenten, <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/hersteller>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Trisolar, Trinasolar produces world's first fully recycled c-Si module, <https://www.pv-tech.org/industry-updates/trinasolar-produces-worlds-first-fully-recycled-c-si-module/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

UBAm [https://www.umweltbundesamt.at/energie/erneuerbare-energie/#:~:text=Der%20gesamte%20erneuerbare%20Strom%20\(ohne,\(Quelle%3A%20Statistik%20Austria\),abgerufen am 30. Dezember 2024](https://www.umweltbundesamt.at/energie/erneuerbare-energie/#:~:text=Der%20gesamte%20erneuerbare%20Strom%20(ohne,(Quelle%3A%20Statistik%20Austria),abgerufen%20am%2030.12.2024)

Übersicht von deutschen und internationalen Wärmepumpen-Herstellern, <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/hersteller>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Umweltbundesamt, Erneuerbare Energie, <https://www.umweltbundesamt.at/energie/erneuerbare-energie>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Umweltwirtschaft.com (2024): E-Schrott-Aufkommen steigt weltweit rasant an, <https://www.umweltwirtschaft.com/news/abfallwirtschaft-und-recycling/Global-E-Waste-Monitor-2024-E-Schrott-Aufkommen-steigt-weltweit-rasant-an-30019>, abgerufen am 30. Dezember 2024

US Department of Energy, Solar Photovoltaic Manufacturing Basics, <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Varta-AG, <https://www.varta-ag.com/en/about-varta/news-press/details/varta-expands-its-research-capacities-with-new-facility-in-graz>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Vensys, www.vensys.de, abgerufen am 30. Dezember 2024

Verbrauch von raffiniertem Kupfer in Österreich von 2010 bis 2021 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1124665/umfrage/verbrauch-von-raffiniertem-kupfer-in-oesterreich/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

VERBUND als Dekarbonisierungspartner, <https://www.verbund.com/de-at/geschaeftskunden/industrie/gruener-wasserstoff/projekte?srsId=AfmBOooK0tBbuuPnZjyBWnYcGNEMHO7uXqQDY-QQIZ8UDYOi5LLKc76r>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Verivox, Verbraucher-Atlas: Weltweite Strompreise, <https://www.verivox.de/strom/verbraucheratlas/strompreise-weltweit/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Vestas, Life cycle assessments, <https://www.vestas.com/en/sustainability/environment/lifecycle-assessments>; abgerufen am 30. Dezember 2024

Vissmann Gesellschaft m.b.H., <https://www.europages.de/VIESSMANN-GESELLSCHAFT-MBH/AUT052923-490075001.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Vollebergh, H., Van der Werf, E., Vogel, J. (2023): A descriptive framework to evaluate instrument packages for the low-carbon transition, https://www.researchgate.net/publication/366699958_A_descriptive_framework_to_evaluate_instrument_packages_for_the_low-carbon_transition, abgerufen am 30. Dezember 2024

Wärmepumpe Austria, Mitgliederverzeichnis, <https://www.waermepumpe-austria.at/unser-verband/mitgliederverzeichnis>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Wärmepumpe Austria: Wärmepumpen-Rekordabsatz im ersten Quartal 2023, <https://www.waermepumpe-austria.at/presse/fachartikel/details/rekordabsatz-im-ersten-quartal-2023#:~:text=W%C3%A4rmepumpen%2DRekordabsatz%20im%20ersten%20Quartal,der%20Absatz%20bei%2014.986%20St%C3%BCck>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Wasserstoff Vorzeigeregion, <https://www.wiva.at/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

WEB Windkraft AG, <https://www.web.energy/at-de/ueber-web/kennzahlen#c3220>, abgerufen am 30. 1. 2025

Weber, L.: Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs, 1997
Karte der mineralischen Rohstoffe der Republik Österreich, 1997 Österreichisches Montan-Handbuch 2024

Wie KI Sprachbarrieren sprengt, <https://www.ki-praxisbeispiele.de/ki-gestuetzte-spracherkennung-eine-welt-ohne-sprachbarrieren/>, abgerufen am 10. 01. 2024

Windhager, Wärmepumpen aus Österreich, <https://www.windhager.com/de-at/waermepumpen-made-in-austria/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Winkler, J., 2020 Finanzierungsmechanismus für erneuerbare Energien, 2020

Wolf Klima- und Heizungstechnik GmbH Linz, <https://www.europages.de/WOLF-KLIMA-UND-HEIZTECHNIK-GMBH-LINZ/00000005343330-001.html>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Wuppermann, <https://www.wuppermann.com/standorte/wuppermann-austria-gmbh/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

Xelectric insolvent, <https://industriemagazin.at/news/pv-speicher-hersteller-xelectrix-power-ist-insolvent/>, abgerufen am 30. Dezember 2024

