



Energie-Zielszenario Tirol 2050

Aktualisierung 2024



Fördergeber	Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Wasser-, Forst- und Energierecht, Heiligeiststr. 7, 6020 Innsbruck
Projektteam	Energieagentur Tirol GmbH (EAT), Uni Innsbruck, Institut für Infrastruktur, AB Intelligente Verkehrssysteme (UIBK IV), Uni Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, AB Energieeffizientes Bauen (UIBK EEB), Management Center Innsbruck, Verfahrens- und Energietechnik (MCI)
Autor*innen	DI Rupert Ebenbichler (EAT), Robert Gleirscher, B.Sc. (EAT), Dr. Andreas Hertl, M.A. (EAT), Prof.(FH) Dr. Angela Hofmann (MCI) Nina Schaaf, M.Sc. (MCI) Prof. Dr. Wolfgang Streicher (UIBK EEB), Dott. Mag. Alice Tosatto (IBK EEB), Prof. Dr. Markus Mailer (UIBK IV), DI Dominik Neugebauer (UIBK IV)
Datum	21. Juni 2024

Zum Geleit



© Land Tirol / Die Fotografen

Im Jahr 2014, also vor zehn Jahren, hat die Tiroler Landesregierung mit „Tirol 2050 energieautonom“ ein Dach für die Tiroler Energiestrategie geschaffen und damit das Bekenntnis und die Anstrengungen zur Erreichung einer bilanziellen Energieunabhängigkeit und eines Ausstiegs aus der Nutzung fossiler Energieträger noch einmal deutlich verstärkt. In den vergangenen zehn Jahren hat sich am Energiesektor unglaublich viel getan. Die Rahmenbedingungen haben sich stark verändert, die Energiepreise vollzogen eine „Achterbahnfahrt“. Gleichgeblieben sind in diesem hochvolatilen Umfeld jedoch die energiepolitischen Ziele Tirols. Diese lauten: Energie sparen, Energieeffizienz steigern, alle verfügbaren heimischen Energieträger bestmöglich nutzen, aus Öl und Gas aussteigen und somit energieautonom werden.

Wie der Weg in die Energieautonomie aussehen kann und was wir dafür brauchen, zeigt uns das vorliegende Energie-Zielszenario. Es ist ein Kompass, den wir jedoch laufend neu justieren müssen – weil sich das wirtschaftliche Umfeld ändert, weil sich Technologien verbessern und weil neue Technologien zur Verfügung stehen, weil Tirol in das europäische Energiesystem eingebettet ist und nicht zuletzt deshalb, weil das, was man oft lapidar und ohne groß nachzudenken als „nachhaltig“ bezeichnet, gewährleisten muss, um nicht nur das Klima zu schützen, sondern auch den sozialen Frieden und die Attraktivität des Wirtschaftsstandorts zu erhalten. Nachhaltig ist nicht gleichzusetzen mit ökologisch, es geht um soziale, wirtschaftliche und ökologische Ausgewogenheit und Verträglichkeit.

Kaum jemand zweifelt an der Notwendigkeit der Energiewende. Am vehementesten eingefordert wird sie oft von denjenigen, die dann am lautesten gegen Projekte der Energiewende protestieren, gegen Großwasserkraft auftreten, Windräder an alpinen Standorten anprangern, Holz zwar toll finden, aber kein Fernheizwerk in der Umgebung haben wollen. Nur um es klarzustellen: Kein Projekt hat einen Freibrief, alle unterliegen gesetzlichen Regelungen und transparenten Verfahren. Aufgrund unseres Rechtssystems kommt es dabei vielfach auch zu erheblichen zeitlichen Umsetzungsverzögerungen.



Die größte Sympathie unter den Erneuerbaren genießt derzeit wohl die Sonnenenergie vom Dach. Wer allerdings glaubt, die Sonne schickt keine Rechnung, der irrt. Die Nutzung von Sonnen- und Windenergie erfordert einen massiven Ausbau der Stromleitungen. Es braucht auch viel mehr an Speichermöglichkeiten. Wenn am Wochenende zur Mittagszeit alle PV-Anlagen Strom produzieren und zusätzlich auch noch der Wind bläst, aber niemand diesen Strom abnimmt, muss die erzeugte Energie irgendwohin – und zwar in einen Speicher. Wenn im Winter Dunkelflaute herrscht und viel Energie benötigt wird, muss die Energie irgendwoher kommen – und zwar aus dem Speicher. Der Ausbau der erneuerbaren Energieträger, der Ausbau an Speicherkapazitäten und der Netzausbau müssen daher im Gleichklang erfolgen – und zwar nicht nur in Tirol, sondern in ganz Europa. Denn das oberste Ziel ist die Versorgungs- und Systemsicherheit. Diese gibt es nicht zum Nulltarif. Und nicht allen ist bewusst, dass nicht der Staat, das Land, die Wirtschaft oder die Energieversorger die Energiewende bezahlen, sondern schlussendlich immer wir alle als Steuerzahlerinnen und Steuerzahler.

Soll und wird uns das alles davon abhalten, den Weg in eine erneuerbare Energiezukunft Schritt für Schritt weiterzugehen? Keineswegs! Wir werden dem Pfad, wie er in diesem aktualisierten Zielszenario beschrieben ist, konsequent weiter folgen. Wir werden große Fortschritte, Kurskorrekturen und manchmal sogar einen Schritt zur Seite machen müssen, um Wirtschaft, Umwelt und Soziales im Lot zu halten. Vor allem aber strengen wir uns an, die Energieeffizienz zu verbessern und alle verfügbaren heimischen Energieträger bestmöglich und zum Wohle des Gesamtsystems einzusetzen, damit wir unser Ziel der Energieautonomie im Jahr 2050 erreichen.

LHStv Josef Geisler

Energierreferent

Inhaltsverzeichnis

Zum Geleit	2
1. Abstract	6
2. Kernaussagen	7
2.1. Übergeordnete Aussagen zur Erlangung der Energieziele 2050	7
2.2. Übergeordnete Aussagen zur Speicherung	8
2.3. Sektor Sonstige / Gebäude	8
2.4. Sektor Produktion	9
2.5. Sektor Mobilität	10
2.6. Energiepotenzial und eingesetzte Energiemengen	11
3. Veranlassung und Zielsetzung	12
Veranlassung	12
Zielsetzung	12
4. Projektkonsortium und Stakeholder-Beteiligung	13
4.1. Projektkonsortium	13
4.2. Advisory Board-Sitzungen	13
5. Projektmeilensteine	14
6. Begriffsbestimmungen und Methodik	15
6.1. Systemverständnis und Systemgrenze	15
6.2. Energiestufen	16
6.3. Energiepotenziale	17
7. Grundlagen	19
7.1. EU-, Bundes- und Landesziele	19
7.2. Sonstige gesetzliche und in Abstimmung befindliche Vorgaben	20
7.3. Übergeordnete Datengrundlagen	20
7.4. Sektor Mobilität	20
7.5. Sektor Produktion	21
7.6. Sektor Gebäude	21
7.7. Energieressourcen	22
7.8. Wirkungsgrade von Erzeugungsanlagen	22
7.9. Leitungs- und Verteilverluste	28

8. Energie-Potenziale 2021 und 2050	29
8.1. Wasserkraft	29
8.2. Wind.....	30
8.3. Sonne	31
8.4. Biomasse.....	33
8.5. Umweltwärme (Grundwasser, Erde, Luft).....	35
8.6. Tiefengeothermie	36
8.7. Industrielle Abwärme	37
8.8. Brennbare Abfälle	37
8.9. Zusammenfassung Energie-Potenziale	39
9. Energiebedarf	40
9.1. Sektor Gebäude.....	40
9.2. Sektor Produktion	50
9.3. Sektor Mobilität	59
10. Energiebedarfsdeckung	73
10.1. Nutzenergiebedarf 2021 bis 2050.....	73
10.2. Endenergiebedarf 2021 bis 2050.....	75
10.3. Eingesetzte Energiemengen 2021 bis 2050	79
10.4. Vereinfachtes Energie-Flussbild 2050.....	81
11. Diskussion der Ergebnisse unter Einbeziehung der Studie „Energiespeicher Tirol 2050“	82
12. Möglicher Anlagenbestand 2050	83
13. Flussbild Szenario 2050	90
14. Abkürzungsverzeichnis	92
15. Abbildungsverzeichnis	93
16. Tabellenverzeichnis	94
17. Literaturverzeichnis	95
18. Anhang	98
18.1. Mobilität	98

1. Abstract

Gemäß Regierungsbeschluss aus dem Jahr 2014 soll Tirol jahresbilanziell energieautonom werden. Das Land Tirol verfolgt daher das Ziel, bis zum Jahr 2050 den Energiebedarf des Landes im Jahressaldo vollständig über erneuerbare Energieträger zu decken und weitestgehend auf heimische Energieträger zurückzugreifen. Die 2021 veröffentlichte Studie „Energie-Ziel-Szenario Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2021) zeigte, dass dieses Ziel mit den heute bereits verfügbaren Technologien und den in Tirol vorhandenen Energieressourcen erreicht werden kann.

Die Notwendigkeit für eine aktualisierte Studie ergibt sich aus technischen Weiterentwicklungen und den dynamischen Entwicklungen im Energiesektor. Unter Berücksichtigung tatsächlicher Energieeinsätze des Jahres 2021, teilweise geänderter bzw. aktualisierter Rahmenbedingungen sowie der Berücksichtigung eines grob angenommenen Strommehrbedarfs für Energiespeicher und Umwandlungsverluste auf Basis der Studie „Energiespeicher Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2023) wird in der vorliegenden Studie ein möglicher Zielpfad zur Erreichung der Energieautonomie Tirol 2050 dargestellt.

Im Ergebnis zeigt sich, dass nach wie vor die Erreichung der Tiroler Energieziele unter Rückgriff auf heute verfügbare Technologien sowie die vorhandenen Energieressourcen auch unter Berücksichtigung eines gewissen Energie-Mehrbedarfs aufgrund der bis 2050 ausgebildeten Speicherinfrastruktur in Tirol darstellbar ist.

Da sich gegenüber der Vorgängerstudie des Jahres 2021 gezeigt hat, dass die bisher angesetzten Effizienzsteigerungen im Gebäudebereich realistisch nicht erreicht werden können, wird nun für das Jahr 2050 ein gesteigerter Endenergiebedarf im Sektor Sonstige/Gebäude erwartet. Aufgrund technischer Entwicklungen im Produktionsbereich sowie einer Verschiebung der Antriebstechnologie im Mobilitätsbereich hin zu verstärktem Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge wird in diesen Sektoren mit einem sinkenden Endenergieeinsatz gegenüber den Ergebnissen der Vorgängerstudie gerechnet. In Summe ergibt sich damit eine Einsparung von minus 30% im Endenergiebedarf gegenüber dem Basisjahr 2021.

Insgesamt wird nun für 2050 ein Endenergieeinsatz in Höhe von 16.880 GWh erwartet – 11 % mehr als in der Vorgängerstudie.

Aufgrund der nun grob berücksichtigten Auswirkungen der hinterlegten Speicherinfrastruktur in Tirol wird mit 22.161 GWh/a ein gegenüber der Vorgängerstudie um 7 % erhöhter Primärenergieeinsatz von 22.161 GWh im Jahr 2050 erwartet.

Sämtliche verfügbare Energieträger haben hierfür ihren Beitrag zu leisten, wobei im Rahmen der Studie keine Ressource „bis an ihr Limit“ ausgeschöpft wird. Die verfügbaren Potenziale wurden evaluiert und v.a. im Bereich Biogas und Wind angepasst.

Gegenständliche Studie zeigt, dass zur Erlangung der Ziele notwendige, zielgerichtete Maßnahmen umgehend und äußerst ambitioniert angegangen werden müssen.

2. Kernaussagen

Die Kernaussagen der Aktualisierung der Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050 werden nachfolgend thematisch geordnet angeführt – Details finden sich in den nachfolgenden Kapiteln.

2.1. Übergeordnete Aussagen zur Erlangung der Energieziele 2050

- > Mit den angeführten Energieträgern sowie Erzeugungs- und Umwandlungstechnologien ist die **Erreichung** des Ziels **Energieautonomie Tirol 2050** unter Berücksichtigung der angeführten Annahmen **weiterhin möglich**, sofern die erzeugte Energie effizient abtransportiert, gespeichert und genutzt wird. Vorausgesetzt wird außerdem, dass vorgelagerte sowie internationale Netzebenen zur Umlagerung der Energieflüsse genutzt werden können.
- > Aufgrund der fortgeschrittenen Zeit seit der Veröffentlichung der Vorgängerstudie (EBENBICHLER et al. 2021) sowie der Berücksichtigung der tatsächlichen Endenergieeinsätze des Jahres 2021 (nahezu unverändert gegenüber 2016) erscheint die Erlangung der Energieautonomie bis zum Jahr 2050 nochmals **wesentlich ambitionierter**.
- > Die gegenüber der Vorgängerstudie (EBENBICHLER et al. 2021) nun verkürzt zur Verfügung stehende Umsetzungszeit bei gleichzeitig erkanntem geringeren Einsparungspotenzial v.a. im Gebäudebereich impliziert einen nun **höheren Endenergie- und Primärenergieeinsatz im Jahr 2050** gegenüber den bisherigen Annahmen.
- > Der **Endenergieeinsatz** im Jahr 2050 beträgt 16.880 GWh und liegt um rund **30 % unter dem Wert des Jahres 2021**. Gegenüber der Vorgängerstudie (EBENBICHLER et al. 2021) ist der abgeschätzte Endenergiebedarf des Jahres 2050 um rund 11% gestiegen. Dies ist hauptsächlich auf eine Evaluierung der energetischen Auswirkungen von geringeren Sanierungstiefen im Gebäudebereich zurückzuführen als ursprünglich im Jahr 2021 angenommenen.
- > Aufgrund der Berücksichtigung grob angenommener Energiemehrbedarfe infolge einer Speicherinfrastruktur gemäß „Energiespeicher Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2023) hat sich der Wert der **einzusetzenden Energie** im Jahr 2050 gegenüber der Vorgängerstudie (EBENBICHLER et al. 2021) um 7,4% bzw. 1.529 GWh/a auf **22.161 GWh/a** erhöht. Dabei wurde von einer weiterhin existenten intensiven Einbindung des Tiroler in das europäische Energiesystem mit Im- und Exportmöglichkeiten über die Landesgrenzen hinweg ausgegangen.
- > Im Sinne einer technologieoffenen Herangehensweise an die Aufgaben zur Erreichung der Energieautonomie durch Nutzung der realistisch verfügbaren heimischen Ressourcen wurde neu die Errichtung und der Betrieb einer Anlage zur Inwertsetzung der **heimischen brennbaren Abfälle** in der zukünftigen Energiebedarfsdeckung berücksichtigt.
- > Die Deckung des notwendigen **Strombedarfs** in einem energieautonomen Tirol im Jahr 2050 erfolgt zu rund **66%** über **Wasserkraft**, zu rund **31%** über **PV-Anlagen** und zu rund 3% über sonstige Stromerzeugungsanlagen.

2.2. Übergeordnete Aussagen zur Speicherung

- > Energiespeicher ermöglichen eine **flexible Anpassung von Angebot und Bedarf** über unterschiedliche Zeitspannen, wodurch sie den **zeitlichen Versatz** zwischen Energiebedarf und -erzeugung **ausgleichen** können. Besonders im Kontext der elektrischen Energiegewinnung aus volatilen Energieressourcen werden Speichertechnologien in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Im Rahmen der Studie „Energiespeicher Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2023) wurden Ergebnisse einer diesbezüglichen tirolspezifischen Analyse ausgearbeitet, deren Kernaussagen in der vorliegenden Studie berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Speicher-Studie stellen reine **Modellergebnisse** dar und erheben keinen Wahrheitsanspruch. Sie geben lediglich eine grobe Richtung vor, welche Schritte beim Umbau des Energiesystems Tirol in den nächsten Jahren wesentlich erscheinen.
- > Der in der gegenständlichen Studie berücksichtigte **Mehrbedarf an elektrischer Energie** für den Betrieb von Batteriespeichern, Pumpspeicherkraftwerken und Power-to-Gas-Anlagen beträgt in Summe rund **2.194 GWh/a** wird und modellhaft mittels Photovoltaik-Aufdach-Anlagen abgedeckt.
- > Die im Flussbild (Kap. 13) abgebildete **Rückverstromung** von zuvor mittels erneuerbarem Strom erzeugten Methans erfolgt **ausschließlich in „Notfall“-Zeiten** sowie zeitweise bei Bedarf **im Winterhalbjahr**.
- > **Speicher für Industriegase** werden in diesem Szenario nur am Rande berücksichtigt, da die Produktion möglichst **on demand** erfolgen soll. Bei der Umstellung auf erneuerbare Energien führen die Speicher zu einer deutlichen Erhöhung des Energiebedarfs.
- > Für die Speicherung von Gasen – sowohl für die Industrie als auch für die übergeordnete Energiespeicherung – ist zusätzlich der **Ausbau von Leitungen** sowie einer **übergeordneten SynGas- bzw. Wasserstoff-Infrastruktur** erforderlich.

2.3. Sektor Sonstige / Gebäude

- > **Endenergiebedarf 2050:** **9.108 GWh**
Änderung des Endenergiebedarfs gegenüber 2021: **-18,3 %** **-2.043 GWh**
Anteil des Sektors am Gesamt-Endenergiebedarf: **54,0 %**
- > Der **Endenergiebedarf** kann auf Basis von Auswertungen von Energieausweisen mit heutigen Sanierungstiefen und Sanierungsraten bei hohem Mitteleinsatz sowie Effizienzsteigerungen im Haushaltsstrombereich bis 2050 um rund 20 % gesenkt werden.
 Würde der Heizenergiebedarf nach Sanierung gegenüber den derzeit erreichten Ergebnissen etwa halbiert, so würde sich eine Reduktion des Endenergiebedarfs um ca. 32 % ergeben.
- > Die Ergebnisse zeigen, dass die **Umstellung der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssysteme** zwar ein grundlegender Schritt ist, um den Ausstieg aus fossilen Systemen zu erreichen, dass diese Maßnahme aber durch eine Reduktion des Endenergiebedarfs unterstützt werden muss.

- > Die **Erhöhung des Strombedarfs** für die Umstellung auf **elektrisch betriebene Wärmepumpen** kann in der Jahresbilanz durch die angenommene **Effizienzsteigerung im Haushaltsstrombereich abgedeckt** werden. Allerdings ist der Strombedarf im Winter höher und im Sommer niedriger.

2.4. Sektor Produktion

- > **Endenergiebedarf 2050:** **4.779 GWh**
Änderung des Endenergiebedarfs gegenüber 2021: **-6 %** **-293 GWh**
Anteil des Sektors am Gesamt-Endenergiebedarf: **28,3 %**
- > Der **Endenergiebedarf** für den Sektor Produktion wird im Jahr 2050 bei 4.778 GWh liegen –rund 6 % unter dem Wert des Jahres 2021 (5.072 GWh).
- > Eine wesentliche Verringerung des Endenergiebedarfs kann nur durch **Technologiesprünge** erreicht werden. Da die gesamte Produktionsbranche einem gewissen Druck zur Senkung des Energiebedarfs bzw. des CO₂-Ausstoßes unterliegt, ist in den kommenden Jahren mit derartigen Technologiesprüngen zu rechnen. Diese können aber zum jetzigen Zeitpunkt nicht zuverlässig prognostiziert werden. Da die meisten berücksichtigten **Technologien bereits heute verfügbar** und sehr ausgereift sind, ist ein sofortiger Beginn der Umstellung der eingesetzten Technologien möglich und notwendig, wobei der Umbau des Energiesystems marktwirtschaftlich verträglich zu gestalten ist.
- > Infolge erheblicher **Einsparungen durch Effizienzmaßnahmen** kommt es bei einem angenommenen Wirtschaftswachstum sowie angenommener maximal erreichbarer Systemwirkungsgrade zu einem **leichten Abfall des Endenergiebedarfs** bis 2050.
- > Die gegenständliche Studie geht davon aus, dass notwendige **Umstellungen ab sofort beginnen**.
- > Die Anzahl energieintensiver Betriebe wird sich voraussichtlich nicht wesentlich ändern. Die wirtschaftliche Entwicklungsprognose geht von einer nominalen **Steigerung von 1,5 % pro Jahr** aus. Da die Tiroler Industrielandschaft nur sehr wenige energieintensive Prozesse aufweist, wird weiterhin von einer **jährlichen Steigerung des Nutzenergiebedarfs von 0,8%** ausgegangen.
- > Die Umsetzung erfordert einen **erheblichen Ausbau** der Produktionskapazität von **synthetischem Methan, Wasserstoff und Biokohle**.
- > Bei der Substitution fossiler Energieträger wird im Sektor Produktion **elektrische Energie** der **wichtigste Energieträger** sein. Bereits jetzt könnte die überwiegende Mehrzahl der industriellen Prozesse mit Strom betrieben werden. Oft ist die Entscheidung, Erdgas als Energieträger zu verwenden, eine rein ökonomische Entscheidung.
- > Einige wenige Prozesse, die zwingend einen stofflichen Energieträger benötigen (z.B. weil eine Flamme benötigt wird oder der Wärmeeintrag langsam über einen festen Energieträger erfolgen muss), müssen auch in Zukunft mit einer gasförmigen oder festen hochkalorischen Energiequelle versorgt werden. Hierfür

können **Wasserstoff oder synthetisches Erdgas** als Substitutionsgas und **modifizierte Biokohle** als fester Energieträger dienen. Bei allen stofflichen Energieträgern ist zu bedenken, dass für deren Herstellung hohe Energiemengen benötigt werden. Deren Einsatz ist daher auf technologisch notwendige Bereiche einzuschränken.

- > Größter Hemmfaktor für die Umstellung der Technologien ist nach Ansicht vieler Tiroler Unternehmer derzeit der große Unterschied zwischen den Strompreisen und den im Vergleich **günstigen fossilen Brennstoffen**.
- > Um einen Verzicht auf fossile Energien in der Industrie zu erreichen, werden im Szenario **ambitionierte Raten zur Substitution** fossiler Energien angesetzt.

2.5. Sektor Mobilität

- > **Endenergiebedarf 2050:** **2.994 GWh**
Änderung des Endenergiebedarfs gegenüber 2021: **-62,3 %** **-4.938 GWh**
Anteil des Sektors am Gesamt-Endenergiebedarf: **17,7 %**
- > Es wird von einer **weitestgehenden Elektrifizierung** des Mobilitätsbereichs ausgegangen, in dem Pkw gänzlich elektrisch betrieben werden und die Fahrleistungen des Schwerverkehrs (Lkw und Busse) zu etwa 70% elektrisch sowie zu 30% mittels Brennstoffzelle (Wasserstoff) erbracht werden.
- > Im zeitlichen Verlauf wird die forcierte Etablierung der **Elektrofahrzeugtechnik auf dem Pkw-Markt** durch die Preisparität zwischen batterieelektrischen und mit Verbrennungsmotoren betriebenen Fahrzeugen hinsichtlich des Anschaffungspreises angenommen, die für die kommenden Jahre vorausgesagt wird. Ferner wird angenommen, dass elektrische Schwerverkehrsfahrzeuge mit **Batterie und Brennstoffzelle** erst **ab dem Jahr 2025** über Pilotprojekte hinausgehend Verbreitung finden werden.
- > Der **Flugverkehr** wird gemäß den EU-Richtlinien auf nachhaltige Flugtreibstoffe (SAF) umgestellt.
- > Die **Eisenbahn** ist bereits jetzt – mit Ausnahme der Zillertalbahn und der Achenseebahn (künftige jeweils Umstellung auf erneuerbare Energien) – elektrifiziert.
- > Die voraussichtliche **Inbetriebnahme des Brenner-Basis-Tunnels** im Jahr 2032 erhöht die Gütertransportkapazität auf der Schiene entlang der Brenner-Achse wesentlich. Um die **Kapazität von BBT und Bestandstrecke am Brenner für die angestrebte Verkehrsverlagerung vollständig zu nutzen, sind starke begleitende Maßnahmen nötig**. Dann erscheint es auch möglich, eine **Verringerung des Lkw-Verkehrs auf maximal 1 Mio.** Brenner-Querungen jährlich zu erreichen, da diese Maßnahmen auch eine Reduktion des Umwegtransits zur Folge haben.
- > Wegen der langen Zeiträume, die für eine vollständige Flottenveränderung notwendig sind, ist es notwendig, Maßnahmen zur Förderung der Technologieänderung im Mobilitätssektor rasch und entschlossen umzusetzen.

Um zusätzlich zu den technologiebedingten Einsparungen den Energiebedarf im Mobilitätssektor weiter zu verringern, ist ein **weiterer Ausbau des Öffentlichen Verkehrs**, sowie die Förderung des **Fußgänger- und Fahrradverkehrs** durch eine weitere Verbesserung von Angebot, Infrastrukturen und Rahmenbedingungen (inkl. Raumplanung) erforderlich.

2.6. Energiepotenzial und eingesetzte Energiemengen

- > Gegenüber der Vorgängerstudie (Ebenbichler et al. 2021) wurden sämtliche ausgewiesenen Energiepotenziale evaluiert und gegebenenfalls angepasst.
- > Das gegenüber Ebenbichler et al. (2021) erhöhte Photovoltaik-Potenzial basiert auf verbesserten Wirkungsgraden der Technologie und bedeutet keinen erhöhten Flächenbedarf gegenüber der Vorgängerstudie.
- > Um das **Photovoltaik-Ausbauziel 2050** zu erreichen, sind in den verbleibenden 26 Jahren Anlagen mit einer Leistung von **rund 4.050 MW_p auf Tirols Dächern** zu errichten. Zusätzlich sind **Freiflächenanlagen** – vorrangig auf bereits befestigten Flächen, wie beispielsweise Parkplätzen – mit einer Leistung von insgesamt **rund 172 MW_p** erforderlich, die in etwa einem Gesamt-Flächenbedarf von rund 1,3 Fußballfeldern bzw. einem Modul-Flächenbedarf von 0,6 Fußballfeldern je Gemeinde entsprechen.
- > Das **technisch-wirtschaftliche Windpotenzial** wurde in Anlehnung an e3 CONSULT (2023) mit 800 bis 1.200 GWh/a beziffert. Das **tatsächlich realisierbare Potenzial** wird im Rahmen der vorliegenden Studie mit rund 400 GWh/a (z.B. durch 45 Windräder à 4 MW) bis 2050 angenommen. Die Stromerzeugung entspräche der Erzeugung aus Photovoltaikanlagen mit einer Fläche von rund 280 Fußballfeldern.
- > Das **Biogaspotenzial** wurde in Abstimmung mit dem Abfallreferat (Land Tirol) und dem Arbeitsbereich für Umwelttechnik der Universität Innsbruck auf 465 GWh/a beziffert, die angesetzte Nutzung in 2050 jedoch mit rund 280 GWh/a in etwa gleich belassen.
- > Hinsichtlich des ausgewiesenen Potenzials aus **brennbaren Abfällen** wurden keine signifikanten Adaptionen durchgeführt. Wurde in der Vorgängerstudie noch von einem Export der Abfälle auch im Jahr 2050 ausgegangen, berücksichtigt die Aktualisierung der Studie die Möglichkeit, den Energieinhalt von brennbaren Abfällen im eigenen Land zu nutzen.
- > Die Nutzung der **Umweltwärme** mittels Wärmepumpentechnologien gewinnt in Zukunft stark an Bedeutung. Im Vergleich zur Vorgängerstudie steigt die einzusetzende Energiemenge um 16% auf rund 2.900 GWh/a an.
- > Das heimische energetische **Nutzholzpotezial** wurde neu bewertet und liegt um 15 % höher als in der Vorgängerstudie.
- > Die Zielsetzung gemäß der Wasserkraftausbaudeklaration 2011 sieht einen Ausbau der **Wasserkraft** von 2.800 GWh/a im Saldo bis zum Jahr 2036 vor. Aufgrund der zu berücksichtigenden Dauer von Genehmigungsverfahren wird der Endausbau jedoch auf 2050 verlagert.

3. Veranlassung und Zielsetzung

Veranlassung

Im Einklang mit internationalen und nationalen Vorgaben hat sich das Land Tirol zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 energieautonom zu werden. Ein wichtiger Eckpfeiler dieser Strategie ist, die im Land benötigte Energie im Jahressaldo durch heimische Energieträger selbst zu decken.

Die Studie „Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050 und 2040“ (EBENBICHLER et al. 2021) zeigt unter anderem, wie im Jahr 2050 die Energieautonomie erreicht werden kann unter Berücksichtigung vordefinierter Rahmenbedingungen, dem möglichen Einsatz heimischer Ressourcen und dem Rückgriff auf derzeitig vorhandene und zukünftig zu erwartenden Technologien.

Laufende Veränderungen beim Energiebedarf in den unterschiedlichen Bereichen sowie bei der Energieerzeugung sollen in regelmäßigen Abständen bilanziert werden und in einem aktualisierten Bericht aufbereitet werden. Die vorliegende Studie umfasst die aktuelle Datenlage der Energieerzeugung und des Energiebedarfs.

Zielsetzung

Die vorliegende Studie ist eine Aktualisierung der im Jahr 2021 erschienenen Studie und untersucht auf Basis aktueller Datengrundlagen sowie rechtlicher Rahmenbedingungen, wie im Jahr 2050 die Energieautonomie erreicht werden kann. Um das Ziel der Energieautonomie zu erfüllen, wird in diesem Bericht ein Weg dargestellt, der innerhalb des verbleibenden Zeithorizonts eine mögliche Entwicklung skizziert.

4. Projektkonsortium und Stakeholder-Beteiligung

4.1. Projektkonsortium

- **Energieagentur Tirol GmbH, 6020 Innsbruck**
DI Rupert Ebenbichler
Robert Gleirscher, B.Sc.
Dr. Andreas Hertl, M.A.
- **Management Center Innsbruck, Internationale Bildung und Wissenschaft GmbH, 6020 Innsbruck**
Prof. (FH) Dr. Angela Hofmann
Nina Schaaf, M.Sc.
- **Universität Innsbruck, AB Energieeffizientes Bauen, 6020 Innsbruck**
Prof. Dr. Wolfgang Streicher
Dott. Mag. Alice Tosatto
- **Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, AB Intelligente Verkehrssysteme, 6020 Innsbruck**
Prof. Dr. Markus Mailer
DI Dominik Neugebauer

4.2. Advisory Board-Sitzungen

An der am 14. Juni 2023 stattgefundenen Advisory Board-Sitzung nahmen folgende Stakeholder teil:

- **Amt der Tiroler Landesregierung**
Mag. Jakob Egg, MAS, Abt. Landesentwicklung
Mag. Andrä Fankhauser, Büro LH-Stv. ÖR Josef Geisler
Dr. Wolfgang Nairz, Abt. Wasser-, Forst- und Energierecht
Dr. Leo Satzinger, Gruppe Umwelt, Raumordnung und Verkehr
- **Arbeiterkammer Tirol**
Mag. Roland Rödlach
- **Wirtschaftskammer Tirol**
Mag. Stefan Garbislander
Oliver Katzian, BA, MSc

An der am 12. Juni 2024 stattgefundenen Advisory Board-Sitzung nahmen folgende Stakeholder teil:

- **Amt der Tiroler Landesregierung**
Mag. Martin Gassner, Abt. Verkehrsplanung
Dr. Wolfgang Nairz, Abt. Wasser-, Forst- und Energierecht
Daniel Payer, Abt. Wohnbauförderung
Dr. Leo Satzinger, Gruppe Umwelt, Raumordnung und Verkehr
DI Christian Stampfer, Abt. Landesentwicklung

- **Arbeiterkammer Tirol**
Mag. Roland Rödlach
- **Wirtschaftskammer Tirol**
Mag. Stefan Garbislander
Oliver Katzian, BA, MSc
- **Landwirtschaftskammer Tirol**
Mag. Peter Schießling

5. Projektmeilensteine

- 27.02.2023 Projektstart
- 31.05.2023 Abstimmung zu berücksichtigender Rahmenbedingungen
- 14.06.2023 1. Advisory-Board-Sitzung
- 16.06.2023 Abstimmung Verständnis Energieneutralität 2040
- 28.06.2023 Abstimmung Biomasse Holz
- 03.07.2023 Stakeholder-Workshop Gebäude I
- 05.07.2023 Abstimmung Erdgasversorgung
- 19.07.2023 Stakeholder-Workshop Gebäude II
- 27.07.2023 Stakeholder-Workshop energetische Holzflüsse
- 02.10.2023 Stakeholder-Workshop Mobilität
- 19.04.2024 Abgabe Berichtsentwurf
- 12.06.2024 2. Advisory Board-Sitzung

6. Begriffsbestimmungen und Methodik

Dieses Kapitel enthält Informationen zur Systemgrenze bezogen auf die Tiroler Energiebilanz und Begriffsbestimmungen hinsichtlich unterschiedlicher Energiestufen sowie Energiepotenziale die in der vorliegenden Studie berücksichtigt werden.

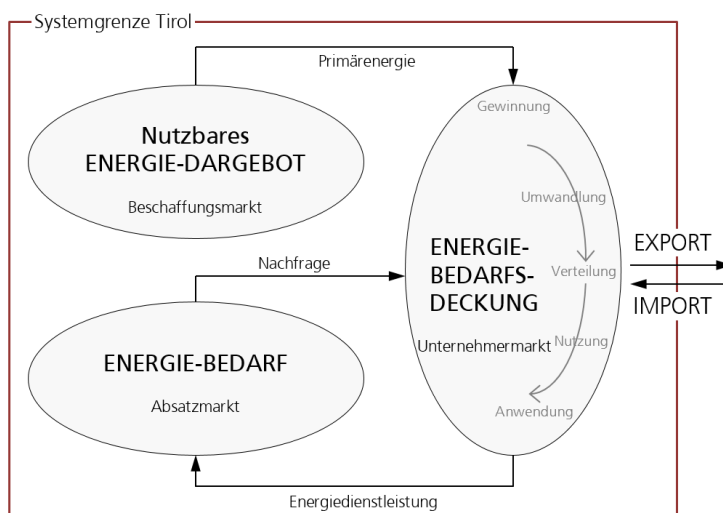
6.1. Systemverständnis und Systemgrenze

Die der gegenständlichen Studie zugrundeliegende quantitative und energieträgerbasierte Analyse der Energieflüsse sowie deren definitionsreine begriffliche Zuordnung ermöglichen eine transparente Darstellung von Zusammenhängen und Prozessabläufen im Tiroler Energiesystem. Der gewählte Systemansatz nach OBLASSER et al. (1993) und FLEISCHHACKER (1994) bildet das Energiesystem ganzheitlich und wirklichkeitsnah mit den Bestandteilen

- nutzbares Energie-Dargebot (entspricht dem Beschaffungsmarkt),
- Energie-Bedarf (entspricht dem Absatzmarkt) und
- Energie-Bedarfsdeckung (entspricht dem Unternehmermarkt)

ab, welche über Informations-, Material- und Werteflüsse verbunden und zueinander in Beziehung stehen. Einflüsse im Bereich Unternehmermarkt (bspw. Änderungen in Produktionsmethoden), Beschaffungsmarkt (bspw. Erschließung neuer Ressourcen oder Verknappung von Ressourcen) sowie Absatzmarkt (bspw. Änderungen in der Nachfragestärke oder Nachfragequalität) setzen Aktionen und Handlungen über Informations-, Material- und Werteflüsse in Gang, die im Hinblick auf die beabsichtigte Zielerreichung „Energieautonomie Tirol 2050“ ausgewertet werden können.

Als **Systemgrenze** wurde die Landesgrenze Tirols definiert. Die außerhalb Tirols gelegenen nutzbaren Energieressourcen, -bedarfe sowie die Bedarfsdeckung sind über **Import- und Exportmöglichkeiten** mit der Bedarfsdeckung Tirols verbunden – beispielsweise seien diesbezüglich der Zukauf von Biofuels oder auch die Importe und Exporte von Strom zur Sicherstellung der Tiroler Landesversorgung angeführt. „Graue Energie“ bzw. CO₂-Emissionen, die bei Produktion und Transport außerhalb der Systemgrenzen anfallen, finden in gegenständlicher Studie keine Berücksichtigung. Im Bereich der Mobilität sind der Ort des Energiebezugs



Quelle: OBLASSER et al. (1993), FLEISCHHACKER (1994), vereinfacht

Abb. 1 Systemverständnis

(z.B. des Tankens) und der Ort des Energiebedarfs nicht identisch. Im Sinne der bisherigen Energiebilanzierung (Statistik Austria, Energiemonitoring des Landes Tirol) wird jene Energie berücksichtigt, die in Tirol bezogen (getankt) wird.

Diese von einer verkehrsplanerischen Betrachtungsweise abweichende Bilanzierung der Energiestatistik wirkt sich im grenzüberschreitenden Verkehr deutlich aus. Damit sind z.B. auch jene Treibstoffe einbezogen, die Tirol getankt – aber nicht verfahren – werden („Tanktourismus“), aber z.B. nur zum kleinen Teil die Energie, die mit der An- und Abreise im Tourismus in Verbindung steht.

6.2. Energiestufen

6.2.1. Primärenergie

Primärenergie bezeichnet den Energiegehalt von Primärenergieträgern oder primären Energieströmen, die noch nicht einer technischen Umwandlung unterzogen wurden. Primärenergie kann direkt aus Quellen wie Windkraft oder Solarstrahlung stammen oder aus Primärenergieträgern wie Steinkohle, Braunkohle, Erdöl oder Biomasse gewonnen werden. Durch eine oder mehrere Umwandlungen können aus Primärenergie Sekundärenergie oder -träger gewonnen werden.

6.2.2. Sekundärenergie

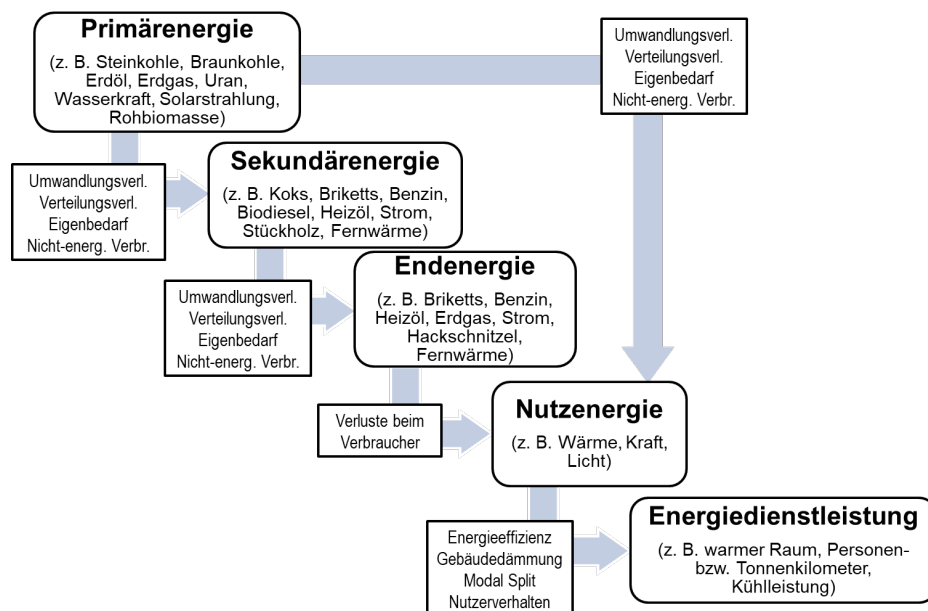
Sekundärenergie bezeichnet den Energiegehalt von Sekundärenergieträgern oder Energieströmen, die entweder direkt oder durch eine oder mehrere Umwandlungen in technischen Anlagen aus Primärenergie oder anderen Sekundärenergieträgern bzw. -energien hergestellt werden, wie zum Beispiel Fernwärme, Benzin, Heizöl und elektrische Energie. Bei diesen Prozessen treten Umwandlungs- und Verteilungsverluste auf. Sekundärenergieträger bzw. Sekundärenergie stehen Verbrauchern zur Verfügung, um sie in andere Sekundär- oder Endenergieträger bzw. -energien umzuwandeln.

6.2.3. Endenergie

Endenergie entspricht dem Energiegehalt von Endenergieträgern oder den entsprechenden Energieströmen, die vom Endverbraucher bezogen werden, wie beispielsweise Holzhackschnitzel vor der Feuerungsanlage oder Fernwärme an der Hausübergabestation. Sie entsteht aus Sekundär- oder gegebenenfalls Primärenergieträgern (bzw. Primärenergien), wobei Umwandlungs- und Verteilungsverluste, Eigenbedarf und nicht-energetischer Bedarf berücksichtigt werden. Endenergie steht zur Umwandlung in Nutzenergie zur Verfügung.

6.2.4. Nutzenergie

Nutzenergie bezeichnet die Energie, die nach der letzten Umwandlung in den Nutzgeräten des Verbrauchers für die Erfüllung spezifischer Bedürfnisse wie Raumtemperierung, Nahrungszubereitung, Informationszugang, Transport und Beleuchtung zur Verfügung steht. Sie wird aus Endenergieträgern oder der Endenergie gewonnen, wobei die Verluste dieser letzten Umwandlung berücksichtigt werden, zum Beispiel die Wärmeabgabe einer Glühlampe für die Lichterzeugung oder Verluste in einer Hackschnitzelfeuerung bei der Wärmebereitstellung. Um den Einsatz einzelner Energieträger für bestimmte Energiedienstleistungen zu verdeutlichen, werden die entsprechenden Energieträger abzüglich der Verluste auf der Nutzenergieebene dargestellt.



Quelle: KALTSCHMITT, STREICHER, WIESE (2020), ergänzt.
Abb. 2: Energiewandlungskette und Begriffe.

6.2.5. Energiedienstleistung

Unter Energiedienstleistung wird der eigentliche Nutzen der Energie verstanden. Bezogen auf Gebäude bezeichnet man damit z.B. den behaglich konditionierten Raum. Zwischen Nutzenergie und Energiedienstleistung liegt das ganze Feld der Effizienz. So braucht ein gut gedämmter Raum wesentlich weniger Nutzenergie zur Beheizung als ein schlecht gedämmter, um die gleiche Energiedienstleistung zu erreichen. Bei der Mobilität versteht man darunter im motorisierten Verkehr z.B. den Transport von Personen oder Gütern mit verschiedenen Fahrzeugen von Quellen zu Zielen. Auch in diesem Bereich benötigt ein effizientes Verkehrssystem in Wechselwirkung mit einer effizienten Raumplanung weniger Nutzenergie zur Befriedigung der in der Bevölkerung vorhandenen bzw. mit der Wirtschaft verbundenen Mobilitätsnachfrage. Nicht betrachtet wird in dieser Studie ein Wechsel der Verkehrsarten (Änderung des Modal Split) z.B. von Auto auf Schiene/Bus/nichtmotorisierten Individualverkehr.

6.3. Energiepotenziale

6.3.1. Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial beschreibt das innerhalb der Systemgrenzen innerhalb eines bestimmten Zeitraums theoretisch physikalisch nutzbare Energiedargebot – beispielsweise die auf die Erdoberfläche einfallende Solarstrahlung oder die – unter den Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit – jährlich nachwachsende Holzmenge. Das Potenzial markiert damit die Grenze des theoretisch maximal realisierbaren Beitrags einer Option zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Energiebereitstellung. Aufgrund unüberwindbarer technischer, ökologischer, struktureller

und administrativer Schranken kann das theoretische Potenzial meist nur zu sehr geringen Teilen erschlossen werden (KALTSCHMITT, STREICHER, WIESE 2020).

6.3.2. Nutzbares Potenzial

Im Rahmen der gegenständlichen Studie wird für den Bereich des Ressourcen-Dargebots das „nutzbare Energiepotenzial“ ausgewiesen. Das nutzbare Potenzial basiert dabei auf dem theoretischen Potenzial vermindert um aktuelle und auch in Zukunft zu erwartende sozioökonomische und sonstige Beschränkungen. Das nutzbare Energiepotenzial einzelner Primärenergieträger kann dadurch bis auf Null absinken und somit in den Szenarienbetrachtungen nicht mehr berücksichtigt werden. Sollten sich die Rahmenbedingungen bis zum Jahr 2050 bedeutend ändern, kann sich das nutzbare Potenzial einzelner Energieträger gegenüber den Ergebnissen der gegenständlichen Studie erhöhen oder auch verringern. Als Beschränkungen wurden u.a. die derzeitigen allgemeinen Rahmenbedingungen bei der Bewilligung von Wasserkraftanlagen, Akzeptanzfragen zu bspw. Freiflächen-Photovoltaikanlagen oder Windkraftanlagen, die derzeitigen Bewirtschaftungsmuster der Waldbesitzer und -pächter sowie bspw. auch die Entwicklungen im Ausbau von Solaranlagen berücksichtigt, aber auch Nutzungskonflikte bezüglich der Nutzung knapper Ackerflächen. Die bei der Ausweisung des nutzbaren Potenzials der heimischen Ressourcen angesetzten beschränkenden Rahmenbedingungen sind den Ausführungen der jeweiligen Ressourcen zu entnehmen.

7. Grundlagen

Die in gegenständlicher Studie zugrundeliegenden energiepolitischen Zielsetzungen auf verschiedenen Ebenen sowie Datengrundlagen die für die Berechnung als Rahmenbedingungen gelten, werden in diesem Kapitel angeführt. Zusätzlich beinhaltet dieser Berichtsteil anlagenspezifische Wirkungsgrade von Erzeugungsanlagen sowie Verluste im Leitungs- und Verteilsystem.

7.1. EU-, Bundes- und Landesziele

Folgende wesentliche Zielsetzungen und Vorgaben der Europäischen Union, der Republik Österreich sowie des Landes Tirol wurden bei der Ausarbeitung des gegenständlichen Szenarios berücksichtigt:

Europäischen Union:

- Erreichung der **Klimaneutralität** als erster Kontinent (netto-Null Treibhausgas-Emissionen) bis zum Jahr **2050**. (Green Deal).
- Reduktion der **Treibhausgasemissionen bis 2040 um 90%** gegenüber dem Stand von 1990.
- Reduktion der **Treibhausgasemissionen um mindestens 55 %** (ohne ETS) gegenüber 1990 bis 2030 (Green Deal).
- Anteil der erneuerbaren Energien: Die **Energie aus erneuerbaren Ressourcen** soll **bis 2030** zumindest 42,5 % betragen, wobei **45 %** angestrebt werden.
- **Energieeffizienz**: Nochmalige **Senkung des Energieverbrauchs um 11,7 % bis 2030**. Das Ziel der Energieeffizienz (Primärenergieverbrauch) gegenüber dem Ausgangsjahr 2007 wird von **32,5 % auf 39 %** erhöht.

Republik Österreich:

- **Klimaneutralität bis 2040** – Ausgleich aller Kohlenstoffemissionen durch Kohlenstoffbindung (Netto-Null-Emissionen).
- **Stromautonomie bis 2030** – Gewinnung des Gesamt-Stromverbrauchs national bilanziell vollständig aus Erneuerbaren.
- Erhöhung des **Anteils Erneuerbarer** am Brutto-Endenergieeinsatz **bis 2030 auf 60 %** (REDIII).
- **Reduktion der Treibhausgasemissionen** bis 2030 **um 55 %** (nonETS) gegenüber 1990.

Bundesland Tirol:

- **Energieautonomie 2050** – Vollständige Deckung des Endenergiebedarfs bilanziell im Jahressaldo aus heimischen erneuerbaren Energieträgern.
- **Photovoltaik-Ausbauziel bis 2027**: Erzeugung von 1.000 GWh/a bis 2027 durch PV-Anlagen auf Dächern und bevorzugt auf befestigten Flächen.
- Unterstützung der Zielerreichung **Klimaneutralität bis 2040**.

7.2. Sonstige gesetzliche und in Abstimmung befindliche Vorgaben

Folgende derzeit in Vorbereitung / Abstimmung befindliche Zielsetzungen und Vorgaben der Europäischen Union, der Republik Österreich sowie des Landes Tirol, von denen von Konsortium und einbezogenen Stakeholdern angenommen wurde, dass sie zukünftig verabschiedet werden und somit zu beachten sein werden, wurden bei der Ausarbeitung des gegenständlichen Szenarios berücksichtigt:

- Steigerung des Anteils Erneuerbarer Energie am Brutto-Endenergieeinsatz bei 45 bis 50% bis 2030
- Stromautonomie bis 2030 – 100% aus Erneuerbaren: Für Österreich fixiert durch das Erneuerbaren Ausbau Gesetz (EAG) mit einem Ausbauziel Erneuerbarer um 27 TWh, ausgehend von der Produktion im Jahr 2020. Der Ausbau wurde bisher nicht auf Länderebene heruntergebrochen.
- Bestimmungen des EAG – bereits umgesetzt, jedoch fehlen Verordnungen
- Bestimmungen des Erneuerbares Gas-Gesetz (EEG)
- Bestimmungen des Neuen Energieeffizienz-Gesetzes (EEffG)
- Bestimmungen des Erneuerbare Wärme Gesetz (EWG) inklusive eines Erdgas-Ausstiegs bis zum Jahr 2040

7.3. Übergeordnete Datengrundlagen

- Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050 mit Zwischenziel 2030 (EBENBICHLER et al. 2021)
- „Ressourcen und Technologieeinsatz-Szenarien Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2018)
- Regionale Bundesländerenergiebilanz Tirol 1988-2021 (STATISTIK AUSTRIA 2022)
- Nutzenergieanalyse Tirol 1988-2021 (STATISTIK AUSTRIA 2022)
- Demographische Daten Tirol 2021 (ADTLR 2022)
- Bevölkerungszahlen (STATISTIK AUSTRIA 2022)
- Bruttowertschöpfung Tirol 1967-2021 (Mitt. Wirtschaftskammer Tirol 2022)
- Erneuerbare Energien, Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte (KALTSCHMITT et al. 2020)
- Energiebedarfsdaten des Jahres 2021 der Tiroler Energieversorgungsunternehmen (Strom, Gas)
- Energiespeicher Tirol 2050 (EBENBICHLER et al. 2023)

7.4. Sektor Mobilität

- Fahrleistungen von Linien- und Flächenverkehr in Tirol: Datenquelle Verkehrsmodell Tirol (2016), Datenbasis 2005, zitiert im Bericht Energiemonitoring Tirol 2016 (HERTL et al. 2017)
- Statistische Daten zur Entwicklung der Motorisierung und Fahrleistungen: Energieeinsatz der Haushalte (Mikrozensus 2015/16, 2017/18, 2019/20, 2021/22) – Fahrleistungen und Treibstoffeinsatz privater Pkw. Ergebnisse für Tirol (STATISTIK AUSTRIA 2023)
- Kfz-Bestand Tirol, Pkw-Bestand nach Kraftstoffarten und Bundesländern mit Stichtag 31. Dezember des jeweiligen Jahres (STATISTIK AUSTRIA 2023)

- Nachhaltigkeitsberichte des Flughafens Innsbruck des jeweiligen Jahres (TIROLER FLUGHAFENBETRIEBS-GMBH 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022)
- Auskünfte des Verkehrsverbund Tirol GesmbH, der Wirtschaftskammer Tirol, des Flughafens Innsbruck, der Transalpine Ölleitung in Österreich Ges.m.b.H. und der Achenseeschifffahrt-GesmbH.
- Amtsblatt der Europäischen Union: „Initiative ReFuelEU Aviation“ (Verordnung zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr)(EUROPÄISCHE UNION 2023)

7.5. Sektor Produktion

- Diverse Ratgeber für energieeffiziente Technologien in Industrie und Gewerbe (DENA 2017)
- WKO Statistik, Wirtschaftslage und Prognose der Sachgütererzeugung (WKO 2023)
- Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien (UMWELTBUNDESAMT 2024)
- Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration (EBENBICHLER et al. 2023)
- Power to Gas und Power to Liquid Technologien (PANZONE et al. 2020; DIETERICH et al. 2020; DENA 2017; BUTTLER et al. 2018; BOS et al. 2020; BLANCO et al. 2018)
- Energieeffizienzen und Wirkungsgrade (PÖSCHL et al. 2010; UMWELTBUNDESAMT ÖSTERREICH 2010; UMWELTBUNDESAMT 2024)
- Diverse Gespräche mit Fachleuten Tiroler Unternehmen (z.B. Montanwerke Brixlegg, INNIO Jenbacher, Swarovski, Donau Chemie, Syncraft, Swietelsky, Schretter & Cie GmbH, TIGAS, TINETZ, etc.)
- Interessensvertreter (z.B. WKO Tirol; Industriellenvereinigung Tirol, ...)

7.6. Sektor Gebäude

- Baubewilligungen, Neuerrichtung ganzer Gebäude ab 2010 (STATCUBE 2016)
- Modellierung der Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im österreichischen Wohngebäudebestand unter Annahme verschiedener Optimierungsziele, Dissertation (SCHRIEFL 2007)
- Solarthermische Anlagen für Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung (EICKER 2011)
- EneRAIp Tool Softwaredokumentation (PFEIFER et al. 2016)
- Entwicklung, Untersuchung und Bewertung von Berechnungsmodellen zur Erstellung von kommunalen Energiebilanzen im Gebäudebereich. Dissertation Univ. Innsbruck (PFEIFER 2017)
- Energieplan Innsbruck (DOBLER et al. 2017)
- Gebäude- und Wohnungszählung (GWZ) 2011 (STATCUBE 2018)
- Zahlen, Daten, Fakten zu Wohnungspolitik und Wohnungswirtschaft in Österreich (OBERHUBER et al. 2014)
- Kein Öl und Gas in Neubau (Erfüllung des EWG) und in Sanierung/Austausch (Annahme von 100 % Akzeptanz der Förderung „Raus aus Öl und Gas mit begleitenden Länderförderungen“ ab 2021.

7.7. Energieressourcen

- Solarkataster Tirol 2013 (ADTLR 2015)
- Wasserkraft in Tirol. Potenzialstudie (ADTLR 2011)
- Deklaration Wasserkraftnutzung in Tirol (ADTLR 2011)
- Holzressource in Tirol (Mitt. AdTLR 2023, Abt. Waldschutz)
- Abfallaufkommen und -mengen Tirols (ADTLR 2017, ARGE ECO.IN 2011, BMNT 2017, BMNT 2017, IUT 2003)
- Räumliche Verteilung des Viehbestands in Tirol (LWK TIROL 2019)
- Kläranlagenkataster 2013 (ADTLR 2014)
- Grundwasserkörper Tirols (ANDERLE et al. 1978)

7.8. Wirkungsgrade von Erzeugungsanlagen

Bezüglich der angenommenen Wirkungsgrade von berücksichtigten Erzeugungsanlagen wurde eine detaillierte Literaturrecherche vorgenommen. Tab. 1 enthält einen Überblick über für Tirol interessante Umwandlungstechnologien (Primär- zu Sekundärenergie) mit Angabe der in gegenständlicher Studie hinterlegten Wirkungsgrade sowie Literaturquellen. Die jeweiligen Technologien werden in der Folge genauer erklärt.

7.8.1. Wasserkraftwerke

Entstehende Verluste von mechanischer Energie auf elektrische Energie werden analog zur Studie „Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050 mit Zwischenziel 2030“ (EBENBICHLER et al. 2021) definitorisch nicht angesetzt.

7.8.2. Pumpspeicherkraftwerke

Pumpspeicherkraftwerke sind sehr effiziente Anlagen, jedoch treten nicht vermeidbare Pumpspeicherverluste von im Mittel etwa 24,2% auf. Der in gegenständlicher Studie angesetzte mittlere Wirkungsgrad beträgt basierend auf Betriebswerten analog zur Studie „Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050 mit Zwischenziel 2030“ (EBENBICHLER et al. 2021) 75,8%. Zudem leisten Pumpspeicherkraftwerke nicht nur einen wesentlichen Beitrag zur Energiespeicherung, sondern auch zur Gewährleistung der Netzstabilität.

7.8.3. Power to Gas – Wasserstoff

Für die Herstellung von grünem Wasserstoff ohne Elektrolyse wird elektrische Energie benötigt. Sie wird für den Prozess selbst und auch für den Betrieb diverser Nebenaggregate wie Umkehrosmoseanlagen zur Wasseraufbereitung, Pumpen und Verdichter benötigt. Der theoretische Wirkungsgrad (Strom zu Heizwert) für die Wasserstoffproduktion liegt je nach angewandter Elektrolysetechnologie, Anlagengröße und betrachteter Systemgrenze im Bereich von 46 bis 60 % (NIKOLAIDIS et al. 2017; BUTTLER et al. 2018). Zusätzliche Verluste entstehen durch die Speicherung und den Transport, wobei die Höhe dieser Verluste stark von der Dauer der Speicherung und der gewählten Transportart abhängt.

Die am weitest fortgeschrittenen kommerziellen Technologien zur Wasserstoffproduktion sind die alkalische Wasserelektrolyse (AWEL) und die Proton Exchange Membrane - Wasserelektrolyse (PEMWEL), die beide der Niedertemperatur-Elektrolyse zuzuordnen sind. Hochtemperatur-Elektrolyseure sind derzeit noch nicht marktreif, spielen aber in vielen Szenarien eine zunehmend bedeutende Rolle. Die Hochtemperatur-Sauerstoffionenleiter-Elektrolyse (SOEL) zeigt ein vielversprechendes Potenzial, den Elektrolyseprozess weiter zu optimieren und damit eine Alternative zu bieten. Der Forschungsstand und die Fortschritte der SOEL-Technologie sollten daher in zukünftigen Überlegungen zur Wasserstoffproduktion berücksichtigt werden.

Für die Erzeugung von Wasserstoff wurden in gegenständlicher Studie folgende Rahmenbedingungen angesetzt:

- Bezugsgröße des Wasserstoffs: **Heizwert** (33 kWh/kg), bezogen auf den unteren Heizwert (LHV)
- **Systemwirkungsgrad von 55% (2030) bis 60% (2050) (vor Transport)** beinhaltet folgende Annahmen:
 - Wasserstofferzeugung durch Niedertemperatur-Elektrolyse (keine Abwärme-Auskopplung),
 - Energiebedarf für Nebenaggregate und Gasaufbereitung wurde berücksichtigt,
 - Im Teillastbetrieb erreichen manche Elektrolyseure schlechtere (AWEL), manche bessere Wirkungsgrade (PEMWEL).
- Gemittelter Wert für unterschiedliche **Transport- und Speicherverluste: 10%**
 - Kompression auf 200 bis 700 bar (Transport mittels Flaschenbündel),
 - Kompression auf 60 bar (Transport mittels Pipeline),
 - Verflüssigung des Wasserstoffs (Transport mittels Kryotanks – hierfür wird derzeit noch wenig Potenzial in Tirol gesehen),
 - Speicherverluste für kurz- bis mittelfristige Speicherung.

Daraus ergibt sich ein **gemittelter Systemwirkungsgrad von 46 – 60 %** für eine dezentrale Wasserstoff-Infrastruktur. Es kann davon ausgegangen werden, dass es zukünftig weiterhin zu einer Nutzung von beiden Wasserelektrolyse-Technologien kommen wird. Findet eine Kopplung an erneuerbare Energiequellen statt, erscheint es wahrscheinlicher, dass sich hierfür die PEM-Elektrolyse durchsetzt. Da derzeit sehr viel Forschung und Entwicklung im Bereich Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse stattfindet, könnten sich die angeführten Richtwerte als zu konservativ herausstellen und wären dementsprechend regelmäßig zu überprüfen und anzupassen.

7.8.4. Power to Gas – synthetisches Methan

Bei der chemischen Synthese von Methan reagieren Wasserstoff und Kohlendioxid bei 250 bis 500 °C und 5 bis 30 bar Betriebsdruck – idealerweise in einem mehrstufigen Prozess. Für ein Energiesystem auf Basis von Power-to-Gas Methan bedeutet dies, dass elektrische Energie für die Erzeugung von Wasserstoff, elektrische und thermische Energie für die Gewinnung von reinem CO₂ und elektrische Energie für die Aufbereitung des Produktgases bis zur Einspeisung in ein Gasnetz benötigt wird. Aus dem Methanisierungsprozess kann Wärme für die Desorption von CO₂ zurückgewonnen werden, was die Energiebilanz des Systems verbessert. Der gesamte Prozess mit allen vorgelagerten Prozessen ist sehr komplex und die Systemgrenzen bei der Betrachtung der Wirkungsgrade nicht immer klar definiert, weshalb in der gegenständlichen Studie angenommen wird, dass **eine Ausbeute von 44%** der Energie in Form von Methangas erreicht werden kann, was Umwandlungsverlusten von 56% entspricht.

Hinzu kommen Transport und Speicherverluste von etwa 3 %. In der Studie wird der Energiebedarf zur Gewinnung von CO₂ nicht berücksichtigt.

Für die Erzeugung von Power-to-Gas Methan wurden in der gegenständlichen Studie folgende Rahmenbedingungen gesetzt:

- Bezugsgröße des Methans: **Heizwert** (10 kWh/m³ bei Normdruck)
- **Systemwirkungsgrad von 41 %** (inkl. Transportverluste) bezogen auf die eingesetzte Energie; beinhaltet folgende Annahmen:
 - Wasserstofferzeugung durch Niedertemperatur-Elektrolyse AWEL oder PEMWEL
 - Elektrolyse und anschließende Methanisierung befinden sich direkt an Wärme- und CO₂-Quelle,
 - 2-stufiger Methanisierungsprozess bei 10 bar / 300 °C,
 - Energiebedarf für Nebenaggregate und Gasaufbereitung wurde berücksichtigt,
 - Wärmerückgewinnung (Temperatur > 95 °C) aus Methanisierungsprozess für Desorption von CO₂ und Produktvorwärmung,
 - Restliche thermische Energie für den Prozess (> 95 °C) wird durch Fernwärme aus Holzbiomasse bereitgestellt (sofern prozessbedingt noch benötigt),
 - Interne Kompressionsprozesse,
 - Berücksichtigung von Wirkungsgradeinbußen durch Teillastbetrieb,
 - Keine Berücksichtigung des Energiebedarfs zur CO₂-Gewinnung,
 - Transport- und Speicherverluste (bestehende Gas-Pipelines) rund **3 %-Punkte**.

Anmerkung: Als Wärme- und CO₂-Quelle könnten Biomasse-Kraftwerke sowie diverse Industrieprozesse dienen. Durch die direkte Kopplung der Elektrolyse- (Annahme $\eta = 51\%$), sowie Methanisierungsanlage (Annahme $\eta = 80\%$) BLANCO et al. (2018), entfällt der Zwischenschritt der Kühlung und Kompression, was zu einer leichten Effizienzsteigerung führt.

7.8.5. Biokohle

Abseits des Einsatzes von Kohle in kalorischen Kraftwerken zur Stromerzeugung ist Kohle auch ein wichtiges Edukt in verschiedenen Industrieprozessen. Beispielsweise wird Kohle bzw. der aufbereitete Koks in metallurgischen Prozessen als Reduktionsmittel, oder als Kohlenstoff-Legierungselement eingesetzt. Auch die Aufbereitung zu Aktivkohle wird zunehmend interessanter, da diese eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten bietet – beispielsweise als Adsorptionsmittel in chemischen Prozessen, bei der Trinkwasseraufbereitung und der Abwasserreinigung, als Geruchsfilter usw.

Es wird aus heutiger Sicht nicht davon ausgegangen, dass eine großindustrielle Produktion von Biokohle in Tirol stattfinden wird, stattdessen wird sie als wertvolles Nebenprodukt in Prozessen wie der Holzvergasung oder der reinen Holzpyrolyse anfallen. Transport- und Speicherverluste werden wegen einfacher Lagerung vernachlässigt.

Biokohle aus Holzvergasung

Bei der Holzvergasung, bei der mittels eines thermochemischen Prozesses unter Sauerstoffmangel aus Holz ein energiereiches Produktgas erzeugt wird, fällt als Nebenprodukt auch Biokohle in einer Größenordnung von etwas mehr als 10 % der eingesetzten Holzbiomasse an.

Es handelt sich um eine effiziente Technologie mit einem hohen Nutzungsgrad. Durch Kopplung des Holzvergasers an Blockheizkraftwerke können Strom, Hochtemperaturwärme (HTW) und Niedertemperaturwärme (NTW) gewonnen werden. Im Durchschnitt kann aus der eingesetzten Energie 23 % Strom, 44 % HTW und 17 % NTW gewonnen werden. Der Strom kann dabei für den Eigenverbrauch genutzt oder in das Stromnetz eingespeist werden. Die Hochtemperaturwärme kann für ein Fernwärmenetz genutzt werden. Die Niedertemperaturwärme kann z.B. für die Trocknung des eingesetzten Holzes dienen. Die Umwandlungsverluste in einer modernen Holzvergasungsanlage belaufen sich auf etwa 6 %.

Biokohle aus Pyrolyseprozessen

Neben der Holzvergasung kann Biokohle aus Holz auch durch reine Pyrolyse erzeugt werden. Vereinfacht handelt es sich dabei um einen unvollendeten Vergasungsprozess, bei dem nur eine Trocknung und Pyrolyse stattfinden, jedoch keine nachgelagerten Oxidations- und Reduktionsvorgänge. Es ergeben sich etwa 25 % der Masse des vorgetrockneten Holzes als Biokohle, die restlichen 75 % werden zu Pyrolysegas umgewandelt. Der Heizwert des Feststoffes steigt durch die Pyrolyse von ca. 18 MJ/kg (Holz) auf 32 MJ/kg (Biokohle). Es wird ein chemischer Wirkungsgrad von etwa 44-45 % erreicht (Biokohle), je nach System gehen 1-2 % für Hilfsenergien verloren. Die restliche Energie wird in Form von Pyrolysegas zur Aufrechterhaltung der benötigten thermischen Energie rückgeführt. Die bei den Pyrolyseanlagen anfallende Abwärme wird direkt an den Erzeugungsanlagen für Trocknung und internen Wärmebedarf verwendet, eventuelle Überschusswärme kann – bei günstigen Rahmenbedingungen – für weitere industrielle Zwecke verwendet werden. Eine Einbindung in das Fernwärmenetz ist aufgrund des Temperaturniveaus nicht standardmäßig vorgesehen.

7.8.6. Biofuels und synthetische Fuels

Biofuels (Biodiesel bzw. Fettsäuremethylester) sowie synthetisch erzeugte Treibstoffe (Benzin/Kerosin sowie Diesel aus Fischer-Tropsch-Verfahren (FTV)) aus nachhaltigen Ressourcen stellen eine Möglichkeit dar, insbesondere den Flugverkehr ökologischer zu gestalten.

Die Wirkungsgrade für Power to Liquid (PtL)-Umwandlungen schwanken meist zwischen 40 und 60 %. Den größten Unterschied erhält man durch die verschiedenen Elektrolyse-Technologien. Hochtemperatur Elektrolysen bzw. SOEL haben hierbei die besten Aussichten. Dabei kann der Wirkungsgrad des eingesetzten Stroms um gut 10 % gehoben werden, da ein Teil der benötigten Energie durch Hochtemperatur bereitgestellt wird. Außerdem spielt die Reinheit bzw. der Energieeintrag zur Aufbereitung von CO₂ einen entscheidenden Faktor von weiteren etwa 10 %. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass bis 2050 PtL-Anlagen mit einem **Wirkungsgrad von bis zu 60 %** operieren können. Grundlage dafür sind die Weiterentwicklung von SOELs und die Verwendung von CO₂ aus punktuellen Emissionsquellen. Aktuell gibt es jedoch keine reale Anlage, die einen Wirkungsgrad über 40 % aufweist. Für konservative Schätzungen und die Verwendung von breiter verfügbaren Elektrolyse-Technologien sowie CO₂ mit niedrigerer Reinheit wird im vorliegenden Szenario ein **Wirkungsgrad von 40 % angesetzt**.

7.8.7. Kalorische Kraftwerke

Kalorische Kraftwerke zur reinen Stromproduktion werden lediglich vollständigheitshalber erwähnt und spielen für die Energieautonomie Tirols aufgrund ihrer ökologischen und ökonomischen Kennwerte voraussichtlich keine Rolle. Durch das niedrige Temperaturniveau der Abwärme ist ($< 35^{\circ}\text{C}$) diese Art der Energieerzeugung als ineffizient zu bezeichnen. So kann beim Einsatz von Holz oder Biogas als Energieträger etwa 35% der eingesetzten Energiemenge in Strom umgewandelt werden – 65% werden als Verluste in die Umgebung abgegeben.

7.8.8. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen

Mit einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ausgestattete Anlagen zur Energiegewinnung sind rein kalorischen Kraftwerken vorzuziehen, da hierdurch sowohl elektrische Energie in Form von Strom als auch thermische Energie in Form von nutzbarer Wärme produziert werden. Auf drei Varianten wird an dieser Stelle insbesondere verwiesen:

- **Holz als Energieträger im ORC-Verfahren (Organic Rankine Cycle)**
Beim ORC-Verfahren kommt ein organisches Lösungsmittel als Arbeitsmedium zum Einsatz. Meistens ist dies der Fall, wenn die Temperaturdifferenz der Wärmequelle nicht ausreicht, um hochenergetischen Wasserdampf für die Dampfturbine zu erzeugen. Bezogen auf die eingesetzte Energie können in etwa 12% Strom und 78% Wärme erzeugt werden – bei 10% Umwandlungsverlusten.
- **Holz als Energieträger im Standard-Verfahren mit Wasserdampf als Arbeitsmedium**
In diesem Verfahren können - bezogen auf die eingesetzte Energie in etwa 25% Strom und 65% Wärme erzeugt werden – bei 10% Umwandlungsverlusten.
- **Biogas als Energieträger**
Hier liegt der Fokus auf der motorischen Nutzung des Biogases, mit dieser Technologie werden in etwa 38% Strom und 52% Wärme erzeugt – bei 10% Umwandlungsverlusten.

Zusammen mit den Holzvergäsern (Kap. 7.8.5) werden die KWK-Anlagen im gegenständlichen Szenario gemeinsam modelliert. Es ergibt sich ein **Mischwirkungsgrad** unter der Annahme, dass etwa 30 neue Holzvergaser und 15 weitere KWK-Anlagen installiert werden, um neben dem Energiebedarf auch den Bedarf an Holzkohle in 2050 zu decken. Es ist zu beachten, dass diese Kraftwerke nicht ganzjährig in Betrieb sind (s.a. EBENBICHLER et al. 2023) sondern in einem gewissen Umfang als Hochlastkraftwerke betrieben werden.

7.8.9. Heizwerke

Heizwerke spielen eine bedeutende Rolle in der regionalen Wärmeversorgung und werden oft von Kommunen und bäuerlichen oder sonstigen Genossenschaften betrieben. Bei einem Einsatz von **Holz** in den Biomassekesseln können in **etwa 90%** der eingesetzten Energie in Wärme umgesetzt werden, etwa 10% stellen Verluste dar. Bei Einsatz von **Biogas** kann ein Nutzungsgrad von **etwa 95%** Wärme bei nur 5% unbedingten Verlusten erreicht werden.

Tab. 1: Übersicht der Umwandlungstechnologien und deren Wirkungsgrade.

Eingesetzte Energieträger	Technologie	Sekundärenergie	Wirkungsgrad Umwandlung	Bemerkung	Quelle
Strom	Pumpspeicherkraftwerk	Strom	75,8%	analog zu „Energie-Ziel-Szenario 2050 mit Zwischenziel 2030“ (EBENBICHLER ET AL. 2021)	vgl. Mitt. TIWAG, Verbund
Wasserkraft, Sonnenenergie	Power to Gas PEMEL / AWEL – H ₂	Wasserstoff	46 – 60% (Marktreif)	Systemwirkungsgrade 2030-2050; inkludiert Wasser- und Gasaufbereitung, Kompression und sonstige Peripherie (inkl. Verteilung und Speicherung)	NIKOLAIDIS et al. (2017); BUTTLER et al. (2018)
	Power to Gas SOEL – H ₂		76% - 81% (Forschung)		
Wasserkraft, Sonnenenergie	Power to Gas – Synth. Methan	Synthetisches Methan	41%	Systemwirkungsgrad inkludiert Wasserstoffproduktion mittels effizienter PEMEL oder AEL sowie Methanisierung mit etwa 80 % (s. Literatur)	DENA (2017); HIDALGO et al. (2020); BLANCO et al. (2018)
Wasserkraft, Sonnenenergie	Power to Liquid	Synthetische Fuels	40%	Power to Methanol könnte höhere Wirkungsgrade von 50 % erreichen	PANZONE et al. (2020); DIETERICH et al. (2020); BOS et al. (2020)
Biomasse Holz	Heizwerk	Wärme	90% _{th}		UMWELTBUNDESAMT ÖSTERREICH (2010)
	KWK (Holzvergasung)	Strom, Wärme, Biokohle	23% _{el} 44% _{th} (HT) 17% _{th} (NT) 10% _{Kohle}	Dezentrale Holzvergasungsanlagen mit BHKW	Mitt. Syncraft GmbH 2020
	Pyrolyse	Biokohle	45%	Reine Biokohleproduktion	PYREG GMBH (2022)
Biogas	Fermentation	Strom, Wärme	25% _{el} 55% _{th}	BHKW, kaum Bedeutung aufgrund Eigenbedarf der Anlagen, hohe Schwankungsbreite gemäß Literatur	PÖSCHL et al. (2010)
	Heizwerk	Wärme	95% _{th}	kaum Bedeutung in Tirol	
Brennbare Abfälle	Abfallverbrennungsanlage	Strom, Wärme	22% _{el} , 23% _{th}		ECOCENTER (2024)

7.9. Leitungs- und Verteilverluste

7.9.1. Strom

In gegenständlichem Projekt wurde keine räumliche Betrachtung über die Netzknoten pro Land (bzw. Tirol) hinaus und somit keine detaillierte Netzbetrachtung durchgeführt.

Gemäß Mitteilung der AUSTRIAN POWER GRID AG (2020) betragen die Netzverluste bei der Stromübertragung je nach Netzfunktion und Übertragungsebene zwischen 1 und 7 %. In Abstimmung mit der TINETZ (12.06.2023) wurde für die **Hoch- und Mittelspannungsebene** als Leitungsverluste ein gemittelter Wert von **2 %**, für die **Niederspannungsebene** von **5 %** angenommen.

7.9.2. Nah- und Fernwärmenetze

Die Verluste von Nah- und Fernwärmenetzen schwanken aktuell je nach Netzstruktur, Bauart, Alter, Wartungsstatus und Betriebsführung deutlich. Die mittleren Verluste von Nah- und Fernwärmenetzen wurden aktuell auf rund 20 bis 30% geschätzt. Mit fortschreitender Modernisierung der Bestandsnetze und dem modernen, verstärkt auf Effizienz achtenden Ausbau bestehender sowie neuer Netze wurden von durchschnittlichen Verlusten in Höhe von 15% im Jahre 2050 ausgegangen (Dieser Wert gilt aktuell nur für sehr effiziente Systeme, es wird davon ausgegangen, dass dieser Wirkungsgrad bis 2050 flächendeckend erreicht wird.).

7.9.3. Synth. Methan

Die Verteilung von Gasen erfolgt über Pipelines. In Anlehnung an die Recherche der Vorgängerstudie (EBENBICHLER et al. 2021) wird für synthetisches Methan ein Leitungsverlust von 3 % angenommen. Hinzu kommen die Verluste aus der Speicherung. Die Speicherung von Methan wurde im Speicherszenario mit einem Wirkungsgrad von 99 % ausgewiesen. Daher kommt ein zusätzlicher Verlust von 1 % zu tragen.

7.9.4. Wasserstoff

Die Verteilung von Wasserstoff erfolgt in diesem Szenario dezentral, und demnach über kürzere Pipelines. Die Leitungsverluste werden somit als geringer angesehen. Allerdings werden vor allem größere Speicherverluste von etwa 10 % erwartet (Kap. 7.8.3). Die Annahmen bezüglich Transport, Erzeugung und Lagerung von Wasserstoff sind in Kap. 9.2.1 dargelegt. Bei der Bezugnahme von Wasserstoff aus anderen Regionen können, abhängig von der Transporttechnologie, zusätzliche Verluste auftreten. Mögliche Technologien sind komprimiertes Gas, gekühltes Flüssiggas, in Form von Metall-Hydrid oder die Einspeisung in Gas-Pipelines.

Wenn beispielsweise das österreichische Gasnetz genutzt werden soll, ist zu beachten, dass zur Erzielung der gleichen Energiemenge (bezogen auf das Volumen) die dreifache Menge an Wasserstoff eingespeist werden müsste. Dies resultiert aus dem deutlich geringeren volumenbezogenen Heizwert von Wasserstoff. Die Verluste im Gasnetz selbst sind bei Wasserstoff ebenfalls höher als bei Methan, sofern keine technischen Anpassungen am Gasnetz vorgenommen werden. Die erhöhten Verluste sind auf die hohe Diffusionsfähigkeit von Wasserstoff zurückzuführen und können zusätzliche Leitungsverluste von bis zu 10 % verursachen.

8. Energie-Potenziale 2021 und 2050

Zur Ableitung eines realistischen, das heißt unter Beachtung der aktuellen und voraussichtlich eintretenden Rahmenbedingungen umsetzbaren, Energiesystem-Szenarios bis zum Jahr 2050 mit der Vorgabe der Erlangung einer bilanziellen Energieautonomie ist neben der Ableitung der dann benötigten Energiemengen insbesondere auch die Frage der Verfügbarkeit von Energieträgern und Energiemengen zu klären. Die vorhandenen begrenzten Energieressourcen Tirols sind bis zum Jahr 2050 – und darüber hinaus – bestmöglich in das Energiesystem zu integrieren. Dabei sind sie entweder aufgrund des Vorkommens in Tirol begrenzt – wie zum Beispiel Wasserkraft, Sonne, Biogas – oder aber theoretisch unbegrenzt – wie zum Beispiel Erdwärme und Luftwärme. Energieträger wie zum Beispiel Holzbiomasse sind in dem Sinn begrenzt vorhanden, als dass die Ernte durch die Menge der nachwachsenden Holzmenge begrenzt ist – also eine nachhaltige Waldbewirtschaftung hinterlegt wird.

Gemäß Kap. 6.3 werden im Zuge der gegenständlichen Studie die ausgewiesenen Energie-Potenziale als unter den aktuellen und zu erwartenden restriktiven Rahmenbedingungen nutzbare Energiepotenziale verstanden, deren Quantitäten damit teils beträchtlich unter den theoretischen Potenzialen liegen können.

8.1. Wasserkraft

Das technisch-wirtschaftlich noch nicht genutzte Wasserkraftpotenzial wurde im Jahr 2011 unter Beachtung der damals gegebenen Ausschlussgebiete auf 6.821 GWh beziffert (REITZNER 2011). Gemäß Abteilung Wasserwirtschaft des Landes Tirol lag das Regelarbeitsvermögen im Jahre 2011 bei 6.679 GWh. Damit ergibt sich ein Gesamtpotenzial in Höhe von rund **13.500 GWh/a**¹.

Die Quantifizierung des nutzbaren Wasserkraftpotenzials orientiert sich im Rahmen der gegenständlichen Studie an der Wasserkraftdeklaration des Landes Tirol aus dem Jahre 2011. Damals wurde seitens des Landes Tirol als Ziel festgelegt, die Wasserkraft innerhalb der nächsten 25 Jahre um im Saldo 2.800 GWh/a auszubauen (ADTLR 2011). Begründet durch die Dauer von Genehmigungsverfahren kann aus heutiger Sicht davon ausgegangen werden, dass der Endausbau bis 2050 erreicht werden wird. Demnach liegt der **Ausbauzielwert** der Wasserkraft im Jahr 2050 bei **9.479 GWh/a**.

Im Rahmen der gegenständlichen Studie wurde dieser Ausbauzielwert für das Jahr 2050 als nutzbares Potenzial betrachtet. Eine darüberhinausgehende Nutzung des technisch-wirtschaftlichen Potenzials wurde in Abstimmung mit dem Fördergeber sowie Stakeholdern nicht angenommen – dies aufgrund des bisherigen Wasserkraftausbaus seit dem Jahr 2011 (HERTL et al. 2023), der Verfahrensstände derzeitiger – vor allem großer Wasserkraftwerke – sowie der von den großen Tiroler Elektrizitätsunternehmen abgeschätzten Erzeugungseinbußen bis 2027 infolge

¹ Es wird darauf hingewiesen, dass das ausgewiesene technisch-wirtschaftliche Potenzial seit 2011 durch ergänzende Restriktionen wie zum Beispiel dem Ausschluss des mittleren Inns oder überwiegender Teile Osttirols aufgrund Natura 2000-Festlegung, des Rahmenplans Tiroler Oberland deutlich reduziert wurde, eine Quantifizierung jedoch bis dato nicht näher durchgeführt wurde.

der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie, die durch weitere Anlagen bzw. Anlagenoptimierungen zusätzlich auszugleichen sind.

Mitte 2023 betrug das Regelarbeitsvermögen des Kraftwerksbestands in Tirol (934 Anlagen) gemäß Energiemonitoring Tirol (HERTL et al. 2023) rund 7.580 GWh im Bestand.

Im Ergebnis wurde auf Basis des Anlagenbestands des Jahres 2011, des aktuellen Anlagenbestands sowie der in Bau befindlichen und projektierten Anlagen sowie der zusätzlich nötigen Anlagen in Anlehnung an HERTL et al. (2023) der in Tab. 2 dargestellte Wasserkraft-Ausbaupfad für die gegenständliche Studie abgeleitet².

Tab. 2: Wasserkraftanlagen-Ausbaupfad Tirol 2011 bis 2050 (gerundet).

	2011	2021	2023	2050
RAV	6.679 GWh	6.749 GWh	7.580 GWh	9.479 GWh
Ausbau des RAV gegenüber dem Jahr 2011		+70 GWh	+901 GWh	+2.800 GWh

8.2. Wind

Die Windpotenzialstudie „Windenergie in Tirol“ des Jahres 2013 wies unter Berücksichtigung diverser Restriktionen wie z.B. Hangneigungen, Schutzgebietsflächen, Erschließbarkeit und Wirtschaftlichkeitsüberlegungen für Tirol ein technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial von **rund 200 bis 300 GWh/a** aus (ADTLR 2013). Bei einer angenommenen Leistung von 2,5 MW sowie 2.000 Volllaststunden entspräche dies einem Anlagenpark mit rund 40 bis 60 Windkraftanlagen.

Die im Jahr 2023 veröffentlichte Studie „Windenergiepotenzial in Tirol (e3 CONSULT 2023) beziffert das technisch-wirtschaftliche Windkraftpotenzial Tirols auf 800 bis 1.200 GWh/a je nach hinterlegtem Winddatensatz (Windatlas Österreich bzw. BIOCLIM). Das ausgewiesene Potenzial könnte gemäß e3 CONSULT (2023) beispielhaft durch die Errichtung von 140 bis 160 Windkraftanlagen à 3 MW erzielt werden. Die Studie zeigt deutlich, dass die Potenzialausweisung vor allem aufgrund der großen Unsicherheiten bezüglich der anzunehmenden Windgeschwindigkeiten (fehlende Messungen) sowie auch weiteren Annahmen wie zum Beispiel maximale Hangneigungen, rotorkreis-spezifische Jahresstromproduktion oder anzusetzende maximale Seehöhe der Standorte stark schwanken. Auch die räumliche Verteilung des ausgewiesenen Potenzials weicht deutlich voneinander ab. Während rund 50% des ausgewiesenen Potenzials auf Basis des Windatlas Österreich im Bezirk Innsbruck-Land gesehen werden, wird auf Basis der BIOCLIM-Winddaten rund 35% des Potenzials im Bezirk Lienz sowie jeweils rund 20% in den Bezirken Innsbruck-Land und Landeck gesehen.

² 2023 betrug das RAV der Tiroler Wasserkraftwerke 7.580 GWh (HERTL et al. 2023).

Im Rahmen der gegenständlichen Studie wird in Anlehnung an Einschätzungen von in die gegenständliche Studie einbezogener Windkraftanlagenfirmen und weiteren Stakeholdern davon ausgegangen, dass im Jahr 2050 **rund 400 GWh/a an Windstrom tatsächlich erzeugt** werden.

8.3. Sonne

Die Ermittlung des Potenzials zur Erzeugung von Strom bzw. Wärme aus der solaren Einstrahlung auf Dachflächen erfolgt im Rahmen der gegenständlichen Studie in Anlehnung an die Methodik der Studie „Ressourcen- und Technologieeinsatz-Szenarien Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2018). Dabei wurden die solaren Einstrahlungswerte auf Dachflächen aus dem Solarkataster Tirol mit Stand 2013 ausgewertet, angenommene Wirkungsgrade von Photovoltaik- bzw. solarthermischen Anlagen hinterlegt und die möglichen Energieerzeugungen abgeschätzt. Dabei sind u.a. folgende Punkte zu beachten:

- Die Ausweisung der Potenziale erfolgte unter der Annahme, dass Module entsprechend der realen Neigungen der bestehenden Dachflächen errichtet werden.
- Durch Aufständungen von Solarmodulen auf den ausgewiesenen Dachflächen können die zu erzielenden Strom- und Wärme-Erträge unter Umständen von den ermittelten Werten abweichen.
- Die Dachflächenentwicklung bis ins Jahr 2050 kann nicht vorhergesehen werden – weder bezüglich Flächengrößen noch Ausrichtung und Neigung sowie solare Einstrahlungsmengen. Aufgrund dieser Unwägbarkeiten sowie der groben Annahmen nicht nutzbarer Dachflächenanteile (s.u.) wurde darauf verzichtet, eine Dachflächenentwicklung bis zum Jahr 2050 in der gegenständlichen Studie zu berücksichtigen.
- Weitere potenziell nutzbare Flächen wie z.B. Bauwerksfassaden wurden nicht vertieft untersucht.

8.3.1. Solare Einstrahlung auf Dachflächen Tirols

Gemäß Solarkataster Tirol³ mit Stand 2013 existieren in Tirol rund 86 Mio. m² geneigte Dachflächen mit einer Mindestgröße von 5 m². Die solare Einstrahlung auf diese geneigten Dachflächen beträgt jährlich rund 69.700 GWh.

Unter der Annahme, dass eine technisch-wirtschaftliche Nutzung ab einer Einstrahlungsintensität von 950 kWh/(m²•a) gegeben ist, verbleiben für eine sinnvolle Nutzung rund 49 Mio. m² Dachflächen. Dies sind 57% der Gesamtfläche der Dächer Tirols, welche in Summe eine solare Einstrahlung von rund 50.900 GWh/a aufweisen.

Da Dachflächen in der Regel aufgrund von Fensterflächen, Kaminen, Gaupen, Kanten, Sockeln, Attikas etc. nicht flächendeckend mittels Modulen belegt werden können und im Normalfall Service- und Wartungsflächen freigehalten werden, wurde im Rahmen der gegenständlichen Studie davon ausgegangen, dass rund 30% der sinnvoll

³ Das Solarkataster Tirol wurde im Jahr 2015 veröffentlicht und bildet die Dachflächen Tirols des Jahres 2013 ab. Seitdem erfolgte Neubauten, Umbauten sowie Rückbauten im Dachflächenbestand sind in den Auswertungen des gegenständlichen Berichts nicht berücksichtigt. Eine Aktualisierung des Solarkatasters ist ausständig.

nutzbaren Dachflächen nicht solartechnisch genutzt werden können, womit auch denkmalgeschützte Gebäude, Kirchen, Stadeln und sonstige abseits des Siedlungsraumes gelegene Gebäude berücksichtigt sind. Mit dieser Annahme verbleibt eine solare Einstrahlung rund 35.300 GWh/a auf die nutzbaren Dachflächen Tirols.

Diesbezüglich wird – basierend auf den Bestandsanlagen sowie den Zielpfaden zum Ausbau von Photovoltaik-Anlagen und solarthermischen Anlagen gemäß Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050 (EBENBICHLER et al. 2021) – davon ausgegangen, dass 95% der nutzbaren Dachflächen für die Nutzung mittels Photovoltaik-Anlagen sowie 5% der nutzbaren Dachflächen für die solarthermische Nutzung berücksichtigt werden sollen.

8.3.2. Photovoltaik – Aufdach-Anlagen

Unter der Annahme einer erzielbaren Energieausbeute mittels Photovoltaik-Anlagen in Höhe von 18% der eingestrahnten solaren Energie sowie den o.g. Annahmen beziffert sich das Aufdach-Photovoltaik-Potenzial Tirols auf rund 6.040 GWh/a⁴.

8.3.3. Solarthermie – Aufdach-Anlagen

Unter der Annahme einer erzielbaren Energieausbeute mittels solarthermischer Aufdach-Anlagen in Höhe von 350 kWh/m² sowie den o.g. Annahmen beziffert sich das Aufdach-Solarthermie-Potenzial Tirols auf rund 600 GWh/a. Dabei ist zu beachten, dass abweichend zu Photovoltaik-Anlagen die Energieerzeugung von solarthermischen Anlagen bei vollen Wärmespeichern nicht weiter genutzt werden kann, wodurch die tatsächliche Nutzung des solarthermischen Potenzials stark von der Nutzung des erzeugten Warmwassers sowie der installierten Speichergröße abhängt.

8.3.4. Photovoltaik – Freiflächen-Anlagen

Aufgrund des unter anderem beschränkten Dauersiedlungsraums, begrenzter landwirtschaftlicher Flächen, Interessen des Tourismus⁴ sowie des Landschaftsschutzes ist ein sorgsamer Umgang mit der Ressource Boden in Tirol anzustreben. Gebäudeintegrierte Solarmodule sollten daher in der Regel Freiflächen-Anlagen vorgezogen werden. Bei der Errichtung von Freiflächen-Anlagen sind vorrangig versiegelte Flächen bzw. Flächen im technisch überprägten Landschaftsraum zu nutzen. Damit sind Freiflächen-Anlagen auch aufgrund der somit meist großen Entfernungen zu Mittelspannungsnetzen mit entsprechenden Leitungskapazitäten nur schwer zu realisieren.

Die im Jahr 2022 in Abstimmung mit verschiedenen Abteilungen des Landes Tirol erstellte Studie „Photovoltaik-Freiflächenpotenzial in Tirol“ (BLOME et al. 2022) bezifferte für Tirol ein Freiflächen-Photovoltaik-Potenzial durch Überdachung von größeren Parkplätzen in Höhe von rund 283 GWh/a, durch Fahrbahnüberdachungen und -einhäusungen in Höhe von rund 246 GWh/a, durch Verkehrsrandflächen in der Höhe von rund 91 GWh/a, durch Nutzung stillgelegter Deponieflächen in Höhe von rund 56 GWh/a sowie durch Anlagen an Lärmschutzwänden, auf Kläranlagen und Brücken in Höhe von rund 50 GWh/a. In Summe beträgt das Potenzial **rund 730 GWh/a** und wurde im Rahmen der gegenständlichen Studie als nutzbares Freiflächen-Photovoltaik-Potenzial berücksichtigt –

⁴ Gegenüber der Studie „Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050“ (Ebenbichler et al. 2021) ist das ausgewiesene Potenzial damit deutlich erhöht, was vor allem auf die technischen Entwicklungen im Modulbereich mit deutlich verbesserten Wirkungsgraden (+ 5%-Punkte) zurückzuführen ist.

wohlwissend, dass das Freiflächenpotenzial bei Nutzung weiterer Räume wie z.B. hochalpiner Flure wesentlich höher ist.

Tab. 3 zeigt Informationen zu drei in Betrieb befindlichen Photovoltaik-Freiflächen-Anlagen in Tirol.

Tab. 3: PV-Freiflächenanlagen in Tirol

Photovoltaik-Freiflächen-Anlage (Betreiber)	Gesamtfläche	Anzahl Module	Leistung	Geschätzter Stromertrag
Assling (EWA Assling)	30.000 m ²	8.058	2.000 kW _p	2,40 GWh/a
Stans (Ökostrom GmbH)	130.000 m ²	21.500	12.000 kW _p	12,00 GWh/a
Jenbach (TINEXT)	-	4.338	3.300 kW _p	1,65 GWh/a

8.4. Biomasse

8.4.1. Biomasse Holz (Pellets, Hackschnitzel, Scheitholz)

In Tirol ist eine Fläche von rund 530.000 ha waldbestanden – dies entspricht rund 41,8 % der Landesfläche (www.waldinventur.at). Rund 347.000 ha davon sind gemäß Österreichischer Waldinventur (ÖWI) als **Ertragswald** klassifiziert⁵ – 73 % hiervon als Wirtschaftswald sowie 27 % als Schutzwald im Ertrag.

Gemäß Mitteilung der Abt. Waldschutz vom 14. November 2023 werden in Tirol jährlich rund 1,8 Mio. m³ Holz mit einem Energieinhalt von rund 4.450 GWh/a energetisch verwertet⁶. Diese Holzmenge setzt sich zusammen aus einerseits aus dem Tiroler Wald gewonnenen Energieholz und andererseits aus Sägenebenprodukten und Holzabfällen importierten Holzes aus der Tiroler Sägeindustrie. Aufgrund der starken Überprägung des heimischen Holzmarktes durch die sehr starke Sägeindustrie und den SNP aus Holzabfällen wird das Nutzungspotenzial bis 2033 gemäß Mitteilung der Abt. Waldschutz vom 14.11.2023 auf rund 2,0 Mio. m³/a ansteigen, das energetische Nutzungspotenzial im Rahmen der gegenständlichen Studie jedoch auf dem heutigen Niveau belassen.

Energiepotenzial von Holz aus dem Tiroler Wald: 2.084 GWh/a

Die energetische Nutzung von in Tirol gewachsenem Holz beschränkt sich auf **Energieholz**, welches zum Zweck der energetischen Nutzung geerntet wird, und **Sägenebenprodukte**, die in der Holzwerkstoff- und Sägeindustrie bei der Verarbeitung von Holz aus dem Tiroler Wald anfallen. Letztere umfassen vor allem Holzabfälle und Stäube. Das durchschnittlich pro Jahr geerntete Tiroler Energieholz weist einen Energiegehalt von rund 1.012 GWh, die energetisch eingesetzten Sägenebenprodukte aus Tiroler Holz einen Energiegehalt von rund 1.072 GWh auf. In Summe beziffert sich das Energiepotenzial des Holzes aus dem Tiroler Wald auf rund 2.084 GWh/a.

⁵ Erhebung 2016 bis 2021.

⁶ Mittelwert der Jahre 2019 bis 2022.

Energiepotenzial von Sägenebenprodukten importierten Holzes: 2.364 GWh/a

Holzabfälle und Stäube (Sägenebenprodukte), welche bei der stofflichen Verwertung von **nach Tirol importiertem Rundholz** anfallen, werden statistisch im Rahmen der Bundesländerenergiebilanzen als Tiroler Holzabfälle geführt. Somit wird statistisch aus Importen eine heimische Ressource, deren Menge stark abhängig von der wirtschaftlichen Entwicklung der derzeit starken Tiroler Holzindustrie ist. Sollte die Bedeutung der Tiroler Holzindustrie abnehmen oder aufgrund wirtschaftlich günstigerer Rahmenbedingungen im Ausland eine Absiedlung der Standorte von Tirol erfolgen, würde das Energiepotenzial von Sägenebenprodukten importierten Holzes abnehmen oder sogar ganz verschwinden.

Da die Entwicklung der Tiroler Holzindustrie bis ins Jahr 2050 nicht absehbar ist, wurde im Rahmen der gegenständlichen Studie von einem Fortbestand des Energiepotenzials aus Sägenebenprodukten importierten Holzes auf gleichem Niveau ausgegangen – rund 2.364 GWh/a.

8.4.2. Biogas

Biogas kann aus verschiedenen Substraten und Ausgangsstoffen gewonnen werden. Im Sinne einer nachhaltigen Biomethanproduktion werden im Rahmen der gegenständlichen Studie ausschließlich Rest- und Abfallstoffe in der Potenzialerhebung berücksichtigt.

Auf Basis verfügbarer Daten des Jahres 2015 haben LINDORFER et al. (2017) das Methanertragspotenzial bundesländerbezogen für Österreich quantifiziert und für die Jahre 2020, 2030, und 2050 prognostiziert. In Abstimmung mit dem Abfallreferat (Land Tirol) und dem Arbeitsbereich für Umwelttechnik der Universität Innsbruck wurde mit Hinblick auf die o.g. Studie das aktuelle Methanertragspotenzial für Tirol neu evaluiert. Angesichts der Unsicherheit über die Entwicklung des Methanertragspotenzials bis zum Jahr 2050 wurde in der gegenständlichen Studie davon ausgegangen, dass ein gleichbleibender Ressourceneintrag vorliegt. Die verfügbaren Mengen an organischen Abfällen, die für die Methangewinnung in Betracht gezogen werden können, werden als weitgehend stabil angenommen. Es wird erwartet, dass Veränderungen in den Abfallströmen moderat ausfallen und das Methanertragspotenziale nicht signifikant beeinflussen werden.

Biogene Abfälle

In der gegenständlichen Studie werden unter „Biogenen Abfällen“ die Fraktionen „Bioabfall aus Haushalt und Gastronomie“, „Bioabfälle aus Industrie und Landwirtschaft“, „Grünabfall“, „Baum und Strauchschnitt“, „Fettabscheiderinhalte“ sowie „Bioabfall im Restmüll“ verstanden.

Für Tirol stehen demnach aktuell rund 18,6 Mio. Nm³ an Methanertrag zur Verfügung. In Summe beziffert sich der der Energiegehalt auf rund 186 GWh/a.

Wirtschaftsdünger

Gemäß Mitteilung des Arbeitsbereiches für Umwelttechnik der Universität Innsbruck wird basierend auf einem aktuell geschätzten Tierbestand in Tirol von rund 135.000 Großvieheinheiten (GVE) und einem Methanertragspotenzial von etwa 289 Nm³ Methan/GVE das Gesamtpotenzial in Summe auf rund 39 Mio. Nm³ beziffert. Unter der Annahme einer 50%igen Nutzung werden in weiterer Folge rund 19,5 Mio. Nm³ als ambitioniertes Methanertragspotenzial angenommen.

Abwasserbehandlung

Gemäß BMLFUW (2014) wird derzeit Klärschlamm durch Deponierung, Verbrennung, Kompostierung etc. nahezu gänzlich verwertet. Im Rahmen der gegenständlichen Potenzialanalyse wird davon ausgegangen, dass das Potenzial des an Kläranlagen anfallenden Klärschlammes durch Neugestaltung der Stoffflüsse und Verwertungswege mobilisiert werden kann.

In 40 von 53 kommunalen Kläranlagen wird Klärgas erzeugt, über Blockheizkraftwerke (BHKW) verstromt und für den Betrieb der Anlagen verwendet. Der Klärschlamm wird derzeit extern, d.h. außerhalb Tirols entsorgt und somit nicht in Tirol energetisch genutzt, jedoch ist dahingehend eine Neuorganisation in Planung. Eine Analyse durch den Arbeitsbereich für Umwelttechnik der Universität Innsbruck weist auf ein mäßiges Optimierungspotenzial hin, da das erzeugte Biogas vor Ort genutzt wird. Das Gesamtpotenzial wird bis 2050 konstant auf rund 8 Mio. Nm³ geschätzt.

Nachwachsende Rohstoffe

Das Rohstoffpotenzial an Nachwachsenden Rohstoffen umfasst im Rahmen dieser Studie Stroh und Ernterückstände aus dem Feldgemüseanbau. Gemäß Mitteilung des Arbeitsbereichs für Umwelttechnik der Universität Innsbruck stehen derzeit insgesamt rund 0,5 Mio. Nm³ Methanertragspotenzial zur Verfügung. Dies entspricht einem Energiegehalt von rund 5 GWh/a.

Tab. 4: Methanertragspotenziale in Tirol 2021 und 2050 (gerundet).

	Ertragspotenzial 2023	Ertragspotenzial 2050
Biogene Abfälle	186 GWh	186 GWh
Wirtschaftsdünger	194 GWh	194 GWh
Abwasserbehandlung	80 GWh	80 GWh
Nachwachsende Rohstoffe	5 GWh	5 GWh
Summe	465 GWh	465 GWh

8.5. Umweltwärme (Grundwasser, Erde, Luft)

„Umweltwärme“ bezieht sich im Rahmen der gegenständlichen Studie auf die Energieträger Luft, Grundwasser und Erdwärme (oberflächennahe Geothermie). Die potenzielle Nutzung der Umweltwärme erfolgt in diesem Kontext über den Einsatz von **Wärmepumpen**.

8.5.1. Luft

Der Wärmeträger Luft steht aufgrund der permanenten Luftbewegung in der Regel überall stets in ausreichender Menge zur Verfügung. Zwar reduziert sich mit abnehmender Lufttemperatur die Effizienz von Luft-Wärmepumpen, jedoch verzeichnete die Luft-Wärmepumpe aufgrund der im Vergleich relativ günstigen Errichtungskosten gegenüber Grundwasser- und Erdwärme-Wärmepumpenanlagen in den vergangenen Jahren eine steigende Beliebtheit.

Aufgrund des de facto unerschöpflichen Energiedargebots aus der Luft wird in gegenständlicher Studie auf die Quantifizierung des nutzbaren Luftwärme-Potenzials verzichtet.

8.5.2. Grundwasser

Das nutzbare Potenzial aus Grundwasser wird im Rahmen der gegenständlichen Studie als das nutzbare Wärmepotenzial aus Grundwasserkörpern Tirols **bis in eine Tiefe von 25 m** unter der Geländeoberkante verstanden, welches mittels Wärmepumpentechnologie gehoben werden kann. Analysiert wurden die ausgedehnten, oftmals zusammenhängenden **Grundwasserkörper in den größeren Tälern Tirols**. Kleinräumige, lokal eng begrenzte Grundwasserkörper sowie jene in Höhenlagen von mehr als 1.400 m ü.d.A. (in der Regel zu geringes Temperaturniveau) wurden nicht berücksichtigt. Die Potenzialermittlung erfolgte über die Berechnung von Grundwasserströmen und Thermalfrontenlängen nach dem Verfahren von INGERLE (1988) unter Berücksichtigung des ÖWAV-Regelblatts 207 (ÖWAV 2009) in Anlehnung an EBENBICHLER et al. (2018).

Das ermittelte nutzbare Grundwasser-Wärmepotenzial beträgt **799 GWh/a**⁷.

8.5.3. Erde

Mittels vertikal abgeteufter Erdwärmesonden bzw. horizontal verlegter Erdkollektoren kann die in der Erde bis in eine Tiefe von rund 400m gespeicherte und sich primär durch die absorbierte Sonnenenergie an der Erdoberfläche im Sommer von oben, zum kleinen Teil aus Grundwasser und aus tieferen Zonen permanent erneuernde Wärme genutzt werden. Wärmepumpen-Anlagen zur Nutzung dieser oberflächennahen Geothermie können an nahezu jeder Stelle und in verschiedenster Tiefenlage installiert werden, weshalb in gegenständlicher Studie darauf verzichtet wird, das theoretisch **nahezu unbegrenzt** vorhandene nutzbare Wärmepotenzial zu quantifizieren.

8.6. Tiefengeothermie

Das Energiepotenzial aus Tiefengeothermie entspringt dem Energiedargebot aus den mehr als 400m tiefen Erdschichten, wo Temperaturen von rund 20 °C und mehr herrschen. Das dort vorhandene Energiepotenzial kann über Tiefbohrungen erschlossen werden – teilweise auch direkt, das heißt ohne Wärmepumpen.

Mit dem „Hot-Dry-Rock-Verfahren“ können beispielsweise Gesteinsschichten in 4.000 bis 5.000 Metern Tiefe quasi als Durchlauferhitzer genutzt werden. Dabei wird Wasser mit hohem Druck in Spalten heißer Gesteinsschichten gepresst, wo es sich erhitzt und zur Erdoberfläche gefördert wird, um dort zur großräumigen Wärmeversorgung und/oder Stromerzeugung genutzt zu werden. Das abgekühlte Wasser wird anschließend wieder in den Untergrund rückgeführt.

⁷ Belastbare Informationen zu tatsächlichen Grundwassertemperaturen im Jahresverlauf liegen lediglich für wenige Stellen vor. Demnach sind die auf Annahmen basierenden Potenziale mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten. Die tatsächlichen nutzbaren Wärmepotenziale können daher vom ausgewiesenen Wert mehr oder weniger deutlich abweichen.

In Tirol wurden vereinzelt Tiefenbohrungen, die jedoch **energetisch nicht genutzt** werden, abgeteuft. Weitere Pläne zur energetischen Nutzung der Tiefengeothermie in Tirol im fortgeschrittenen Stadium sind derzeit nicht bekannt. Im Rahmen der gegenständlichen Studie wird daher auch bis ins Jahr 2050 nicht von einer energetischen Nutzung der Tiefengeothermie in Tirol ausgegangen. Das **nutzbare Potenzial** aus Tiefengeothermie wird daher als **nicht gegeben** gesehen.

8.7. Industrielle Abwärme

Anfallende Abwärme aus industriellen Prozessen, die nicht innerhalb der verursachenden Unternehmen genutzt wird oder werden kann, wird im Rahmen der gegenständlichen Studie als Erneuerbare Energieressource betrachtet. Ihre Nutzung spielt vor dem Hintergrund einer möglichst optimalen kaskadischen Nutzung der heimischen Energieressourcen sowie der anzustrebenden Sektorkopplung unter anderem auch im Bereich der Energieraumplanung eine wichtige Rolle.

Der Abwärmekataster Tirol erhob im Jahre 2009 erstmalig die anfallende nutzbare Abwärme von Industriebetrieben im Tiroler Zentralraum zwischen Kufstein und Telfs (WASSER TIROL et al. 2009). Hierbei wurde ein Abwärmepotenzial in einer Größenordnung von rund 515 GWh/a erkannt. Rund 80% des Potenzials entfiel auf den Nieder-temperaturbereich, rund 20% auf den Hochtemperaturbereich. Mittlerweile wird die damals ausgewiesene Abwärme teilweise genutzt, wie zum Beispiel durch Einspeisung in die Fernwärmeschiene Wattens – Innsbruck oder auch in das Fernwärmenetz Kundl zur Wärmebereitstellung im Gebäudebereich.

Im Rahmen der gegenständlichen Studie wird das industrielle Abwärme-Potenzial aus den noch nicht genutzten Potenzialen des Abwärmekatasters der Teilgebiete Schwaz-Jenbach, Strass-Brixlegg sowie Kufstein West abgeleitet und um zwischenzeitlich weitere erkannte Potenziale zum Beispiel im Rahmen des Projekts „Wie heizt Tirol 2050?“ (THALHEIM 2019) in den Gemeinden Kundl und Wörgl ergänzt.

In Summe lässt sich das aktuell noch nutzbare Industrielle Abwärme-Potenzial auf **rund 139 GWh/a** beziffern.

Trotz eines prognostizierten Wirtschaftswachstums bis zum Jahr 2050 wird das Abwärmepotenzial aufgrund einer vermutlich stärkeren innerbetrieblichen Nutzung der Abwärme in den Produktionsprozessen sowie umgesetzter Energieeffizienzmaßnahmen bis zum Jahr 2050 als konstant angesetzt.

8.8. Brennbare Abfälle

Die mögliche thermische Behandlung von Abfällen zur Wärme- und Stromgewinnung in Tirol war zu Beginn des 21. Jahrhunderts Gegenstand verschiedener Studien und Konzepte – siehe z.B. IUT (2003), RECHNUNGSHOF ÖSTERREICH (2006), TB HAUER (2010).



Energie-Zielszenario
TIROL 2050 energieautonom
Aktualisierung 2024



Gegenwärtig wird der in Tirol anfallende Abfall gemäß BMNT (2018) überwiegend zur Müllverbrennungsanlage Dürnrohr und zur Reststoffverwertung Lenzing gebracht. Der Abfall des Bezirks Reutte wird zum Müllheizkraftwerk der ZAK Kempten/Deutschland gebracht (RECHNUNGSHOF ÖSTERREICH 2017).

Zur methodischen Herangehensweise der Ausweisung des in Tirol verfügbaren Abfall-Potenzials wird auf EBENBICHLER et al. (2018) verwiesen. In dieser Studie wurden tirolweit anfallende und thermisch verwendbare Abfallmengen sowie spezifische Heizwerte der zur thermischen Behandlung geeigneten Müllfraktion analysiert. Für das Jahr 2016 wurde ein nutzbares Wärmepotenzial aus Abfall in Höhe von 549 GWh/a ausgewiesen und basierend auf einem in der Studie hinterlegten Bevölkerungszuwachs bis zum Jahr 2100 (STATISTIK AUSTRIA 2017) das nutzbare Wärmepotenzial mit 628 GWh/a beziffert.

Gemäß aktueller Tiroler Bevölkerungszahlen (STATISTIK AUSTRIA 2022) wurde das Wärmepotenzial aus o.g. Studie abgeleitet und für das Jahr 2021 mit 565 GWh/a beziffert. Bis zum Jahr 2050 wird der Anstieg auf 614 GWh/a hinterlegt.

8.9. Zusammenfassung Energie-Potenziale

Einen Überblick über die **theoretisch** energetisch **nutzbaren Ressourcenpotenziale** Tirols 2050 aus der vorliegenden Studie im Vergleich zur Vorstudie (EBENBICHLER ET AL. 2021) bietet Tab. 5 – Details hierzu finden sich in den Kap. 8.1 bis 8.8.

Tab. 5: Überblick über energetisch nutzbare Potenziale Tirols 2050 aus der vorliegenden Studie sowie der Vorstudie (Ebenbichler et al. 2021).

	2050 (gegenständliche Studie)	2050 (EBENBICHLER et al. (2021))
Wasserkraft*	9.479 GWh	9.442 GWh
Wind	800 GWh	250 GWh
Photovoltaik Dachflächen**	6.040 GWh	4.362 GWh
Photovoltaik Freiflächen***	730 GWh	nicht beziffert
Biomasse Holz (aus Tiroler Wald)	2.084 GWh	1.950 GWh
Biomasse Holz (Sägenebenprodukte aus Import)	2.364 GWh	2.310 GWh
Umweltwärme Grundwasser	799 GWh	799 GWh
Umweltwärme Erde	theor. unbegrenzt	theor. unbegrenzt
Umweltwärme Luft	theor. unbegrenzt	theor. unbegrenzt
Brennbarer Abfall	614 GWh	614 GWh
Solarthermie Dachflächen****	600 GWh	600 GWh
Biogas	465 GWh	415 GWh
Industrielle Abwärme	>139 GWh	>139 GWh
Tiefengeothermie	voraussichtlich nicht genutzt	voraussichtlich nicht genutzt

* begrenzt auf das Wasserkraft-Ausbauziel gemäß Deklaration (AdTLR 2011);
Gesamtpotenzial gemäß ILF (2011) 13.500 GWh/a.

Abweichung der Studie 2021 infolge Rundungen

** 95% der sinnvoll nutzbaren Dachflächen

*** ohne hochalpine Flure (bevorzugt genutzt werden sollen bereits befestigte Flächen)

**** 5% der sinnvoll nutzbaren Dachflächen

9. Energiebedarf

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Energiebedarfs auf Nutz- und Endenergieebene der Sektoren „Gebäude“, „Produktion“ und „Mobilität“ bis zum Jahr 2050 dargestellt. Die für die Berechnungsmethodik hinterlegten Annahmen sowie die benötigten Energieträger werden im gegenständlichen Berichtsteil angeführt.

9.1. Sektor Gebäude

Der Sektor Gebäude und Sonstiges beinhaltet die Entwicklung des Energiebedarfs für den Gebäudesektor sowie die Landwirtschaft und den Dienstleistungsbereich.

9.1.1. Grundlegende Annahmen

Der methodische Ansatz zur Definition und Entwicklung des Tiroler Gebäudebestandes deckt sich mit denen der Erstellung der Energie-Szenarien bei (EBENBICHLER et al. 2021) und EBENBICHLER et al. (2018).

Die Kategorien der analysierten Gebäude werden wie folgt unterschieden:

- **Wohngebäude**
 - Einfamilienhaus und Reihenhaus (EFH) = 1 freistehende bzw. 1 Wohneinheit
 - Mehrfamilienhaus-Klein (MFH-K) = 2 bis 10 Wohneinheiten
 - Mehrfamilienhaus-Groß (MFH-G) = mehr als 10 Wohneinheiten
- **Nicht-Wohngebäude**
 - Mischnutzung (MN) = Gebäude mit mindestens zwei verschiedenen Nutzungsarten, darunter fallen Hotels und ähnliche Gebäude
 - Gewerbe (GW) = alle weiteren betrachteten Nicht-Wohngebäude wie Büros, Verkaufsstätten oder Beherbergung, Kultur, Freizeit etc.
 - Weitere Nutzung (WN) = Industrie- und Lagergebäude.

Als Datenbasis zu den vorhandenen Wohngebäuden in Tirol dient die Gebäude- und Wohnungszählung 2011 (STATCUBE 2018) – siehe Tab. 6 sowie EBENBICHLER et al. (2018).

Der im Szenario veränderte Gebäudebestand basiert auf jährlichen Daten und berücksichtigt die jährlichen Änderungen in Bezug auf abgerissene, neu gebaute und renovierte Gebäude sowie Gebäude mit Wechseln der Heizungs- und Lüftungsanlagen.

Die Abrissrate bestehender Gebäude hängt von der Bauzeit und den Renovierungsarbeiten ab. Es wird davon ausgegangen, dass Gebäude, die nach dem Jahr 2000 gebaut wurden, bis 2050 nicht abgerissen, sondern nur renoviert werden, da sie von besserer Qualität und damit längerer Lebensdauer sind.

Die neu gebaute Fläche wird Jahr für Jahr zur Gesamtgebäudefläche hinzugerechnet.

Tab. 6: Datenbasis Wohngebäude

Bauperiode	EFH		MFH-K		MFH-G	
	Anzahl Gebäude	Konditionierte Brutto-Grundfläche gesamt [m ²]	Anzahl Gebäude	Konditionierte Brutto-Grundfläche gesamt [m ²]	Anzahl Gebäude	Konditionierte Brutto-Grundfläche gesamt [m ²]
bis 1919	11.632	1.695.808	7.884	2.800.633	326	688.624
1920-1944	4.070	566.616	4.407	1.543.166	198	273.261
1945-1960	8.515	1.193.925	7.213	2.213.880	302	498.831
1961-1970	10.824	1.614.918	9.660	3.054.236	554	1.107.504
1971-1980	12.362	1.944.541	9.299	3.088.023	819	1.695.828
1981-1990	13.518	2.246.363	7.039	2.589.251	539	1.039.070
1991-2000	14.619	2.516.036	5.618	2.437.004	525	942.309
2001-2010	13.841	3.092.802	7.078	3.530.190	773	1.780.798
2011-2021	15.378	3.436.446	7.865	3.922.433	858	1.978.664
Summe	104.759	18.307.455	66.063	24.178.816	4.894	10.004.889

Tab. 7: Datenbasis Nicht-Wohngebäude.

Bauperiode	MN		GW		WN	
	Anzahl Gebäude	Konditionierte Brutto-Grundfläche gesamt [m ²]	Anzahl Gebäude	Konditionierte Brutto-Grundfläche gesamt [m ²]	Anzahl Gebäude	Konditionierte Brutto-Grundfläche gesamt [m ²]
Bis 1919	1.249	1.436.493	1.656	1.895.784	629	556.999
1920-1944	464	411.116	442	432.326	354	336.576
1945-1960	772	816.828	964	1.100.688	676	698.395
1961-1970	1.369	1.570.413	1.213	1.449.529	803	1.085.271
1971-1980	1.947	2.367.473	1.373	2.542.781	935	1.551.053
1981-1990	1.376	1.931.543	1.216	1.549.014	1.014	1.526.259
1991-2000	670	482.199	1.101	983.355	867	804.764
2001-2010	750	1.185.564	1.269	2.271.006	896	1.164.974
2011-2021	833	1.317.293	1.396	2.498.107	996	1.294.415
Summe	9.430	11.518.922	10.630	14.722.590	7.170	9.018.706

Es wird davon ausgegangen, dass jedes Jahr 1 % des Tiroler Gebäudebestandes (sowohl Wohn- als auch Nichtwohngebäude) umfassend saniert und 1 % pro Jahr teilerneuert wird. Da keine Daten über die Sanierungsrate für die verschiedenen Gebäudekategorien vorliegen, wird diese Zahl auf Basis des Raumheizenergiebedarfs und der Bauzeit definiert: Die Gebäude mit der höchsten Sanierungsrate sind die ältesten Gebäude mit der am wenigsten effizienten Gebäudehülle. Gebäudeklassen, die erst kürzlich renoviert wurden, werden weniger häufig renoviert. Um sowohl Komplettsanierungen als auch Teilsanierungen zu berücksichtigen, wird angenommen, dass drei Teilsanierungen einer Komplettsanierung entsprechen. Unter diesen Annahmen erhält man eine entsprechende äquivalente Gesamtsanierungsrate von 1,33 %/a.

Für alle Bauzeiträume nach 2015 wird die äquivalente Gesamtsanierungsrate auf 0 % festgelegt – nicht, weil sie nicht von Sanierungsmaßnahmen betroffen sind, sondern weil solche Maßnahmen ihren Energiebedarf nicht wesentlich beeinflussen würden.

Es wird davon ausgegangen, dass eine gleichwertige umfassende Sanierung nicht nur die Verbesserung der Gebäudehülle, sondern auch den Austausch der Heizungs- und Warmwasseranlagen umfasst.

Als notwendige Voraussetzung für eine Sanierung wurde festgelegt, dass diese nur erfolgen darf, wenn die Sanierungsqualität tatsächlich besser ist als die des Bestandsgebäudes und wenn in den letzten 25 Jahren keine Sanierung oder Erneuerung der Heizungsanlage stattgefunden hat.

Die Ermittlung der jährlich sanierten Bruttogeschossfläche erfolgt daher wie folgt:

1. Ermittlung des Anteils der bestehenden Bruttogeschossfläche für jede Bauzeit, der die unten beschriebenen Kriterien erfüllt.
2. Bestimmung der tatsächlich sanierten Bruttogeschossfläche unter Verwendung der äquivalenten Gesamtsanierungsrate.

Neben der umfassenden Sanierung (d.h. Verbesserung der Gebäudehülle und Austausch des Heizungs- und Warmwassersystems) wird im verwendeten Modell auch der Austausch der Heizungsanlage als Einzelmaßnahme berücksichtigt. Im Modell für das Szenario 2050 wird der Austausch der Heizungsanlage nur dann in Betracht gezogen, wenn in den letzten 25 Jahren keine andere Maßnahme durchgeführt wurde. Die durchschnittliche Austauschrate der Heizungsanlage in Wohngebäuden wird auf etwa 3,3% pro Jahr geschätzt. Analog zur Vorgehensweise bei den zu sanierenden Flächen wird die Fläche, die durch einen Austausch der Heizungsanlage gekennzeichnet ist, wie folgt ermittelt:

1. Festlegung der Fläche für jede Bauzeit, die die Kriterien erfüllt (keine Maßnahme in den letzten 25 Jahren) und somit für einen Heizungs austausch zur Verfügung steht.
2. Ermittlung der Bruttogeschossfläche, für die die Heizungsanlage im Modell ausgetauscht werden soll (Einzelmaßnahme).

9.1.2. Anpassungen

Im Vergleich zum Energie-Ziel-Szenario des Jahres 2021 (EBENBICHLER ET AL. 2021) wurden folgende wesentliche Anpassungen vorgenommen:

- > Der tatsächliche Beginn des Szenarios zur Dekarbonisierung des Gebäudebestands wurde verschoben, um die Leerstandsphase der letzten Jahre zu berücksichtigen.
- > Als Basis für das Szenario wurden statistische Daten aus dem Jahr 2021 verwendet (STATISTIK AUSTRIA 2022).
- > Die sich daraus ergebenden Wechselraten von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage, die notwendig sind, um den Ausstieg aus fossil befeuerten Heizsystemen bis 2050 zu erreichen, mussten im letzten Jahr aufgrund der kürzeren zur Verfügung stehenden Zeit erhöht werden, um die in den letzten Jahren installierten Systeme auslaufen zu lassen.

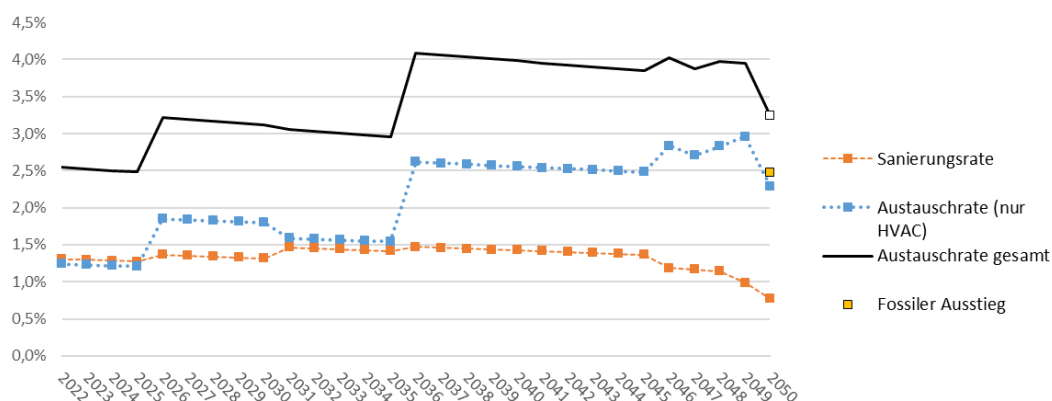


Abb. 3: Sanierungsrate und Austauschrate im Szenario (Detail Wohngebäude).

Um die Relevanz der Gebäudehüllensanierung für die Dekarbonisierung des Gebäudebestands zu verdeutlichen, wurden zwei unterschiedliche Szenarien hinsichtlich des Energiestandards für neue und sanierte Gebäude betrachtet, die im Szenario in Bezug auf den jährlichen Heizwärmebedarf umgesetzt wurden.

Ein Referenz- (Ref) Szenario berücksichtigt die aktuellen Gebäudequalitäten für Neubau und Sanierung, die in den letzten sechs Monaten seit Einführung der Energieausweisdatenbank in Tirol gemäß den von Energieagentur Tirol zur Verfügung gestellten Daten beobachtet wurden.

Ein Best-Case-Szenario berücksichtigt die Anwendung strengerer Vorschriften für den Neubau und die Renovierung von Gebäuden und folgt damit den Annahmen der vorangegangenen Studie (Neubauqualität in Passivhausbauweise, HWB bei der Sanierung um 15 – 50% kleiner als heute). Abb. 4 zeigt die Annahmen für beide Szenarien.

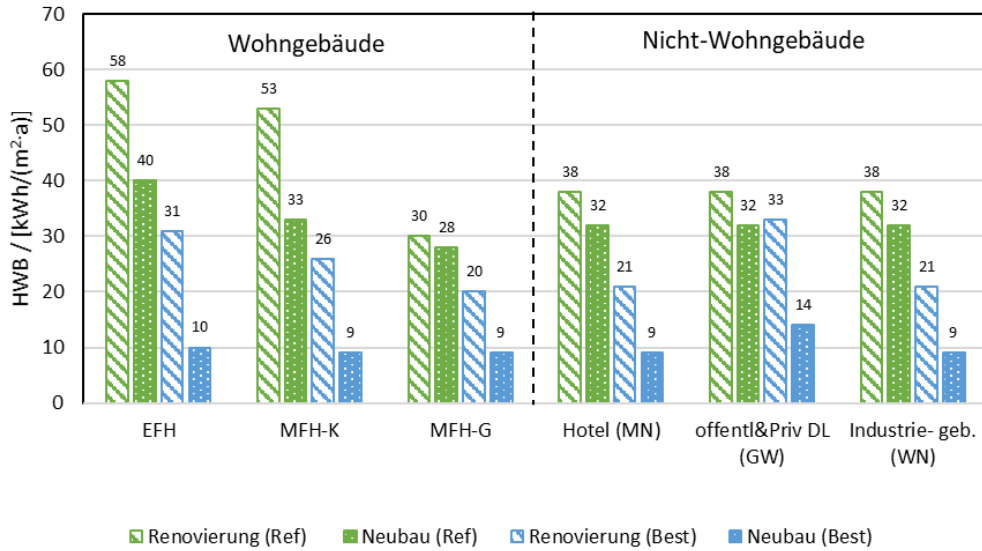


Abb. 4: Heizwärmebedarfe (HWB) der untersuchten Gebäudekategorien (nach Renovierung und für Neubauten), die im Modell für das Referenz- und das Best-Case-Szenario verwendet wurden.

Die Bevölkerungsentwicklung in Tirol wurde auf Basis der aktuell verfügbaren Statistiken (STATISTIK AUSTRIA 2022) angenommen (Abb. 5). Die Entwicklung des Gebäudebestandes steht in direktem Zusammenhang mit der Bevölkerungsentwicklung.

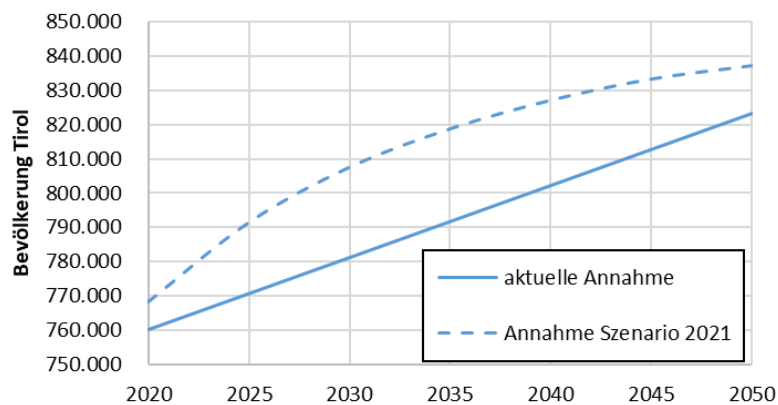


Abb. 5: Angenommene Bevölkerungsentwicklung in Tirol bis 2050.

9.1.3. Nutzenergiebedarf 2021 und 2050

Abb. 6 zeigt die Veränderung des Nutzenergiebedarfs der Gebäude für Raumheizung, Warmwasserbereitung, Haushalts- und Betriebsgeräte. Es zeigt sich insbesondere eine Verringerung des Energiebedarfs für Raumwärme, die durch die Renovierung der bestehenden Gebäude und den Ersatz abgerissener, wenig effizienter Gebäude durch Gebäude mit besserer Qualität erreicht wird. Beim Energiebedarf zur Warmwasserbereitung zeigt sich diese Verbesserung nicht, da dieser von den Anforderungen der (wachsenden) Bevölkerung abhängt und durch die Installation von Systemen mit besserer Erzeugungseffizienz verringert werden kann. Der sinkende Haushaltsstrombedarf ergibt sich aus der hinterlegten Annahme einer Effizienzsteigerung um rund 1 % pro Jahr.

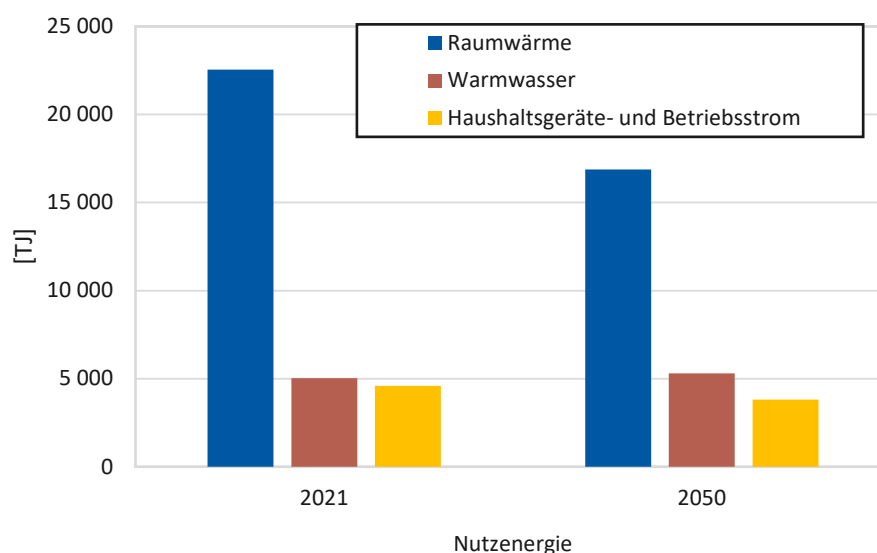


Abb. 6: Nutzenergie, die für Raumheizung, Warmwasserbereitung, Haushaltsgeräte und Betriebsstrom (z. B. für öffentliche Gebäude) in den Jahren 2021 und 2050 gemäß Referenz-Szenario benötigt wird.

9.1.4. Eingesetzte Technologien und Wirkungsgrade 2050

Die Umstellung der Haustechnik beinhaltet den Wechsel des im Gebäude verwendeten Heizungs- und Warmwasserbereitungssystems. Um den Ausstieg aus fossilen Systemen zu erreichen, wurde im Rahmen der gegenständlichen Studie angenommen, dass beginnend mit dem Jahr des zugrundeliegenden Datensatzes keine Gas-, Kohle- oder Ölkessel mehr installiert werden. Je nach Gebäudetyp und je nachdem, ob es sich um ein bereits bestehendes oder ein neu errichtetes Gebäude handelt, werden unterschiedliche Anteile an Energieträgern berücksichtigt. Es wird also das 2024 beschlossene EWG UND die vollständige Umstellung auf Erneuerbare Energieträger beim Austausch von bestehenden Heizungsanlagen für den gesamten Betrachtungszeitraum angenommen.

In Anbetracht des Übergangs zu erneuerbaren Energiequellen und der umfangreichen Möglichkeiten, die die Verbesserung dieser Technologien bietet, wird davon ausgegangen, dass Wärmepumpen und Fernwärmesysteme

den größten Anteil der Energieträger ausmachen. Insbesondere wird davon ausgegangen, dass die Wärmepumpe in ländlichen Einfamilienhäusern am häufigsten zum Einsatz kommt, während Fernwärme in Mehrfamilienhaus eine größere Rolle spielen wird. Diese Hypothese wird durch die Tatsache gestützt, dass es derzeit auf dem Markt kaum Lösungen für die Substitution dezentraler traditioneller fossiler Systeme durch Wärmepumpen gibt. Andererseits werden Biomassekessel eher in sanierten Mehrfamilienhäusern als in Neubauten zum Einsatz kommen, deren bessere Hüllenqualität den Einsatz von Wärmepumpen erleichtert.

9.1.5. Entwicklung des Endenergiebedarfs und eingesetzter Energieträger von 2021 bis 2050

Durch die Maßnahmen zum Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger und die fortschreitende Sanierung des Gebäudebestandes sinken der Anteil fossiler Energieträger und der gesamte Endenergiebedarf sukzessive. Abb. 7 zeigt die Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs des Gebäudesektors, der die Energie für Raumheizung, Warmwasserbereitung und Haushaltsgeräte (mit Heizwärmebedarf gemäß Referenz-Szenario) umfasst. Ein kleiner Teil der thermischen Hochtemperaturenergie, der mechanischen Energie und der Energie für die Mobilität sind ebenfalls enthalten, da sie mit dem Sektor Landwirtschaft verbunden sind. Die einzelnen Beiträge sind Tab. 8 zu entnehmen.

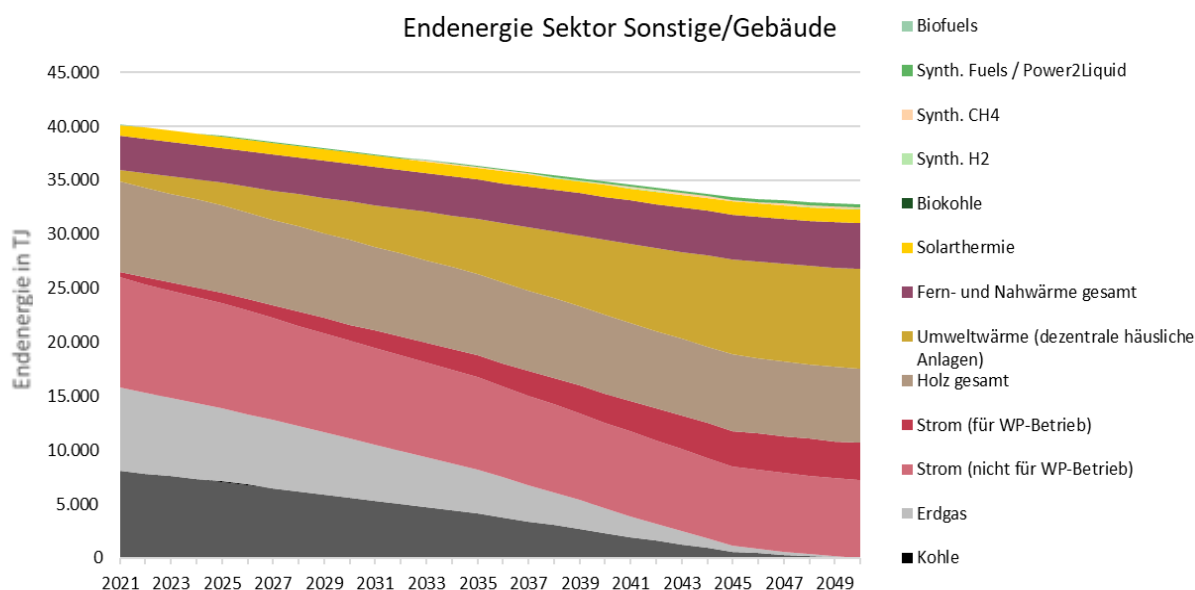


Abb. 7: Entwicklung des Endenergiebedarfs des Gebäudesektors mit Heizwärmebedarf gemäß Referenz-Szenario.

Abb. 8 zeigt die Energieträgerverteilung des Gebäudeenergiebedarfs in den Jahren 2021 und 2050 für die beiden Szenarien Referenz und Best-Case. Das Balkendiagramm zeigt lediglich die Beiträge, die für Haushaltsstrom und -geräte (d.h. Licht und Kommunikation), Raumheizung (d.h. Wärme<200°C) und Energie für die Warmwasserbereitung (d.h. Warmwasser) relevant sind. Relevant ist der Unterschied in der Endenergienachfrage, da er sich di-

rekt auf den Investitionsaufwand für den Übergang des Energiesektors auswirkt. Diese Endenergie muss schlussendlich aus erneuerbaren Energieträgern gedeckt werden. Eine größere Sanierungstiefe bedeutet also einen geringeren Zuwachs an Energieerzeugung durch Erneuerbare Energieträger.

Eine detailliertere Darstellung des Beitrags der einzelnen Energieträger in den Jahren 2021 und 2050 enthält Abb. 9. Sie zeigt den Anteil der benötigten Energieträger zur Deckung des analysierten Anteils am Energiebedarf.

Tab. 8: Beiträge der verschiedenen Verwendungszwecke des Endenergiebedarfs im Sektor Gebäude (mit Referenz-Heizbedarf) in den Jahren 2021 und 2050.

	Endenergiebedarf 2021			Endenergiebedarf 2050		
	[TJ]	[GWh]	[%]	[TJ]	[GWh]	[%]
Licht und Kommunikation	4.602	1.278	11,5	3.817	1.060	11,6
Warmwasser	5.467	1.519	13,6	5.864	1.629	17,9
Wärme <200°C	26.264	7.296	65,4	19.504	5.418	59,5
Wärme >200°C	2.427	674	6,0	2.674	743	8,2
Mechanische Arbeit	851	236	2,1	785	218	2,4
Mobilität	534	148	1,3	142	39	0,4
Gesamt Endenergiebedarf	40.144	11.151		32.787	9.108	

Um zu verhindern, dass eine Überbewertung der Einsparungen des Gebäudesektors erfolgt, wird in gegenständlicher Studie die konservative Einschätzung getroffen, dass sich zukünftige Sanierungen bzw. Neubauten am Referenzszenario orientieren, auch wenn theoretisch weitere Einsparungen (BEST-Szenario) möglich wären.

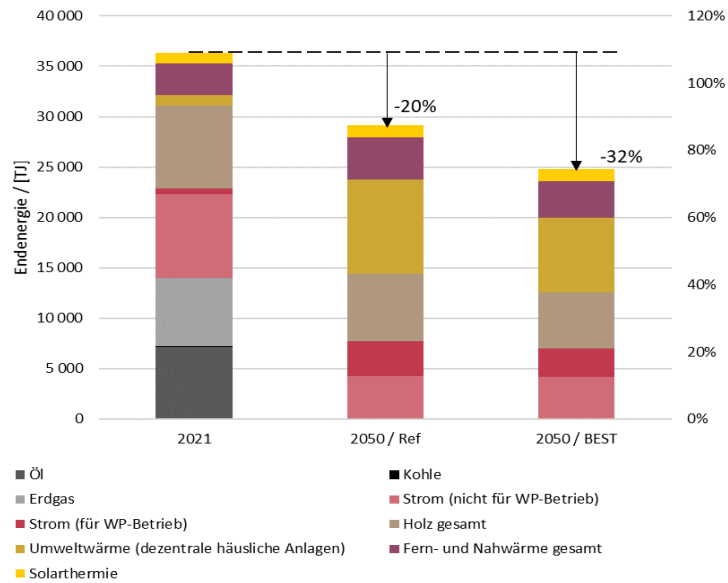


Abb. 8: Energieträgerverteilung 2021 und 2050 für die beiden untersuchten Szenarien.

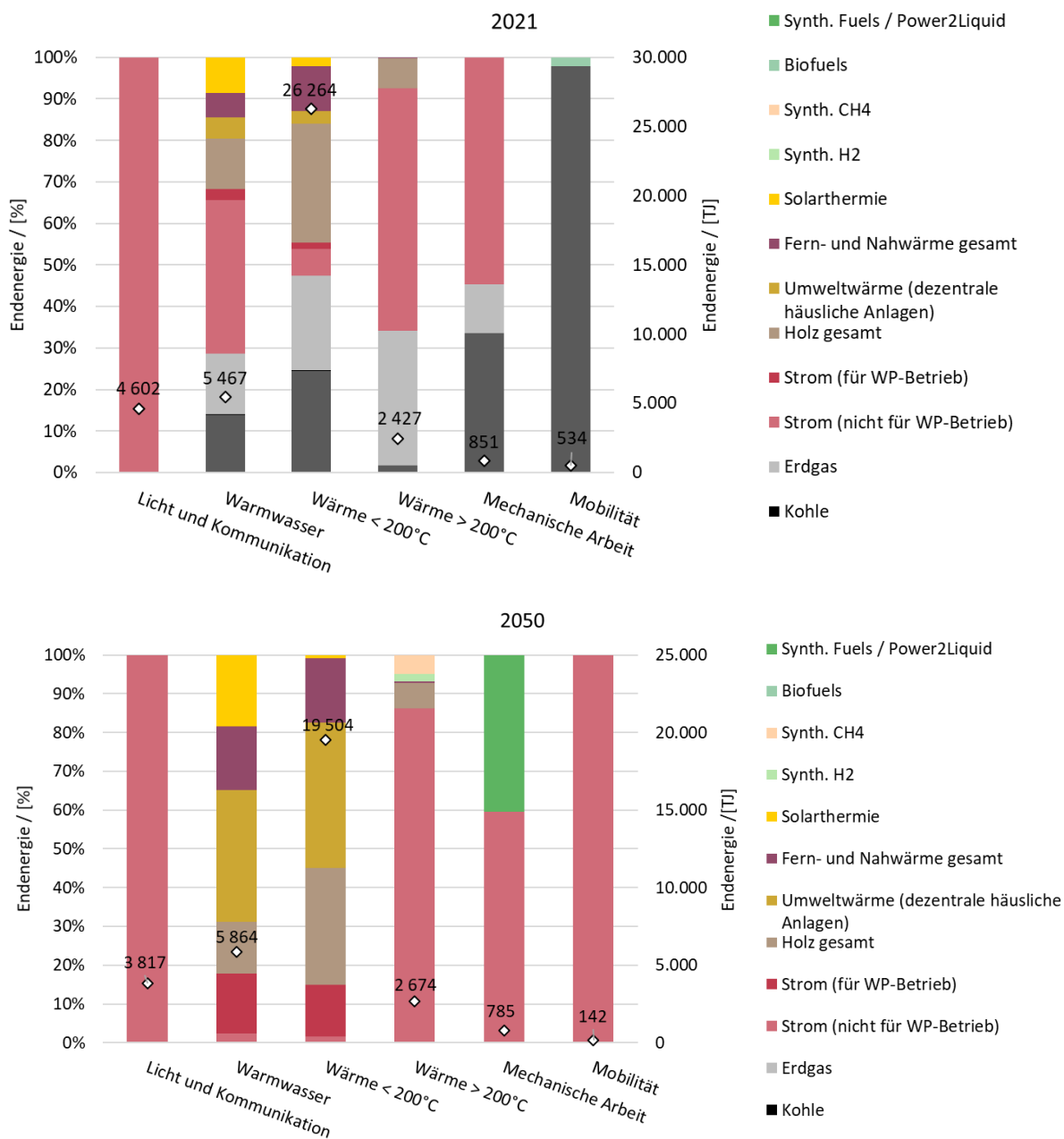


Abb. 9: Beitrag der einzelnen Energieträger zur Deckung des Endenergiebedarfs (gemäß Ref-Szenario für Gebäudesanierungsqualität).

9.2. Sektor Produktion

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Nutz- und Endenergiebedarf Tiroler Produktionsbetriebe angeführt. Zudem werden Informationen hinsichtlich energiestrategischer Zielsetzungen und effizienzsteigernde Maßnahmen beschrieben.

9.2.1. Ergebnisse aus Gesprächen mit Tiroler Leitbetrieben

In den letzten Jahren haben sich die technischen, wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen deutlich verändert. Um trotz dieser Veränderungen den künftigen Energiebedarf für Tirol realistisch einschätzen zu können, wurden im Rahmen der gegenständlichen Studie acht ausgewählte größere Unternehmen in Tirol interviewt. Der Schwerpunkt der Befragungen lag auf der Wasserstoffstrategie der Unternehmen. Es wurden zudem Fragen zu weiteren Energiestrategiezielen, der Möglichkeit zur Defossilisierung und dem politischen Stimmungsbild gestellt.

Wasserstoffstrategie

Von den acht befragten Unternehmen geben drei an, entweder bereits eine Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyseuren an ihrem Standort in Tirol installiert zu haben oder dies bis 2030 umsetzen zu wollen. Die installierten Leistungen werden bis 2025 mit 9 MW abgeschätzt. Die genannten Werte für Wasserstoff scheinen jedoch nicht in der Übersicht für die Endenergie-Berechnungen auf, sondern tauchen unmittelbar als Strombedarf auf. Dies führt zu einer Reduktion des Gasbedarfs auf Endenergieebene. Dieser Effekt resultiert aus der direkten Strombezugsweise am Standort der Unternehmen, also dezentral. Aufgrund dieser dezentralen Produktion ist es möglich, auch die am Standort erzeugte Abwärme zu nutzen. Es wird außerdem angenommen, dass dieser Wasserstoff nicht in Leitungen transportiert wird, sondern größtenteils direkt am Standort verbraucht wird.

Die restlichen fünf Unternehmen geben an, grundsätzlich die Möglichkeit zu sehen, Wasserstoff als Substitution fossilen Gases nutzen zu können. Allerdings sind keine konkreten, innerbetrieblichen Ziele festgelegt, ob oder bis wann eine Substitution stattfinden sollte. Ein Unternehmen äußerte Bedenken hinsichtlich möglicher negativer Auswirkungen auf die Produktqualität.

Grundsätzlich gäbe es in Tirol die Möglichkeit für einen parallelen Transport von Wasserstoff und Methan in örtlich abgegrenzten Netzgebieten. Eine weitere Option sei das Wasserstoff-Blending, wobei Wasserstoff dem bestehenden Gas im Gasnetz beigemischt werden kann. Rund 99% der bestehenden Pipelines in Tirol sind für den Transport von Wasserstoff bereits geeignet.

Weitere Energiestrategieziele

Wiederum drei der acht befragten Unternehmen haben sich konkrete energiestrategische Ziele für die nächsten Jahre gesetzt. Ein Unternehmen strebt beispielsweise bis 2030 eine CO₂-Neutralität und bis 2050 eine Klimaneutralität an. Ein weiteres Unternehmen plant, die spezifischen CO₂-Emissionen bis 2030 um 30% im Vergleich zu 2012 zu senken. Andere Unternehmen setzen keine übergeordneten Ziele, sondern verfolgen konkrete Maßnahmen, wobei der häufige Zubau von PV-Anlagen erwähnt wird und die Reduktion des aktuellen Gasbedarfs.

Politisches Stimmungsbild

Die Unternehmen äußerten gemischte Ansichten zum Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur und der politischen Unterstützung. Ein Unternehmen fordert einen externen Impuls für den Wasserstoffausbau aufgrund fehlender Förderung und betont die Notwendigkeit, den Infrastrukturausbau zu begünstigen. Andere Unternehmen loben erfolgreiche Förderprogramme wie KPC und NEFI, weisen jedoch auf langwierige Genehmigungsprozesse hin. Sie bevorzugen pragmatische Ansätze und klare politische Rahmenbedingungen. Kritik wird an hochbürokratischen Prozessen sowie Problemen mit Anrainern geübt. Einige Unternehmen wünschen sich einen Recycling-Bonus anstelle von CO₂-Zertifikaten und sehen die Produktion von Wasserstoff bei entsprechender Förderung als realistisch an. Die Zertifizierung von Altholz als "regenerativ" wird ebenfalls erwähnt. Die Betonung liegt auf pragmatischen Lösungen, klaren politischen Vorgaben und offener Kommunikation für einen effektiven Wasserstoffausbau.

9.2.2. Grundlegende Annahmen

Energiebedarfsentwicklung

Nach Rücksprache mit der Tiroler Wirtschaftskammer und Vergleichsrechnungen über die letzten Jahre bleibt die wirtschaftliche Entwicklungsprognose bei einer nominalen Steigerung von 1,5 % pro Jahr. Aufgrund von betrieblichen Umstrukturierungen eines energieintensiven Großbetriebes, die ab 2026 in Kraft treten, wird sich der bisherige Nutzenergiebedarf dieses Sektors reduzieren. Ansonsten werden keine wesentlichen Änderungen in der **Industriestruktur** und keine größere Ansiedelung weiterer energieintensiver Betriebe in Tirol erwartet. Die daraus resultierende Nutzenergie wird nicht gleichermaßen mit der wirtschaftlichen Entwicklungsprognose steigen. Die Prognose der **Nutzenergieentwicklung** wird somit mit 0,8% pro Jahr angenommen.

Energieproduktivität

Im Vergleich zur Studie ‚Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050 mit Zwischenziel 2030‘ (EBENBICHLER et al. 2021) wird die aktuelle Energieeffizienz in allen Bereichen um ein Prozentpunkt erhöht. Dies ergibt sich aus einer Berechnung zur Energieproduktivität über den Zeitraum von 2016 (Daten der vorgegangenen Studie) bis 2021 (Datengrundlage der gegenständlichen Studie). Abb. 10 zeigt die Energieproduktivität in der Vergangenheit (orange) und als Prognose bis 2050 (grün) für Tirol. Dabei wird die abgesetzte Produktion der Tiroler Industrie mit dem Energiebedarf der Tiroler Industrie ins Verhältnis gesetzt. Die **Energieproduktivität** soll angeben, wie viel Geldeinheit wirtschaftlicher Leistung pro Einheit eingesetzter Energie erzeugt wird. Daher wird sie als Maß für die Effizienzsteigerung im Umgang mit Energieressourcen betrachtet. (UMWELTBUNDESAMT 2024).

Von 2016 bis 2022 ist die Energieproduktivität in Tirol von 1,10 Mio. EUR/TJ bzw. 3,96 Mio. EUR/GWh auf 1,11 Mio. EUR/TJ bzw. 4,0 Mio. EUR/GWh gestiegen, was eine Erhöhung von etwa einem Prozent ergibt (jährliche Steigerung etwa 0,1 %). Dieser Prozentpunkt wurde wie beschrieben auf die aktuellen (2021) Wirkungsgrade aller Technologien im Vergleich zum Jahr 2016 gelegt. Die Berechnung hat somit lediglich eine reduzierende Wirkung auf die Nutzenergie. Die gestrichelten Linien im Diagramm geben die lineare Entwicklung der Vergangenheit (orange) und Prognose (grün) wider. Um demnach die Ziele von 2050 zu erreichen, ist eine absolute Steigerung der Energieproduktivität von 0,6 Mio. EUR/TJ (2,16 Mio. EUR/GWh) bzw. eine durchschnittliche jährliche Steigerung von etwa 1,6 % nötig. Der Unterschied ist deutlich an den linearen (gestrichelten) Funktionen in der Abbildung erkennbar.

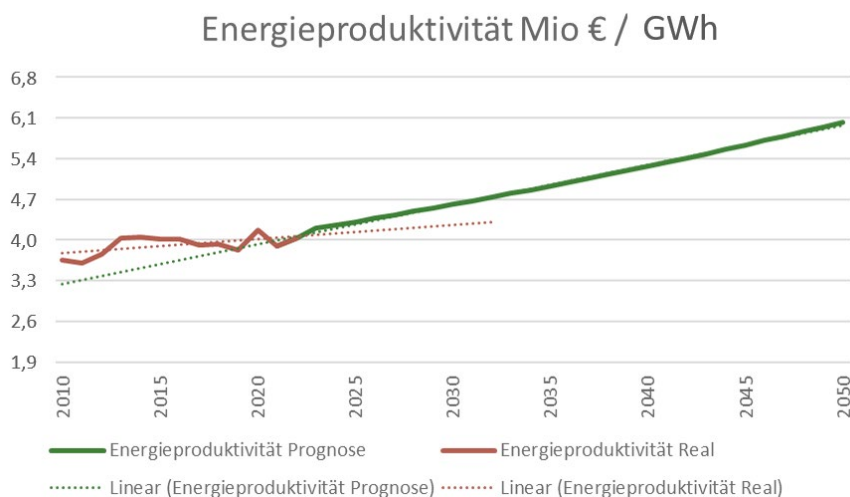


Abb. 10: Energieproduktivität - Vergangenheit (orange) und Prognose (grün).

Umstellung auf erneuerbare Energieträger in der Produktion

Ein Schritt, welcher die Effizienzsteigerung erleichtern soll, ist der Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energieträger. Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2050 das gesamte Energiesystem auf fossilfreie Energieträger umgestellt wird. Dieser wird – analog zum Szenario des Jahres 2021 – mit ambitionierten Austauschraten angesetzt. Mit der Umstellung von eingesetzten fossilen Energieträgern auf erneuerbare Alternativen wird im Modell ab 2021 begonnen. Die Austauschraten werden im gegenständlichen Szenario stufenweise erhöht und alle fünf Jahre verdoppelt. Um bis 2050 annähernd 100 % regenerativen Energieeinsatz zu erreichen, beginnt die „Soll“-Austauschrate von 2021 bis 2025 mit 1,2 % und endet 2045 bis 2049 mit 38 %. Im Jahr 2050 werden noch die verbleibenden fossilen Energieträger von etwa 22 TJ umgestellt. Bei der Kategorie **Standmotoren** wird hauptsächlich auf Strom umgestellt. Jene Standmotoren, welche Diesel als Energieträger verwenden, sollen auf „Syn-Fuels“ umgestellt werden, da sich Standmotoren oft an netzfernen Baustellen befinden und daher ein Elektromotor keine Alternative darstellt. Bei der **Dampferzeugung / Prozessen kleiner 200 °C** werden fossile Energieträger ausschließlich auf Strom umgestellt, was als realistisch betrachtet wird, da Dampferzeuger mit über 400 kW Leistung technologisch schon jetzt möglich sind. Für viele **Industrieofenprozesse / Prozesse größer 200 °C** wird auch in Zukunft Strom als Energielieferant nur bedingt möglich sein, deshalb werden Öl und Gas auf regenerative Gase wie Biogas, Wasserstoff und gegebenenfalls synthetisches Methan umgestellt. Synthetisches Methan und Biogas werden dabei vorrangig eingesetzt, da die Speicherung gemäß Studie ‚Energiespeicher Tirol 2050‘ (EBENBICHLER et al. 2023) für Tirol leichter umsetzbar ist. Kohle, welche unter anderem als Reduktionsmittel verwendet wird, wird durch Bio-Kohle ersetzt.

Größerer Hemmfaktor für die Umstellung ist derzeit immer noch der große Unterschied zwischen Strompreisen und den im Vergleich günstigen fossilen Brennstoffen. Hinzu kommt die Ungewissheit über einen Ausbau von Stromnetzen und alternativen Energien auf der Erzeugerseite.

Effizienzsteigerung in der Produktion

Auch die Effizienzsteigerung startet in der Berechnung im Jahr 2021 (bzw. werden bereits durchgeführte Maßnahmen fortgesetzt) und wird daher ebenfalls als ambitioniert angesehen. Gleich wie bei der Szenarienberechnung 2021 werden für jeden Prozess maximale Wirkungsgradsteigerungen angenommen (Tab. 9). Allerdings wurden die maximal erreichbaren Wirkungsgrade auf jeden Energieträger angepasst (Tab. 10). Im Folgenden sind die maximalen jährlichen Effizienzsteigerungen sowie eine kurze Begründung auf Basis EBENBICHLER et al. (2021) wiedergegeben.

- > **Standmotoren:** maximale jährliche Effizienzsteigerung 2,0 %. Ein hoher Anteil wird bereits elektrisch betrieben. Ein kontinuierlicher Austausch würde nicht ausreichen, um das Ziel von bis zu 2,0%/a zu erreichen. Die Optimierung der angeschlossenen Systeme wie zum Beispiel Druckluft, Pumpen- bzw. Ventilatorbetrieb kann einen wesentlichen Beitrag bringen.
- > **Industrieöfen / Prozesse > 200 °C:** maximale jährliche Effizienzsteigerung 0,8 %. Kann durch sukzessiven Austausch auf modernere, effektivere Systeme erreicht werden. Wo es technologisch möglich ist, ist eine Umstellung auf strombetriebene Systeme durchzuführen. Zusätzliche Maßnahmen im Betrieb wie Sanierung / Optimierung der wärmeleitenden Systeme bzw. Wärmerückgewinnungs- und Dämmungsmaßnahmen sind ebenfalls erforderlich.
- > **Dampferzeugung / Prozesse < 200 °C:** maximale jährliche Effizienzsteigerung 1,5 %. Dies ist erreichbar, wenn die künftigen Dampfkessel beim Austausch (Lebensdauer: 15 bis 25 Jahre) von Öl- bzw. Gas- auf Strombetrieb umgestellt und veraltete, ineffiziente Dampfleitungen optimiert werden.

Tab. 9: Verbesserung der Wirkungsgrade für Industrieprozesse.

Zeitraum	Werte absolut	Erläuterung / Annahme
2021-2025	mindestens 0,6%, sonst Hälfte der Maximalwerte	Effizienzgesetz wird weiterhin eingehalten, allerdings erste Steigerungen durch Marktanforderungen.
2025-2030	+1/3 von Maximalwert	„Einfache Maßnahmen“ werden schnell durchgeführt.
2030-2045	-1/3 von Maximalwert, mindestens aber 0,6%	Schnelle Maßnahmen sind alle durchgeführt; es besteht noch kein Zeitdruck.
2045-2050	+1/3 von Maximalwert	Zeitdruck, um Endziel zu erreichen

Tab. 10 gibt Aufschluss über die in der Industrie verwendeten Energieträger. Der Wirkungsgrad der fossilen Energieträger wird nicht gesteigert, da davon ausgegangen wird, dass es keinen Austausch oder Erneuerung bestehender Anlagen mehr geben wird. Speziell bei den Standmotoren kommen einige Energieträger nicht zur Anwendung, da für mechanische Arbeit hauptsächlich Gase, Öle oder Strom verwendet werden. Für die restlichen Energieträger wurden die maximalen Wirkungsgrade an die entsprechenden Prozesse angepasst.

Tab. 10: Maximale Wirkungsgrade der einzelnen Bereiche nach Energieträger aufgeschlüsselt.

Wirkungsgrade	Dampferzeuger		Industrieöfen		Standmotoren	
	aktuell	Maximum	aktuell	Maximum	aktuell	Maximum
Kohle	46%	-	46%	-	-	kein Bedarf
Öl	60%	-	60%	-	31%	-
Gas	60%	-	60%	-	31%	-
Strom	79%	max 80%	79%	max 85%	61%	max 85%
Fernwärme	66%	max 70%	66%	max 70%	-	kein Bedarf
Holz	51%	max 65%	51%	max 65%	-	kein Bedarf
Biog. Brenn- / Treibstoffe	53%	max 65%	53%	max 65%	31%	kein Bedarf
Brennbare Abfälle	56%	max 65%	56%	max 65%	-	kein Bedarf
Umgebungswärme	-	kein Bedarf	-	kein Bedarf	-	kein Bedarf
Regeneratives Gas	60%	max 80%	60%	max 65%	60%	max 65%
Biokohle	-	kein Bedarf	46%	max 46%	-	kein Bedarf
Syn. Fuels	-	kein Bedarf	-	kein Bedarf	31%	max 35%

9.2.3. Nutzenergiebedarf 2021 und 2050

Die Grundlage für die vorliegende Berechnung dieses Szenarios bildet die Nutzenergieanalyse aus dem Jahr 2022 mit Daten für das Jahr 2021. Die Berechnungen werden gemäß den in Kap. 9.2.2 beschriebenen Methoden durchgeführt. Dabei ist wichtig zu erwähnen, dass Energieträger, die in der Nutzenergieanalyse von 2021 nicht aufscheinen, auch nicht simuliert werden. Es gibt aber beispielsweise bei Scheitholz einen Bedarf für das Jahr 2016, laut STATISTIK AUSTRIA aber nicht mehr in 2021, deshalb wird dies nicht mehr in der Hochrechnung berücksichtigt. Abb. 11 stellt den simulierten Nutzenergiebedarf des Sektors Produktion bis zum Jahr 2050 dar. Ein deutlicher „Knick“ ist im Jahr 2026 erkennbar, der auf die geplante Umstrukturierung eines energieintensiven Industriebetriebes zurückzuführen ist (Kap. 9.2.1).

Durch Annahmen zum Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum steigt der Energiebedarf kontinuierlich bis ins Jahr 2050 und darüber hinaus an. Um die Ziele Tirols für eine fossilsfreie Energiebereitstellung bis 2050 zu erreichen, muss auch der zusätzliche Bedarf durch erneuerbare Energien kompensiert werden. Dies führt zu einer Nachfrage von 7.535 TJ Strom im Jahr 2050, was etwa 58 % des gesamten Nutzenergiebedarfs entspricht. Wie in der Studie ‚Energiespeicher Tirol 2050‘ (EBENBICHLER et al. 2023) erläutert, wird die Speicherung von Methan für das Szenario in Tirol als die wahrscheinlichste Option angesehen. Daher erfolgt die Kompensation großer Teile der aktuellen fossilen Gase durch synthetisches Methan. Mit einem Bedarf von 1.817 TJ macht synthetisches Methan etwa 14 % des gesamten Energiebedarfs aus. Der Nutzenergiebedarf des Sektors Produktion beträgt im Jahr 2050 insgesamt 13.013 TJ.

Im Jahr 2030 ergibt die Prognose einen Nutzenergiebedarf von 12.008 TJ über alle Energieträger, im Jahr 2040 sind es 12.479 TJ. Somit ist auch hier die Steigerung durch das Wirtschaftswachstum erkennbar.

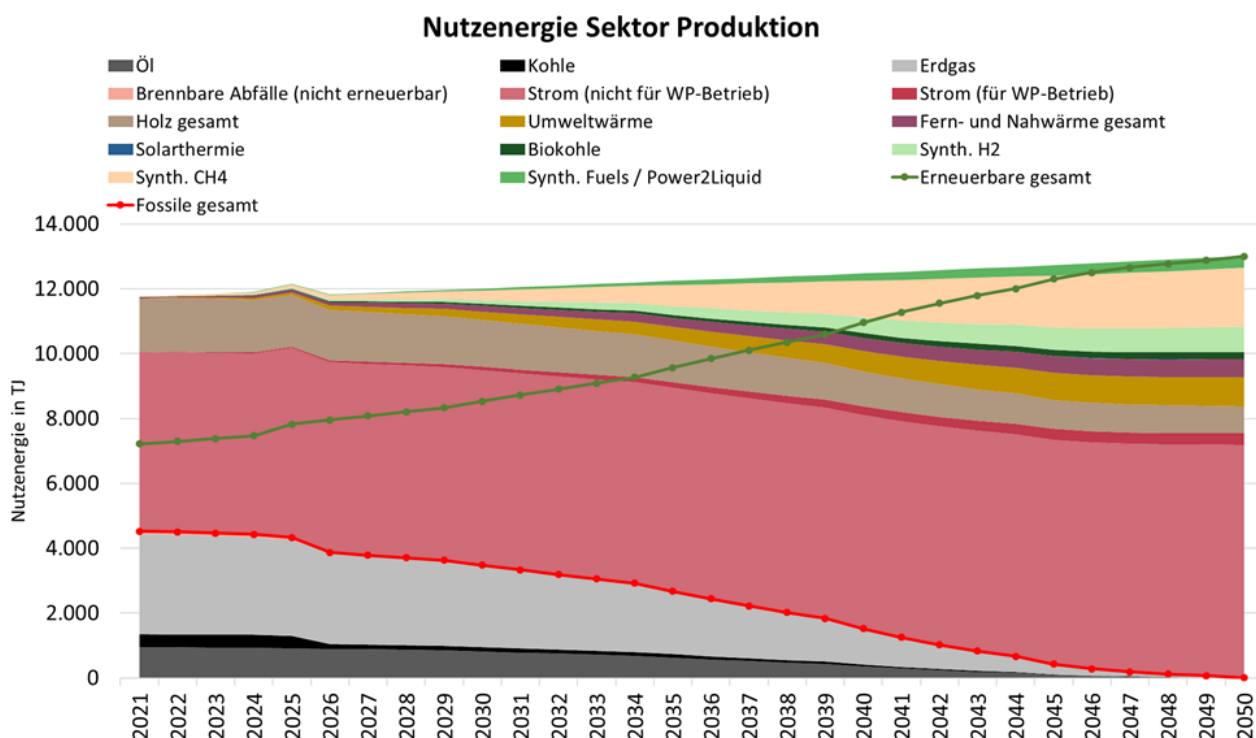


Abb. 11: Nutzenergieverlauf bis 2050 des Sektors Produktion inklusive Industriegebäude

9.2.4. Entwicklung des Endenergiebedarfs und eingesetzter Energieträger von 2021 bis 2050

Um die Entwicklung des Endenergiebedarfs im Sektor Industrie auch mit der Prognose der letzten Jahre zu vergleichen, gibt Tab. 11 einen Überblick der wichtigsten Energieträger. Dabei ist hervorzuheben, dass die Daten für 2016 aus der Nutzenergieanalyse der Statistik Austria stammen. Der Unterschied der Studie des Jahres 2021 gegenüber der gegenständlichen Studie ist der **Zeitpunkt der Veröffentlichung der Nutzenergieanalyse**. Nach Aussage der Bundesanstalt für Statistik in Österreich ergibt sich die Abweichung aufgrund von **Änderungen der Frequenzen der Erhebungen** zur Nutzenergieanalyse. Die Neuberechnung der Verwendungszwecke und die Revision der Zeitreihen erfolgten im Jahr 2021.

Tab. 11: Endenergieeinsätze im Sektor Produktion der Vorgänger-Studie (2016) sowie der gegenständlichen Studie (2021 und 2050), aufgeschlüsselt pro Energieträger.

Energieträger	2016		2020		2050	
	GWh	TJ	GWh	TJ	GWh	TJ
Öl	521	1.877	396	1.426	0	0
Kohle	258	927	235	845	0	0
Erdgas	1.251	4.505	1.220	4.393	0	0
Brennbare Abfälle (nicht erneuerbar)	55	197	72	260	3	12
Strom gesamt (WP- und Nicht-WP-Betrieb)	1.960	7.057	1.684	6.064	2.136	7.689
Holz gesamt	334	1.202	373	1.341	346	1.244
Fern- und Nahwärme gesamt	25	89	13	45	6	22
Biokohle	0	0	0	0	133	477
Synth. H2	0	0	0	0	333	1.198
Synth. CH4	0	0	0	0	776	2.795
Biofuels	0	0	0	0	0	0
Synth. Fuels / Power2Liquid	0	0	0	0	292	1.051
Biogas	0	0	0	0	0	0
Summe	4.404	15.854	3.993	14.375	4.024	14.488

Abb. 12 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs grafisch. Für das Jahr 2020 gab es beim Vorgänger-Szenario bereits eine Prognose, während die aktuellen Daten den Verbrauch gemäß Nutzenergieanalyse der STATISTIK AUSTRIA 2022 angeben.

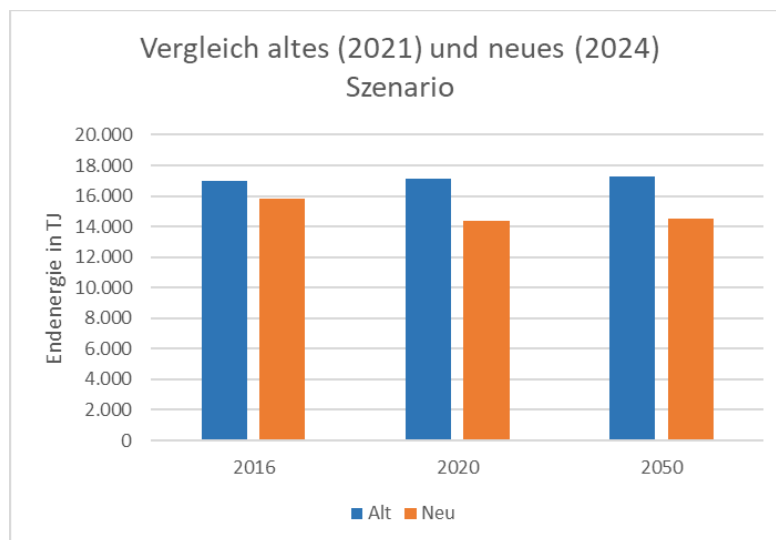


Abb. 12: Vergleich von Endenergiedaten des 2021 veröffentlichten Szenarios und des gegenständlichen Szenarios. 2016 sind in beiden Fällen Daten aus der Nutzenergieanalyse, 2020 Daten aus dem Szenario (2021) und Realdaten und 2050 Szenariendaten dargestellt.

Für den Sektor Produktion ergibt sich das Szenario auf Endenergiebasis wie in Abb. 13 dargestellt. Die rote Linie markiert dabei die **Summe der fossilen Energieträger** welche bis 2050 langsam substituiert werden. Dem gegenüber steht die grüne Linie, welche die **Summe der erneuerbaren Energieträger** wiedergibt. Der Verlauf des Endenergiebedarfs sinkt erst leicht durch die geplanten Effizienzsteigerungen. Ab dem Jahr 2031 wird bereits bei den meisten Prozessen die maximale Effizienz erreicht, denn ab diesem Jahr steigt der Energiebedarf wieder kontinuierlich an und passt sich der Steigerung des Nutzenergiebedarfs an. Die Abb. 14 zeigt dieselben Verläufe und inkludiert die Industriegebäude. Hier sind zusätzlich die Datenpunkte für die Jahre 2030 und 2040 für fossile und erneuerbare Energien dargestellt sowie für 2030, 2040 und 2050 die Gesamtenergien von 17.333 TJ, 16.925 TJ und 17.204 TJ.

Insgesamt sinkt der Endenergieeinsatz im Sektor Produktion 2050 gegenüber 2021 um 6 %.

Jene Energie, die in den **Sektoren „Landwirtschaft“** und **„private und öffentliche Dienstleistungen“** in den Kategorien „Prozesse kleiner 200°C“, „Prozesse größer 200°C“ sowie „Standmotoren“ verbraucht wird, wird gleich behandelt wie die Industrieprozesse. Sie wird im Bereich „Gebäude und Sonstiges“ abgebildet. **Industriegebäude** sind energetisch dem Sektor Produktion zugeordnet, wurden jedoch vom Projektteam „Sonstiges/Gebäude“ bearbeitet und abgebildet. Im Flussbild wird der Energieanteil jedoch dem Sektor Produktion zugeordnet (Kap. 9.1)

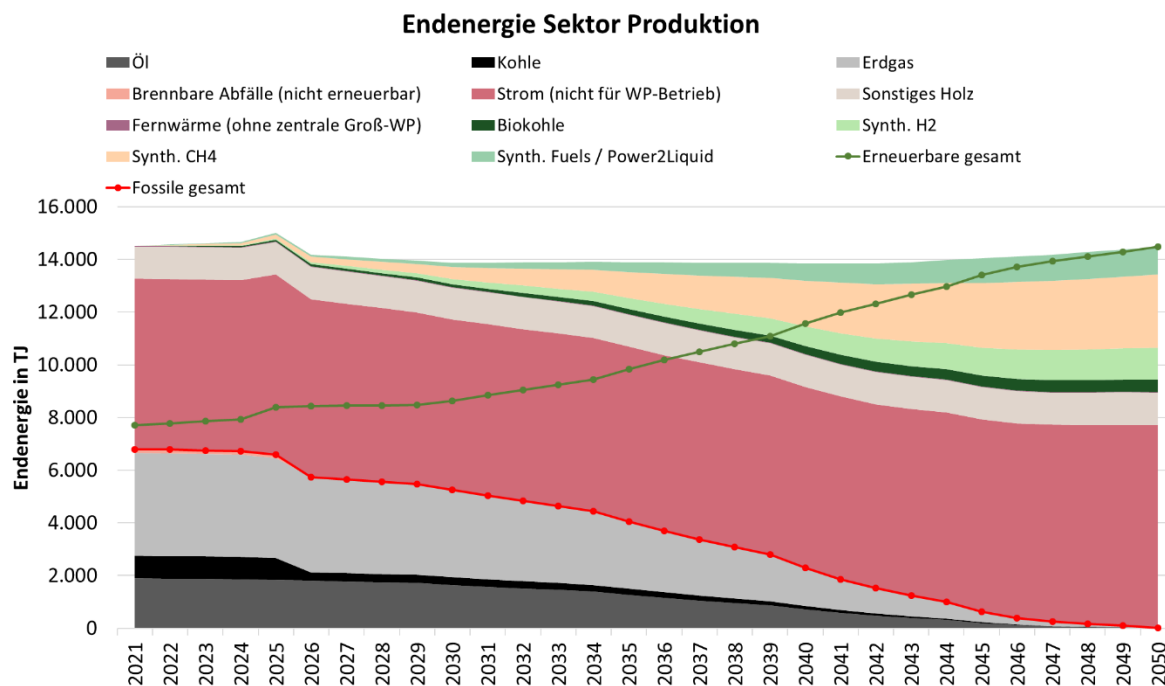


Abb. 13: Endenergie des Sektors Produktion bis 2050 ohne Industriegebäude.

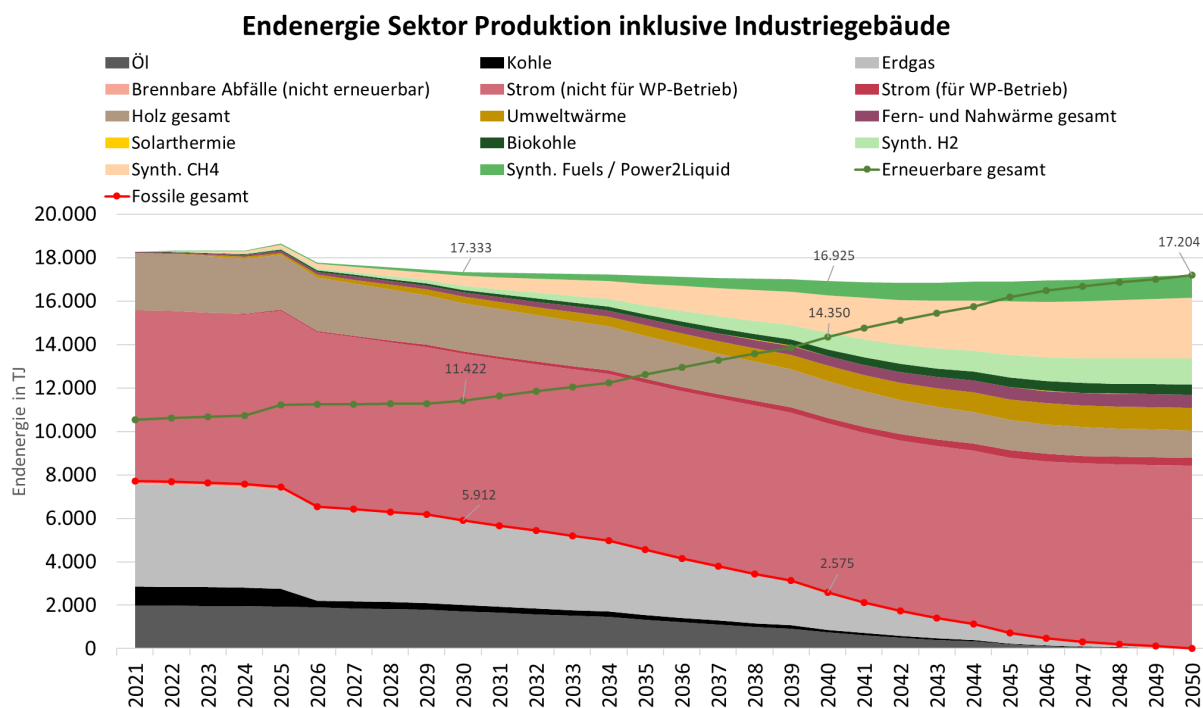


Abb. 14: Endenergie des Sektors Produktion bis 2050 inklusive Industriegebäude.

Um auch den vorherigen Endenergieverlauf abschätzen zu können, sind in Abb. 15 die Jahre von 2010 bis 2050 abgebildet. Seit 2010 gab es eine reale Reduktion der Endenergie von 17.831 TJ (2010) auf 14.511 TJ (2021). Wie in Kap. 9.2.2 gezeigt, sind lediglich 1 % der Reduktion auf Effizienzsteigerungen zurückzuführen. Der Rückgang des Endenergiebedarfs hat jedoch nicht zu einer Erhöhung des Anteils Erneuerbarer geführt, was an der roten und grünen Linie ersichtlich wird. Es ist nicht auszuschließen, dass auch hier die Änderungen der Nutzenergieanalysen auf das Jahr 2015 zu tragen kommen.

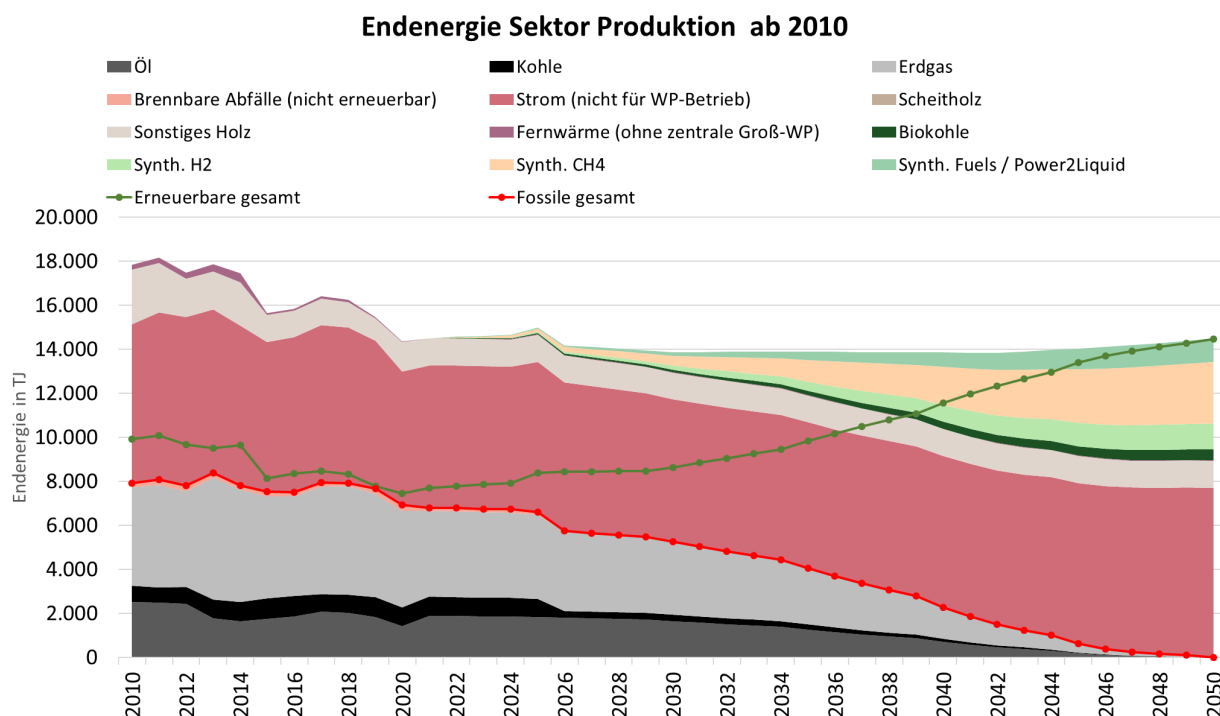


Abb. 15: Endenergie des Sektors Produktion ab 2010 ohne Industriegebäude.

9.3. Sektor Mobilität

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Nutz- und Endenergiebedarfs für den gesamten Personen- und Güterverkehr angeführt. Dahingehend wird eine Umstellung zu einem Einsatz von 100% erneuerbaren Energieträgern ausführlich beschrieben.

9.3.1. Grundlegende Annahmen

Der der gegenständlichen Studie zugrundeliegende Energiebedarf des Mobilitätssektors in Tirol wurde auf Basis der Nutzenergieanalyse 2021 ermittelt, wobei die letzten dafür verfügbaren Daten aus dem Jahr 2021 stammten

(STATISTIK AUSTRIA 2022). Analog zu den Vorgängerstudien (EBENBICHLER et al. 2018, 2021) wurde die Energiedienstleistung für das Jahr 2050 nicht eingeschränkt. Dementsprechend wurde die Nutzenergie pro Person nicht reduziert, sondern analog zum prognostizierten Bevölkerungswachstum erhöht. Damit sind im gegenständlichen Szenario im Saldo **keine Einspareffekte aus Verhaltensänderungen in der Personenmobilität oder aus der Reduktion des Güterverkehrs** hinterlegt.

Diese Annahmen wurden nun in einer Rückschau mit den Realdaten aus den Jahren 2016 bis 2021 verglichen (Tab. 12, Tab. 13). Im Bereich der **Endenergie** erkennt man, dass die Szenarienwerte der Studie des Jahres 2021 im Zeitraum 2016 bis 2019 im Bereich der Werte der Jahre davor liegen. In den Jahren **2020 und 2021** kommt es **pandemiebedingt** zu einem **starken Abfall der realen Endenergiewerte**. Die Nutzenergie pro Person stieg in den Jahren 2016 bis 2019 von 9,63 GJ/Pers. auf 9,94 GJ/Pers. Dies geht mit einer Zunahme eingesetzter Energieträger auf Nutzenergieebene von 6,3% einher. Die Bevölkerung nahm im gleichen Zeitraum nur um etwa 1,5% zu. In den COVID-19-beeinflussten Jahren 2020 und 2021 reduzierte sich die Nutzenergie pro Person auf 8,39 bzw. 8,71 GJ / Pers. Dies lässt sich auf das geänderte Mobilitätsverhalten während COVID-19 zurückführen (z.B. Lock-Downs, Home Office, ...)⁸. Um die Pandemieeffekte auszuklammern, wurde im Bereich der **Mobilität als Ausgangsjahr für die gegenständliche Szenarienbetrachtung das Jahr 2019 gewählt und von diesem hochgerechnet**.

Tab. 12: Nutz- und Endenergieeinsatz [TJ] des Sektors Mobilität 2016 bis 2021.

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Endenergie Prognose [TJ]	30.602	31.541	32.020	32.346	32.401	32.554
Endenergie Statistik [TJ]	30.602	31.822	31.895	32.101	27.405	28.557
Nutzenergie [TJ]	7.187	7.459	7.472	7.532	6.375	6.655
Bevölkerung [Pers.]	746.153	751.140	754.705	757.634	760.105	764.102
NE pro Person [GJ]	9,63	9,93	9,90	9,94	8,39	8,71

Tab. 14 vergleicht die Prognosen aus dem Ziel-Szenario des Jahres 2021 (EBENBICHLER et al. 2021) mit den Realwerten im Jahr 2019. Demnach liegt der Realwert der Nutzenergie in der Gesamtbetrachtung der Mobilität geringfügig höher als der prognostizierte. Vor allem liegen die Bereiche der fossilen Energien höher als erwartet. Hier sind der Flugverkehr und der Sonstige Landverkehr maßgebend. Bei der Eisenbahn fällt der Erdölanteil geringer aus als angenommen, dafür werden die Zielwerte für die elektrische Energie nicht erreicht.

⁸ Dieser Effekt ist besonders im Bereich der Mobilität zu erkennen und in den Bereichen Produktion und Gebäude nicht bzw. sogar gegenläufig erkennbar.

Tab. 13: Nutz- und Endenergieeinsatz [GWh] des Sektors Mobilität 2016 bis 2021.

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Endenergie Prognose [GWh]	8.501	8.761	8.894	8.985	9.000	9.043
Endenergie Statistik [GWh]	8.501	8.839	8.860	8.917	7.613	7.933
Nutzenergie [GWh]	1.996	2.072	2.076	2.092	1.771	1.849
Bevölkerung [Pers.]	746.153	751.140	754.705	757.634	760.105	764.102
Nutzenergie pro Person [kWh]	2.675	2.758	2.750	2.761	2.331	2.419

Eine **grobe Abschätzung der Energieeinsparungspotenziale** durch eine **deutliche Änderung der Verkehrsmittelwahl** in der täglichen Mobilität der Bevölkerung wurde bereits im Anhang der Studie „Ressourcen und Technologieeinsatz-Szenarien Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2018) dargestellt – s.a. Kap.18.1.2. Es wurden **Einsparungen von rund 1.100 TJ Endenergie im Jahr 2050** abgeschätzt, für die allerdings auch umfangreiche Verbesserungen im Verkehrsangebot für Fuß-, Rad- und Öffentlichen Verkehr notwendig wären – sowohl in Angebot, Infrastrukturen und Bewusstseinsbildungen als auch hinsichtlich Rahmenbedingungen (inkl. Raumordnung)⁹. Umgelegt auf die Nutzenergie würde dies eine Verringerung von rund 10% bedeuten. Die Nutzenergie pro Person läge damit bei etwa 2.500 kWh / Person.

Tab. 14: Vergleich von Szenarien- (EBENBICHLER et al. 2021) und Realwerten des Nutzenergieeinsatzes des Sektors Mobilität 2019.

2019 [TJ]	Mobilität Gesamt		Eisenbahn		Flugverkehr ¹⁰		Binnenschiff		Rohrleitung		Sonstiger Landverkehr	
	Sz.	Real	Sz.	Real	Sz.	Real	Sz.	Real	Sz.	Real	Sz.	Real
Kohle	0,6	0,6	0,6	0,6								
Erdöl	5.642	5.819	65	53	551	662	18	3			5.008	5.101
Gas	21	39									21	39
Elektrische Energie	1.428	1.330	737	652					337	304	353	374
Biogene Treibstoffe	343	343	4,0	3,1							339	340
Summe	7.435	7.532	806	709	551	662	18	3	337	304	5.722	5.855

⁹ Die letzte Mobilitätserhebung des Landes Tirol aus dem Jahr 2022 (Köll et al. 2022) zeigt im Vergleich zu der früheren Erhebung im Jahr 2011 (Köll et al. 2011) mit einer deutlichen Verlagerung der Verkehrsmittelwahl von 5 Prozentpunkten vom motorisierten Individualverkehr zu den Verkehrsmitteln des Umweltverbands (Fuß-, Fahrrad- und öffentlicher Verkehr), dass eine Verhaltensänderung im Sinne einer Verkehrswende möglich ist.

¹⁰ Gemäß Statistik Austria. Aus den Betriebsdaten des Flughafens Innsbruck und den Überlegungen zu Flugplätzen und Hubschrauberverkehr ergibt sich ein Wert von 230,5 TJ, welcher in den Szenarien hinterlegt wird.

Die **Bevölkerungsentwicklung** wurde gemäß den Bevölkerungsprognosen für Österreich und die Bundesländer (STATISTIK AUSTRIA 2022) angenommen. Analog zum Energiebedarf wurde auch diesbezüglich das Jahr 2019 als Bezugsjahr gewählt. 2019 umfasste die Tiroler Bevölkerung 757.634 Personen. Für 2050 prognostiziert die Statistik Austria einen Wert von 823.858 Einwohnern. Dies entspricht einer Zunahme von rund 9 %. Damit fällt die Prognose des Bevölkerungswachstum etwas geringer aus als in den Ressourcen- und Technologieeinsatz-Szenarien 2050 (EBENBICHLER et al. 2018) mit 837.217 Bewohnern im Jahr 2050.

Die **Umstellung der Energieträger** im Jahr 2050 orientiert sich an dem im Projekt „Ressourcen- und Technologieeinsatz-Szenarien Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2018) ausgearbeiteten Energiemix-Szenario. Das bedeutet den Einsatz der jeweils effizientesten geeigneten Technologie und demnach eine weitestgehende Elektrifizierung in Kombination mit dem Einsatz von Wasserstoff oder eFuels, wo diese alternativlos erscheinen:

- > der Bahnverkehr wird mit direkter Stromnutzung (Oberleitung bzw. Batterie) angenommen. Ausgenommen hiervon ist die Achenseebahn, bei der der touristische Dampfbetrieb künftig über Biokohle erfolgen soll.
- > Im Straßenverkehr wird bei Pkw und Lieferwagen (Leichtverkehr) von einer direkten Stromnutzung ausgegangen. Im Schwerverkehr wird von einer stärkeren direkteren Stromnutzung von nun 70 % der Fahrleistung ausgegangen. Nur noch für 30 % der Fahrleistung der schweren Nutzfahrzeuge wird Wasserstoff angenommen. Hier wurden aufgrund der aktuellen Entwicklungen die Annahmen des Energie-Ziel-Szenarios 2050 (EBENBICHLER et al. 2021) (30% Strom und 70% Wasserstoff) getauscht. In der Wasserstoffstrategie für Österreich (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie 2022) wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff vorrangig in Mobilitätsanwendungen eingesetzt wird, welche über die wirtschaftlich und technisch erreichbaren Kapazitäten von Batteriesystemen und der direkten Elektrifizierung hinausgehen. In HEINFELLNER et al. (2020) wird anhand des Entwicklungspfades zur Klimaneutralität 2050 die Reduktion der Endenergiemengen im Verkehr angegeben. Nimmt man die Daten des Schwerverkehrs und rechnet sie über die Wirkungsgrade in Nutzenergie um, so ergibt sich eine künftige Verteilung von 82% Strom und 18% Wasserstoff. Unter der Betrachtung sowohl topografischer Verhältnisse als auch des hohen Transitaufkommens im Schwerverkehr in Tirol scheint eine 70 % Strom, 30 % Wasserstoff-Verteilung plausibel.
- > Für die Binnenschifffahrt wird von Strom als Endenergieträger ausgegangen.
- > Im Flugverkehr und auch für Oldtimer wird 2050 synthetischer flüssiger Treibstoff (eFuels) angesetzt. Die Entwicklung im Flugverkehr berücksichtigt die einschlägige EU-Verordnung "Verordnung zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr" (EUROPÄISCHE UNION 2023), in welcher festgelegt wird, dass ab 2025 ein Mindestanteil von 2 % und ab 2050 ein Mindestanteil von 70 % an Sustainable Aviation Fuel (SAF) den herkömmlichen Treibstoffen beigemischt werden müssen.

Bei der zeitlichen Entwicklung **des Pkw-Bestands bzw. der Fahrleistung in Bezug zur Antriebstechnologie** hinsichtlich des Straßenverkehrs wird zwischen Leicht- und Schwerverkehr unterschieden. Um die Flottenentwick-

lung der Pkw bis zum Jahr 2050 plausibel zu quantifizieren, wurde zunächst der Trend des Pkw-Bestandes für Tirol zwischen den Jahren 2014 und 2022 (STATISTIK AUSTRIA 2023) fortgeführt. Dementsprechend wurde angenommen, dass die Anteile der Kraftfahrzeuge mit Elektroantrieb (batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Hybridfahrzeuge) in näherer Zukunft schwach exponentiell steigen und der Anteil der Fahrzeuge, die fossile Treibstoffe nutzen, entsprechend abnehmen wird. Ab dem Jahr 2026 wird zudem ein stärkerer Rückgang der Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren der Berechnung hinterlegt, da davon ausgegangen wird, dass sich die Technik der Elektrofahrzeuge auf dem Markt noch stärker etabliert und Fördermaßnahmen bzw. regulative Maßnahmen sowie das gestärkte Vertrauen der Fahrzeugnutzenden zu häufigeren Käufen von Elektrofahrzeugen führen. Zudem wurde für diesen Zeitraum auch eine Preisparität zwischen batterieelektrischen und konventionell betriebenen Fahrzeugen hinsichtlich des Anschaffungspreises erwartet (SOULOPOULOS et al. 2021).

Für die Folgejahre wurde außerdem angenommen, dass der Trend der Hybridfahrzeuge abnimmt und vermehrt rein-elektrisch betriebene Pkw in den Flottenbestand aufgenommen werden. Der „Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich“ (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021, S. 37) formuliert das Ziel, dass bis spätestens 2030 100 % der Pkw- und Zweirad-Neuzulassungen emissionsfrei sind. Dementsprechend werden in der Prognose ab diesem Zeitpunkt im Leichtverkehr nur noch Neuzulassungen von BEV vorgesehen. Auch Neufahrzeuge, die mit fossilem Gas betrieben werden, sind dann nicht mehr vorgesehen. Aufgrund der deutlich geringeren Wirkungsgrade werden im Energiemix-Szenario auch keine Pkw mit synthetisch produzierten Gasen als Energieträger vorgesehen, das heißt auch keine wasserstoffbetriebenen Pkw. Die bestehende Oldtimer-Flotte, die auf flüssige Kraftstoffe angewiesen ist, wird auf synthetische Kraftstoffe aus erneuerbarer Energie (Power to Liquid) umgestellt. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit zum spätest möglichen Zeitpunkt.

Austauschrate bzw. Auslaufphase. Die durchschnittliche Nutzungsdauer der Pkw wird mit zehn Jahren angenommen. Zwar werden in der Studie „Ökobilanz alternativer Antriebe“ (FRITZ et al. 2016) 15 Jahre als durchschnittliche Pkw-Lebensdauer angegeben, im Rahmen der gegenständlichen Studie wird jedoch davon ausgegangen, dass die meisten Pkw vor Ende ihres Lebenszyklus ins Ausland verkauft werden. In Anlehnung an die Ziele aus dem „Mobilitätsmasterplan für Österreich“ (BMK 2021, p. 37) wurde ab dem Jahr 2030 nur mehr Kfz-Zulassungen für rein elektrisch betriebene Pkw angenommen. Der Restbestand an Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren streicht damit ab dem Jahr 2031 linear aus. Zur Plausibilisierung dieser Entwicklung und Austauschrate wurde zunächst die Entwicklung der Anzahl bzw. Anteile von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) in Tirol betrachtet. Die von niedrigem Niveau ausgehenden hohen Wachstumsraten zwischen 2014 und 2019 ließen noch eine bis 2030 fossilfreie Flotte erwarten. Es zeigt sich allerdings bereits, dass in den Jahren 2017 bis 2019 die jährliche Anstiegsrate deutlich abgenommen hat. Auch österreichweit ist der Anteil der BEV an den Neuzulassungen zunächst stärker gestiegen. Obwohl das Wachstum in den letzten Jahren teilweise weniger stark war, wurde 2023 bereits ein Wert von beinahe 20% erreicht (inkl. Plug-in-Hybride PHEV ca. 27%) (AUSTRIATECH 2023). Damit liegt man noch über den Werten, die für ein HochlaufszENARIO der E-Pkw (BEV und PHEV) zum Erreichen eine CO₂-freien Flotte

im Jahr 2050 modelliert wurden (AUSTRIATECH 2019)¹¹. Eine Aktualisierung dieses Hochlaufszenarios zur Abbildung der Zielsetzung einer CO₂-freien Flotte für die Klimaneutralität schon 2040 zu erreichen, das auf 100% Anteil von BEV an den Neuzulassungen schon 2030 basiert, zeigt jedoch, dass dafür deutlich höhere Werte notwendig sind – 2023 etwa 60% und 2025 bereits 90% (EBERHARD 2020)¹². Dies macht den akuten Handlungsbedarf deutlich, der notwendig ist, um angesichts der „Trägheit des Technologiewechsels“ (übliche Entwicklungs-, Verkaufs-, Nutzungszeiträume) diese Zielsetzungen zu erreichen. Für das gegenständliche Szenario werden dennoch die aktuellen Zielsetzungen dieses Technologiewechsels laut Mobilitätsmasterplan 2030 hinterlegt, weil dies einerseits mit höheren Anforderungen an die Umgestaltung des Energiesystems verbunden ist. Andererseits zeigt der Vergleich der Hochlaufszenarios mit den Realdaten auch nur einen geringen Zeitversatz von 1,5 bis zwei Jahren.

Die Aufteilung der Nutzenergie auf die einzelnen Antriebsarten bzw. Energieträger erfolgt anhand der Anteile an der Fahrleistung. Daher wird der **Energiebedarf des Leichtverkehrs** über die Entwicklung des Pkw-Bestandes mit der betreffenden **Kilometerleistung in Bezug zum jeweiligen Energieträger** aus dem Energieeinsatz der Haushalte 2017/2018 für Tirol (STATISTIK AUSTRIA 2023) verknüpft. Eine Aufteilung der Fahrleistung ist in Abb. 16 ersichtlich. Hierbei werden Hybrid-Fahrzeuge als „Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mit niedrigem Treibstoffverbrauch“ gewertet und farblich den fossilen Antrieben zugeordnet. Diesen Anteilen entsprechend wird im Szenario die Nutzenergie, die dem Bevölkerungswachstum entsprechend über die Jahre steigt, auf die Antriebsarten bzw. die damit verbundenen Energieträger aufgeteilt.

¹¹ Im von AUSTRIATECH (2019) für die Erreichung eines „CO₂-freien Verkehrssektors“ in Österreich im Jahr 2050 berechneten „Hochlaufszenario der E-Mobilität“ müsste der Anteil an Neuzulassungen von Elektro-Pkw in Österreich von 4,4 % im Jahr 2020 auf 76 % im Jahr 2030 und letztlich 100% im Jahr 2040 erhöht werden. Das Szenario korrespondiert dabei mit einem Prognosewert für 2025 von ca. 28 % mit den damals bekannten Zielwerten verschiedener Automobilhersteller, die für 2025 Anteile von 25 % bis 40 % an den Neuwagen anpeilt haben. Damit verbunden wären Anteile der Elektro-Fahrzeuge (noch inklusive Plug-In-Hybriden) an der Pkw-Flotte von 7 % im Jahr 2025 bzw. ca. 27 % im Jahr 2030, 85% im Jahr 2040 und 100% im Jahr 2050.

¹² Österreichs Leitstelle für Elektromobilität (AustriaTech) ermittelt 2024 ein aktualisiertes Hochlaufszenario auf Basis wissenschaftlicher Studien und Marktprognosen der Industrie. Dabei wird ein Anstieg der E-PKW in Österreich von knapp 20% Anteil an den Neuzulassungen im Jahr 2023 auf 100% im Jahr 2030 berechnet. Basierend auf der Einführung neuer, günstigerer Modelle und dem Ausstieg diverser Anbieter aus dem Verbrenner-Segment wird ein Zwischenschritt von 50% BEV-PKW-Anteil an den Gesamtneuzulassungen spätestens im Jahr 2027 angenommen. Das Szenario korrespondiert dabei mit zu beobachtenden S-Kurven aus Vorreiterstaaten (Dänemark, Finnland, Island) und den EU-Zielen. Aufgrund des niedrigen Niveaus der Gesamtneuzulassungen wird allerdings von einer langsameren Änderung der PKW-Flotte im Bestand ausgegangen als bei vergangenen Szenarien. Für das Ziel, dass bis spätestens 2030 Neuzulassungen und die Bestandsflotte 2040 emissionsfrei sein müssen, wäre demnach zusätzlichen Anreizen notwendig.

Szenario 2050 & 10 Jahre Nutzungsdauer Pkw
keine Neuzulassungen ab 2030

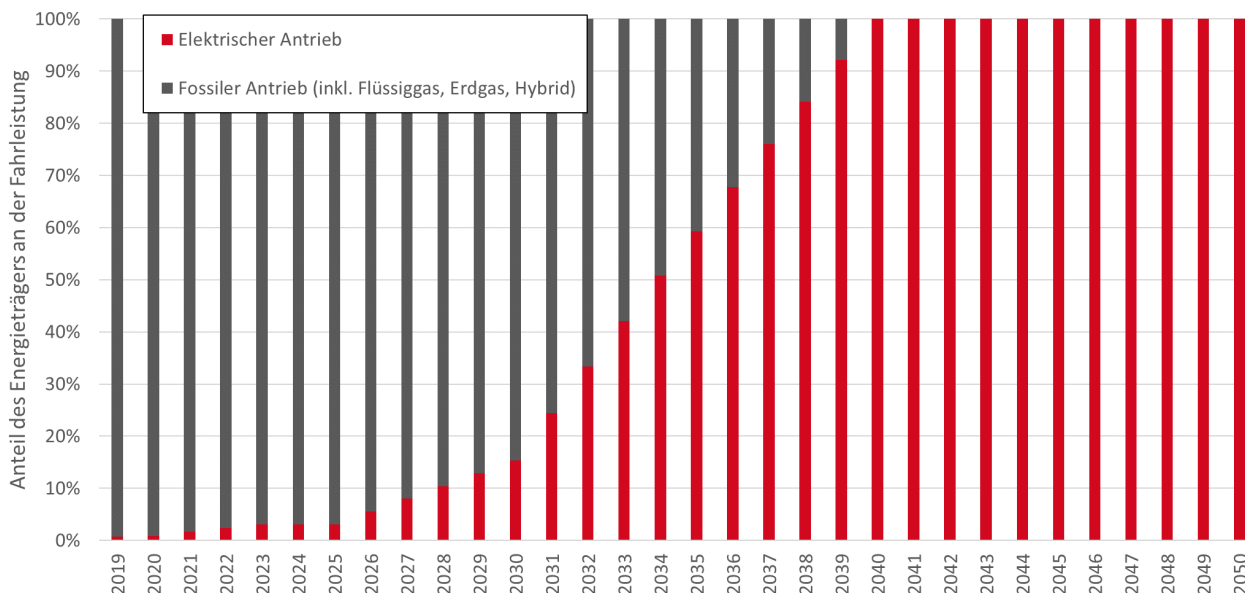


Abb. 16: Hinterlegte Anteile der Fahrleistungen im Leichtverkehr im Szenario 2050.

Für den **Schwerverkehr** wurde angenommen, dass die Antriebstechnologien Batterie und Brennstoffzelle erst ab dem Jahr 2025 beginnen, eine über Pilotprojekte hinausgehende Verbreitung zu finden. Ähnliche Annahmen finden sich im Synthesebericht des Umweltbundesamtes (UMWELTBUNDESAMT 2017). Auch der „Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich (BMK 2021) gibt hier gewisse Ziele vor. So sollen 100 % der Neuzulassungen der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) bis spätestens 2030 und Neuzulassungen der schweren Nutzfahrzeuge (SNF) (bis zu 18 Tonnen) ab 2030 emissionsfrei sein. Eine Emissionsfreiheit bei SNF- Neuzulassungen (mehr als 18 Tonnen) ist ab dem Jahr 2035 vorgesehen. Die Erreichung dieser Zielwerte wird auch von den aktuellen Hochlaufszenerarien der Leitstelle für E-Mobilität gestützt (AUSTRIATECH 2024)¹³. Wie bereits erwähnt, erfolgt in gegenständlicher Studie die Aufteilung der Nutzenergie über die Fahrleistungen des gesamten Schwerverkehrs zu einzelnen Energieträgern. Eine Zuteilung in Gewichtsklassen wird nicht vorgenommen. Dementsprechend wird die gesamte Fahrleistung des

¹³ Bei den leichten Nutzfahrzeugen ergibt sich aufgrund kürzerer Nutzungsdauer und der damit verbundenen schnelleren Umstellung der Bestandsflotte ein positives Bild, dass in diesem Sektor rein emissionsfreien Neuzulassungen im Jahr 2030 und eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 erreicht werden können. Bei den schweren Nutzfahrzeugen wird von einem ähnlich steilen, jedoch um bis zu vier Jahre verzögerten Hochlauf ausgegangen (50% emissionsfreie Neuzulassungen im Jahr 2030, der größere Teil batterieelektrisch).

Schwerverkehrs bis zum Jahr 2025 noch Dieselnutzfahrzeugen zugeordnet. Da erste Firmen bereits verkünden, ihren Fuhrpark um den Zeitraum 2026 auf Wasserstoff umstellen zu wollen (VCÖ 2020), wird ab diesem Jahr angenommen, dass der Anteil der alternativen Antriebe beginnt, leicht exponentiell zu steigen. Die zunächst nur leichte Abnahme der Dieselnutzfahrzeuge und ihrer Fahrleistung wird insbesondere den hohen Investitionskosten für die betroffenen Firmen geschuldet sein. Die Energieträger Strom und Wasserstoff teilen sich die vom Diesel freierwerdende Fahrleistung in Anlehnung an die bereits erwähnten Überlegungen im Verhältnis 70% Strom und 30% Wasserstoff auf.

Nach Rücksprache mit der Wirtschaftskammer Tirol und gemäß WIETSCHL et al. (2017) wurde eine durchschnittliche Nutzungsdauer von sechs Jahren für die schweren Nutzfahrzeuge gewählt. Dieser vergleichsweise geringe Wert berücksichtigt, dass gerade Fahrzeuge mit hoher Fahrleistung bereits nach kurzer Zeit ausgetauscht werden und damit teilweise sehr lange Nutzungsdauern von Fahrzeugen mit geringer Fahrleistung kompensieren. Den Zielen aus dem Mobilitätsmasterplan bzw. einer Klimaneutralität 2040 entsprechend sind daher ab dem Jahr 2040 keine dieselbetriebenen Nutzfahrzeuge vorgesehen. Fahrzeuge, die mit längeren Nutzungsdauern eingesetzt werden, müssten bereits entsprechend früher auf fossillfreie Antriebe umgestellt werden. In den Jahren 2035 bis 2040 nimmt der Anteil der mit Diesel zurückgelegten Fahrleistung durch die Flottenumstellung linear auf 0% ab (Abb. 17).

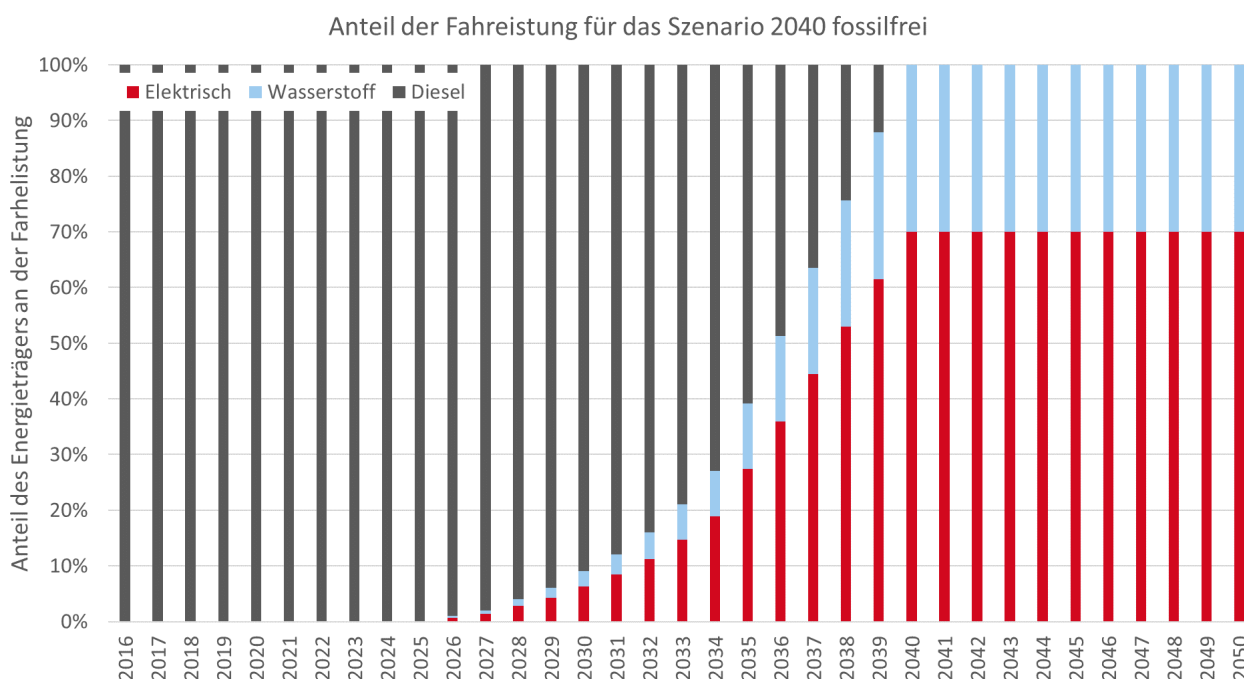


Abb. 17: Anteil der Fahrleistungen im Schwerverkehr, Szenario 2050.

Für den Sektor **Flugverkehr** wird die Nutzenergie auf Grundlage von lokal verfügbaren Daten – z.B. den Betriebsdaten des Flughafens Innsbruck – für die Jahre 2016 bis 2022 ermittelt, die von den Daten der Nutzwertanalyse der Statistik Austria abweichen. Im Jahr 2019 weist die Statistik bei Flugtreibstoffen eine um 471 TJ höhere Nutzenergie bzw. 1.177 TJ höhere Endenergie auf als die Jahresbilanz des Flughafens Innsbruck. Ergänzend wurden daher auch Abschätzungen zum Energiebedarf des Hubschrauberverkehrs in Tirol versucht. Über einen durchschnittlichen Verbrauch von 150 l Kerosin pro Einsatz konnte mithilfe der öffentlich verfügbaren Daten der Flugrettung Österreich („Heli Rescue - Tirol,“ 2022) eine Endenergie von ca. 53 TJ errechnet werden. Die Daten für Flugplätze in Tirol konnten aus EMIKAT des Austrian Institute of Technology (EMIKAT, Austrian Institute of Technology) für das Jahr 2019 berechnet werden und ergeben in Summe 3,0 TJ Nutzenergie. Eine Umlegung dieses Wertes auf die anderen Jahre geschah über die Verbrauchsverteilung von Flugbenzin am Flughafen Innsbruck. Zur Abschätzung von nicht bekannten Daten zu Heeres-, Transport- und Filmflüge wurden 20 TJ Nutzenergie angesetzt, angelehnt an den Verbrauch der Flugrettung. Die Summe dieser Überlegungen würde einen Anteil von 10% der Differenz in den Statistiken erklären und für das Jahr 2019 die daraus ermittelte Nutzenergie in Summe rund 230 TJ betragen. Da die Daten des Flughafens Innsbruck und der Flugrettung Tirol für das Jahr 2022 bekannt sind, wurde für den Zeitraum 2023 bis 2050 ein darauf basierender konstanter Wert angenommen. Diese liegen noch unter den Werten von 2019. Da man seitens des Flughafens auch langfristig von einer in diesem Ausmaß reduzierten Anzahl bei den Flugbewegungen ausgeht, wurde die Nutzenergie von 2019 im Bereich des Kerosinverbrauchs am Flughafen Innsbruck um 10% abgemindert und mit 212 TJ fortgesetzt. Die seit der Studie „Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2021) getroffenen Vorgaben bezüglich des-Einsatzes von nachhaltigen Flugtreibstoffen SAF der EU werden auch in den Berechnungen berücksichtigt. Um den vollständigen Ausstieg aus fossilen Treibstoffen abzubilden, wird demnach davon ausgegangen, dass der Umstieg auf synthetische Kraftstoffe basierend auf erneuerbarer Energie (Power to Liquid) in einem ersten Schritt im Jahr 2025 einen Anteil von 2% annimmt. Danach wird dieser linear auf einen Anteil von 70% im Jahr 2049 angehoben. Im Jahr 2050 erfolgt nochmals ein sprunghafter Anstieg auf 100%.

Die **Binnenschifffahrt** orientiert sich an der Entwicklung im Bereich der Nutzfahrzeugmotoren und wird demnach – sobald wirtschaftliche Alternativen bestehen – schrittweise mit der Erneuerung der betroffenen Schiffsmotoren von fossilen Treibstoffen auf alternative Antriebe beginnen. In den Szenarien wird daher davon ausgegangen, dass im Zeitraum 2028 bis 2036 schrittweise auf batterieelektrische Antriebe, das heißt auf den Energieträger Strom umgestellt wird. Auch in der Binnenschifffahrt wird die Nutzenergie im gesamten Untersuchungszeitraum als konstant angenommen und aufgrund der von der COVID-19-beeinflussten Jahre 2020 und 2021 auf das Jahr 2019 bezogen.

Für den Transport in **Rohrleitungen** (Transalpine Ölleitung) wird aufgrund des reduzierten Erdölbedarfs auf lange Sicht von einem geringeren Nutzenergiebedarf in der Zukunft ausgegangen. Zwar wird angenommen, dass die erforderliche Nutzenergie von 2016 bis 2023 noch linear um 33 % steigt und anschließend bis 2030 konstant bleibt, aber in der Folge gleichmäßig bis zum Jahr 2050 auf die Hälfte der Nutzenergie von 2016 abnimmt. Dies berücksichtigt, dass sich die Nachfrage nach Erdöl in Zukunft durch Umstieg der Kraftfahrzeuge auf Strom und Wasserstoff verringern wird, Erdöl jedoch weiterhin durch die Rohrleitung für die Nutzung in der petrochemischen Industrie

transportiert wird. Diese Annahmen waren bereits Teil der Studie des Jahres 2021 (EBENBICHLER et al. 2021) und wurden unverändert übernommen.

Die **Eisenbahn** in Tirol ist bereits zu 100% elektrifiziert – mit Ausnahme der Zillertalbahn und der Achenseebahn. Auf die Entwicklung des Eisenbahnverkehrs wirken sich die Inbetriebnahme des zurzeit im Bau befindenden Brenner-Basistunnels voraussichtlich frühestens ab dem Jahr 2032 und die Umstellung der **Zillertalbahn (Antrieb mittels erneuerbarer Energien)** in den kommenden Jahren. Durch die **zusätzliche Kapazität des Brenner-Basistunnels samt der zeitgleichen bzw. schrittweise nachfolgenden Inbetriebnahme der Abschnitte im Nord- und Südzulauf** ist eine **Erhöhung des Schienen-Güterverkehrs** möglich. Damit ist eine Steigerung des Nutzenergiebedarfs des Eisenbahnsektors verbunden.

Gleichzeitig sollte sich der **Lkw-Transit-Verkehr verringern**. Um die gesamte Kapazität von BBT und Bestandsstrecke für die angestrebte Verkehrsverlagerung auf die Schiene zu nutzen, sind allerdings starke Begleitmaßnahmen nötig, die dann auch zu einer Reduktion des aktuell vorhandenen Umwegtransits führen. In diesem Fall erscheint auch eine Reduktion des Lkw-Transits auf unter 1 Mio. pro Jahr möglich¹⁴.

Systemgrenze und Tanktourismus. Wie bereits in Kap.6.1. beschrieben, stellt der Mobilitätsbereich durch die möglichen Unterschiede im Energiebezugsort und -bedarfsort vor allem im Quell- und Zielverkehr von bzw. nach Tirol und den Tanktourismus (vor allem im Transitverkehr) eine wesentliche Unschärfe dar (Kap.18.1.1).

9.3.2. Nutzenergiebedarf 2021 und 2050

Analog zur Methodik der Studie „Ressourcen- und Technologieeinsatz-Szenarien Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2018) wurde für die Mobilität des Jahres 2021 die Gesamt-Nutzenergie aus der Endenergie mittels angenommener Wirkungsgrade berechnet. Für 2021 ergab sich auf Basis der Nutzenergieanalyse der Statistik Austria (STATISTIK AUSTRIA 2022) ein Nutzenergiebedarf von 6.655 TJ (Tab. 15).

¹⁴ Eine jährliche Steigerungsrate von 1,5% im Güterverkehr würde für das Jahr 2050 ein Gütervolumen von 73,9 Mio. Tonnen bedeuten. Bei der Annahme, dass die Kapazität von 60 Mio. Gütertonnen, welche im Genehmigungsverfahren definiert wurde und den viergleisigen Vollausbau der Eisenbahnachse München-Verona vorsieht (inkl. Ausbaustrecke München-Mühldorf-Freilassing sowie Güterzugsentlastungsstrecke Rosenheim-Mühldorf), auch vollständig ausgenutzt wird, würde dies für den verbleibenden Schwerverkehr auf der Straße 19,2 Mio. Tonnen an transportierten Gütern bedeuten. Die von der Brenner-Corridor-Plattform berechneten Szenarien zeigen deutlich, dass die für die Ausnutzung der Kapazität von BBT und Bestandsstrecke notwendige Verlagerung nur mit einem entsprechenden verkehrspolitischen Rahmen erreicht werden kann. Für die vollständige Ausnutzung der durch den BBT erhöhten Kapazität müssten die Maßnahmen allerdings noch über jene des darin definierten Policy Scenario hinausgehen. Mit diesen Begleitmaßnahmen wie Internalisierung externer Kosten, Korridormaut, etc. ist auch eine Reduktion des derzeitigen Lkw-Umwegtransits verbunden, wodurch sich die Anzahl der Transit-Lkw noch weiter reduziert. In Kombination mit einer zufolge dieser Maßnahmen angenommenen Verringerung von Leerfahrten bis ins Jahr 2050 um 20% (gleichbedeutend mit einer Steigerung des durchschnittlichen Ladegewichts pro Lkw von derzeit 15,5 Tonnen durch auf 18,6 Tonnen pro Lkw) wäre das Erreichen der früheren Zielsetzung von maximal 1 Mio. Transit-Lkw auch noch plausibel.

Tab. 15: Nutzenergie Mobilität 2021.

2021 [TJ]	Mobilität Gesamt	Eisenbahn	Flugverkehr	Binnenschiff	Rohrleitung	Sonstiger Landverkehr
Kohle	0,5	0,5				
Erdöl	5.005	47	333 ¹⁵	3		4.623
Gas	37					37
Elektrische Energie	1.287	608			282	389
Biogene Treibstoffe	324	4				321
Summe	6.655	658	333	3	282	5.379

Wie bereits beschrieben, basiert das Szenario wegen der Pandemieinflüsse im Mobilitätsbereich nicht auf der Nutzenergie von 2021, sondern auf jener des Jahres 2019. Der Vorgabe entsprechend, dass keine Verhaltensänderungen anzunehmen sind, wird die Nutzenergie dabei mit der Bevölkerungsentwicklung (STATISTIK AUSTRIA 2022) hochgerechnet, wodurch sich diese bis zum Jahr 2050 um knapp 9 % auf **8.234 TJ** steigert (Tab. 16). Aufgrund der erhöhten Nutzenergie pro Person im Jahr 2019 gegenüber 2016 (Tab. 12) steigt die Gesamtnutzenergie wie auch in der Studie des Jahres 2021 (EBENBICHLER et al. 2021) auf (8.101 TJ).

Tab. 16: Nutzenergie Mobilität 2050.

2050 [TJ]	Mobilität Gesamt	Eisenbahn	Flugverkehr	Binnenschiff	Rohrleitung	Sonstiger Landverkehr
Kohle						
Erdöl						
Gas						
Elektrische Energie	7.299	1.220	0	3	152	5.924
Wasserstoff	712	22	0	0	0	690
Synth. Treibstoffe / Power2Liquid	223	0	216	0	0	8
Biokohle	1	1				
Summe	8.234	1.242	172	3	152	6.622

9.3.3. Eingesetzte Technologien und Wirkungsgrade 2050

Die eingesetzten Technologien wurden bereits beschrieben und werden folgendermaßen kurz zusammengefasst:

¹⁵ Laut STATISTIK AUSTRIA. Aus den Betriebsdaten des Flughafens Innsbruck ergibt sich ein Wert von 60 TJ, welcher in den Szenarien hinterlegt wird.

- > Der gesamte **Leichtverkehr** auf den Straßen wird mittels batteriebetriebener Elektromotoren angetrieben. Ein geringer Anteil historischer Fahrzeuge wird im Zieljahr 2050 über synthetische Kraftstoffe aus erneuerbarer Energie (Power to Liquid) versorgt.
- > Die Fahrleistung des **Schwerverkehrs** teilt sich zu 70% auf direkte Stromnutzung und 30% Wasserstoffbrennzelle auf.
- > 2050 werden **Flugzeuge** mit synthetischen Kraftstoffen (Power to Liquid) und **Binnenschiffe** mit Strom betrieben. Bei den **Rohrleitungen** kommt weiterhin Strom als Antriebstechnologie zum Einsatz.
- > Die **Eisenbahn** in Tirol ist elektrifiziert. Die Zillertalbahn, die derzeit mit Diesel betrieben wird, soll in den kommenden Jahren mittels erneuerbarer Energien betrieben werden, der Dampfbetrieb der Achenseebahn soll mittels Biokohle erfolgen.

Die **Wirkungsgrade** wurden aus der Literatur (z.B. WESSELAK et al. 2017) bzw. mittels Internetrecherche ermittelt. Angesetzt wurden demnach bei der Eisenbahn für elektrischen Antrieb 85 % und für fossilen Antrieb (Diesel, Kohle) 30 %. Beim Straßenverkehr wurden – wie bei der Binnenschifffahrt – für Verbrennungsmotoren 20 % (Diesel inkl. Biofuel als Beimischung und Gas) bzw. 15 % (Benzin) und 80 % bei Elektromotoren verwendet. Beim Flugverkehr wurden abweichend zur Studie „Ressourcen- und Technologieeinsatz-Szenarien Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2018) 40 % (Petroleum/Flugbenzin) und bei Rohrleitungen 90 % (Strom) zugrunde gelegt. Für Wasserstoff (Brennstoffzellentechnologie) wird ein Wirkungsgrad von 60 % angesetzt. Diese Wirkungsgrade beziehen sich auf die Umwandlung von Endenergie auf Nutzenergie im Fahrzeug (im Antrieb), d.h. „tank to wheel“. Vorgelagerte Verluste in der Erzeugung bzw. Bereitstellung der Endenergie werden in der Bilanz anderen Energiestufen berücksichtigt (z.B. Herstellung synthetischer Wasserstoff bzw. eFuel). Für 2050 wird dabei davon ausgegangen, dass sich Verluste in diesen Bereichen (z.B. Ladeverluste) noch reduzieren.

9.3.4. Entwicklung des Endenergiebedarfs und eingesetzter Energieträger von 2021 bis 2050

Abb. 18 zeigt, wie die Nutzenergie in Zusammenhang mit dem Bevölkerungswachstum zunimmt und sich der Änderung der Antriebstechnologien entsprechend der Aufteilung auf die Energieträger ändert, bis 2050 die fossilen Energieträger vollständig durch erneuerbare Energieträger substituiert sind. Die Werte zwischen 2016 und 2021 zeigen die realen Veränderungen, die sich auch durch die Einschränkungen bzw. die Änderungen im Mobilitätsbereich infolge COVID-19 ergeben haben. Durch die Änderung der eingesetzten Technologien wird künftig der größte Anteil der Energie im Mobilitätsbereich direkt durch Strom gedeckt. Hier sind die größten Mengen im Landverkehr, wo der gesamte Leichtverkehr und 70 % der Fahrleistung des Schwerverkehrs sukzessive auf direkte Nutzung elektrischer Energie umgestellt werden, und bei der Eisenbahn verortet, die mit Ausnahme der Zillertalbahn heute bereits elektrisch betrieben wird. Die Zunahme des Wasserstoffs resultiert aus der sukzessiven Umstellung von 30 % der Fahrleistung des Schwerverkehrs beginnend ab 2026. Gemeinsam mit dem Diesel reduzieren sich auch die beigemischten Biofuels bis 2050 auf null. Der Flugverkehr wird ab dem Jahr 2025 startend mit 2 % auf 70 % Anteil SAF im Jahr 2049 umgestellt. Zusammen mit den Oldtimern wird der Flugverkehr im Jahr 2050 dann vollständig auf synthetische Kraftstoffe (Power2Liquid) umgestellt.

Abb. 19 zeigt die deutliche Abnahme der erforderlichen Endenergie trotz steigender Nutzenergie aufgrund der höheren Wirkungsgrade insbesondere durch den Ersatz von Verbrennungsmotoren durch elektrische Antriebe im Landverkehr. Der Endenergiebedarf des Mobilitätssektors wird 2050 um rund 63 % unter dem Wert des Jahres 2021 liegen.

Das Szenario erfolgt im Einklang mit den formulierten Zielen der Bundesregierung – einer vollständigen Umstellung des Leicht- und Schwerverkehrs auf der Straße auf alternative Antriebstechnologien bis 2040. Die restlichen verbleibenden dargestellten fossilen Energieträger betreffen ausschließlich den Flugverkehr¹⁶.

Durch die Umstellung der Antriebstechnologie im Schwerverkehr auf 70 % Strom und 30 % Wasserstoff wäre aufgrund des besseren Wirkungsgrades der elektrischen Motoren ein stärkerer Rückgang der Endenergie im Jahr 2050 gegenüber dem Energie-Ziel-Szenario 2050 des Jahres 2021 (Ebenbichler et al. 2021) zu erwarten gewesen, in dem 30 % Strom und 70 % Wasserstoff angesetzt wurden. Dieser Endenergieeinsatz verringerte sich jedoch nur um etwa rund 1 % auf nun 10.778 TJ im gegenständlichen Szenario. Grund dafür ist die höhere Nutzenergie als Folge der höheren Werte pro Person im Jahr 2019 gegenüber 2016.

¹⁶ Die nach der Erstellung der Prognose veröffentlichte Energiebilanz für das Jahr 2022 weist für dieses Jahr mit 26.824 TJ einen geringeren Endenergieverbrauch aus als aus den Werten von 2019 hochgerechnet (33.622 TJ). Diese Abweichung ist allerdings vor dem Hintergrund eine bis zur Jahresmitte noch durch Corona reduzierten Mobilität und den Effekten hoher Treibstoffpreise (z.B. in Fahrweise und im Tanktourismus) plausibel. Es ist davon auszugehen, dass diese Effekte im Jahr 2023 nicht mehr in dieser Form vorhanden sind.

Entwicklung der Energieträger - Nutzenergie Mobilität gesamt 2050

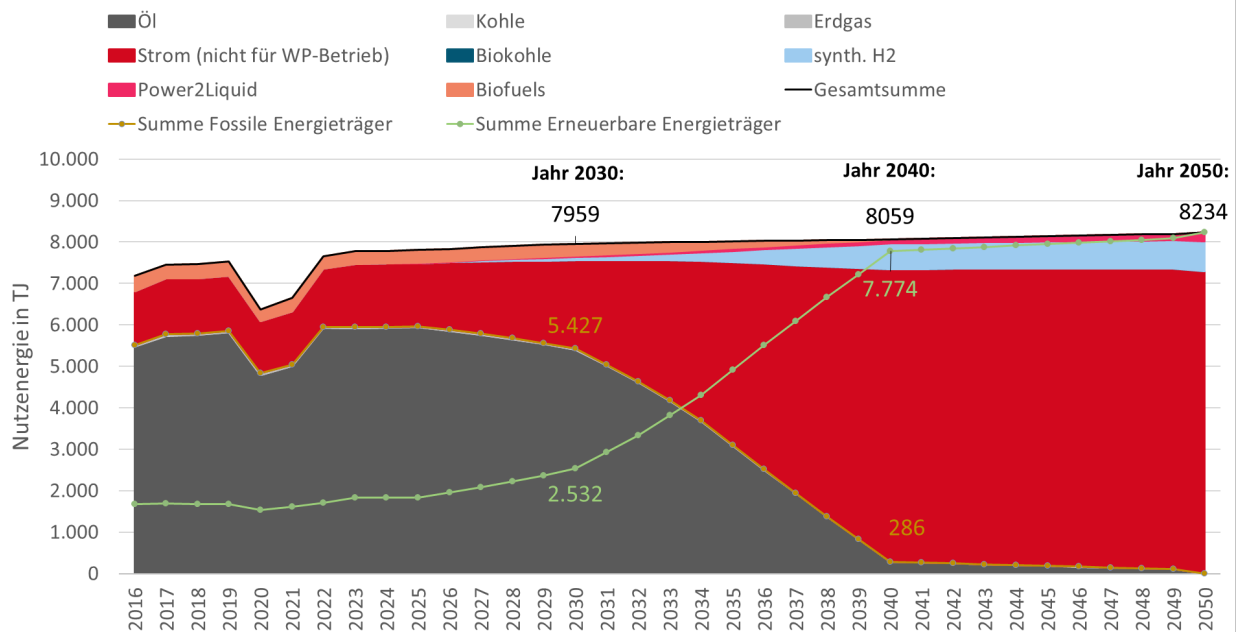


Abb. 18: Zeitlicher Verlauf der Nutzenergie Mobilität, Szenario 2050.

Entwicklung der Energieträger - Endenergie Mobilität gesamt 2050

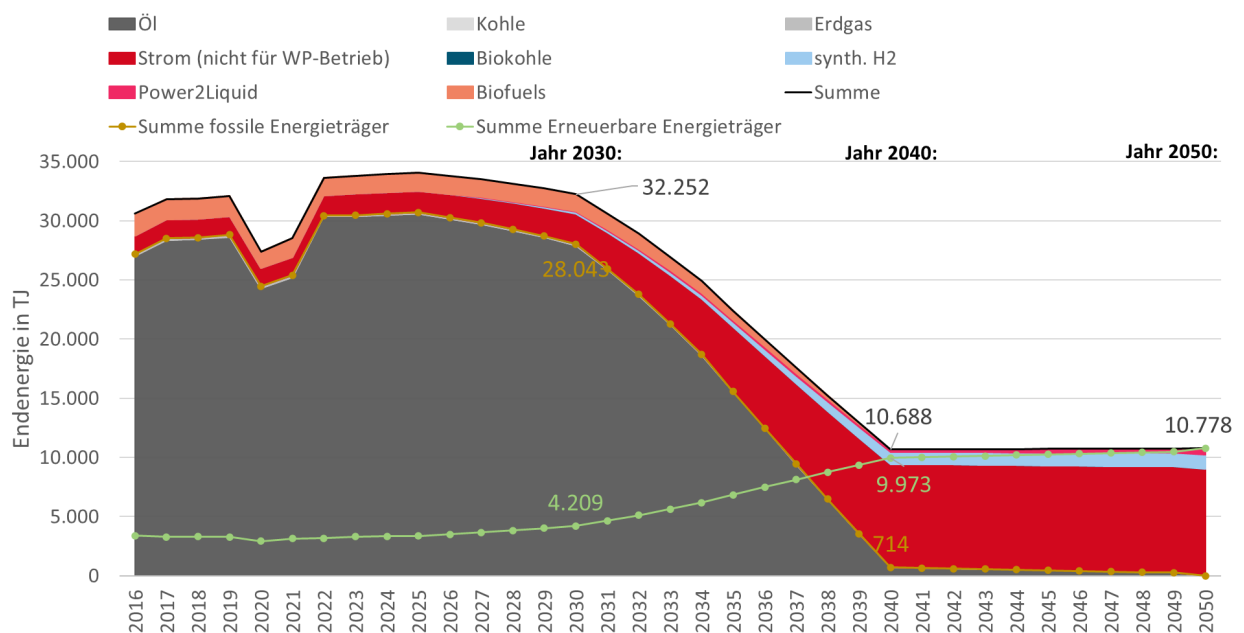


Abb. 19: Zeitlicher Verlauf der Endenergie Mobilität, Szenario 2050.

10. Energiebedarfsdeckung

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des gesamten in Tirol benötigten Energiebedarfs auf Nutz- und Endenergieebene angeführt. Ein Energieflussbild für das Jahr 2050 veranschaulicht die einzusetzende Energiemenge bis hin zur benötigten Energie auf Nutzenergieebene.

10.1. Nutzenergiebedarf 2021 bis 2050

Der Nutzenergiebedarf Tirols setzt sich aus den Nutzenergiebedarfen in den Sektoren Sonstiges/Gebäude, Produktion und Mobilität zusammen (Kap. 9.1.3, 9.2.3 und 9.3.2). Die Höhe des Nutzenergiebedarfs des Jahres 2021 als Basiswert der gegenständlichen Studie entstammt der „Nutzenergieanalyse 1993 – 2021“ der STATISTIK AUSTRIA (2022), wobei die darin enthaltenen Angaben zum Endenergieeinsatz mit angenommenen Wirkungsgraden auf Nutzenergieebene heruntergebrochen wurden. Die Höhe der Nutzenergieeinsätze in den jeweiligen Sektoren im Jahr 2050 wurden unter Berücksichtigung der in Kap. 7 angeführten Rahmenbedingungen – u.a. Bevölkerungsentwicklung und Wirtschaftsentwicklung – abgeschätzt. Die dabei berücksichtigte Betrachtung der derzeit (2021) eingesetzten und zukünftig (2050) einzusetzenden Energieträger erlaubt Aussagen zur Entwicklung der Nutzenergiebedarfsdeckung.

Die Ergebnisse der Nutzenergieanalysen in der Sektoren Sonstiges/Gebäude, Produktion und Mobilität zeigen einen insgesamt rückläufigen Trend hinsichtlich der benötigten Nutzenergiemenge von rund 52.755 TJ im Jahr 2021 auf etwa 49.950 TJ im Jahr 2050, was einer Reduktion um rund 5 % entspricht (Tab. 17).

Betrag der Anteil Erneuerbarer Energie im Jahr 2021 auf Nutzenergieebene rund 56 %, so wird er sich gemäß Zielsetzung bis zum Jahr 2050 auf 100% erhöhen.

Der Energieträger **Strom** wird auch zukünftig der wichtigste Energieträger auf Nutzenergieebene sein. Betrag sein Anteil im Jahr 2021 rund 32%, so wird 2050 jede zweite auf Nutzenergieebene eingesetzte kWh auf Strom entfallen rund (50%).

Die **Umweltwärme**, die ‚heute‘ lediglich rund 2% des Nutzenergieeinsatzes abdeckt, wird im Jahr 2050 fast ein Fünftel zur Nutzenergiebedarfsdeckung beitragen (18%). Der Anteil des Energieträgers **Holz** an der Nutzenergiebedarfsdeckung – Scheitholz, Hackschnitzel, Pellets und Holzabfälle – wird 2050 nahezu unverändert zu heute sein und bei 12% liegen. Der Anteil der **Fernwärme** am Nutzenergiebedarf wird sich von 6% im Jahr 2021 auf rund 9% im Jahr 2050 steigern, der Anteil der **Solarthermie** stagniert bei rund 2%. Derzeit auf Nutzenergieebene noch kaum eingesetzte Energieträger werden bis 2050 teils wichtige Anteile an der Bedarfsdeckung leisten – insbesondere **synthetisches Methan/Biogas** und **synthetischer Wasserstoff** mit rund 4% bzw. rund 3%.

Tab. 17 Nutzenergiebedarf in Tirol 2021 und 2050 gemäß Szenario.

Energieträger	Nutzenergiebedarf						Änderung 2050 ggb. 2021 [%]
	2021			2050			
	[TJ]	[GWh]	[%]	[TJ]	[GWh]	[%]	
Strom	17.087	4.746	32%	24.922	6.923	50%	+46%
Holz	7.556	2099	14%	5.862	1.628	12%	-22%
Fernwärme	2.951	820	6%	4.528	1.258	9%	+53%
Umweltwärme	975	271	2%	9.082	2.523	18%	+831%
Solarthermie	892	248	2%	1.085	301	2%	+22%
Biokohle				220	61	0%	
Synth. H2				1.526	424	3%	
Synth. CH4 / Biogas				1.900	528	4%	
Biofuels	328	91	1%	0			-100%
Synth. Fuels / Power2Liquid				703	195	1%	
Fossil	22.965	6.379	44%	8	2	0%	-100%
Erneuerbar	29.790	8.275	56%	49.942	13.873	100%	+67%
Gesamt	52.755	14.654	100%	49.950	13.875	100%	-5%

Abb. 20 zeigt die zeitliche Entwicklung des Nutzenergiebedarfs sowie der Nutzenergiebedarfsdeckung gemäß Szenario. Deutlich erkennbar ist das Auslaufen der fossilen Energieträger Öl, Erdgas und Kohle an der Basis sowie der kontinuierliche Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energieträger. Der Einsatz von Strom steigt sowohl absolut gesehen als auch anteilig an der Nutzenergiebedarfsdeckung – verstärkt aufgrund des zusätzlichen Strombedarfs für die stark steigende Umweltwärmenutzung. Der absolut betrachtete leichte Zuwachs an Fernwärme wird bei einer verbesserten Energieeffizienz der Gebäude infolge umfassender Sanierungen deutlich mehr Gebäude mit Wärme versorgen können.

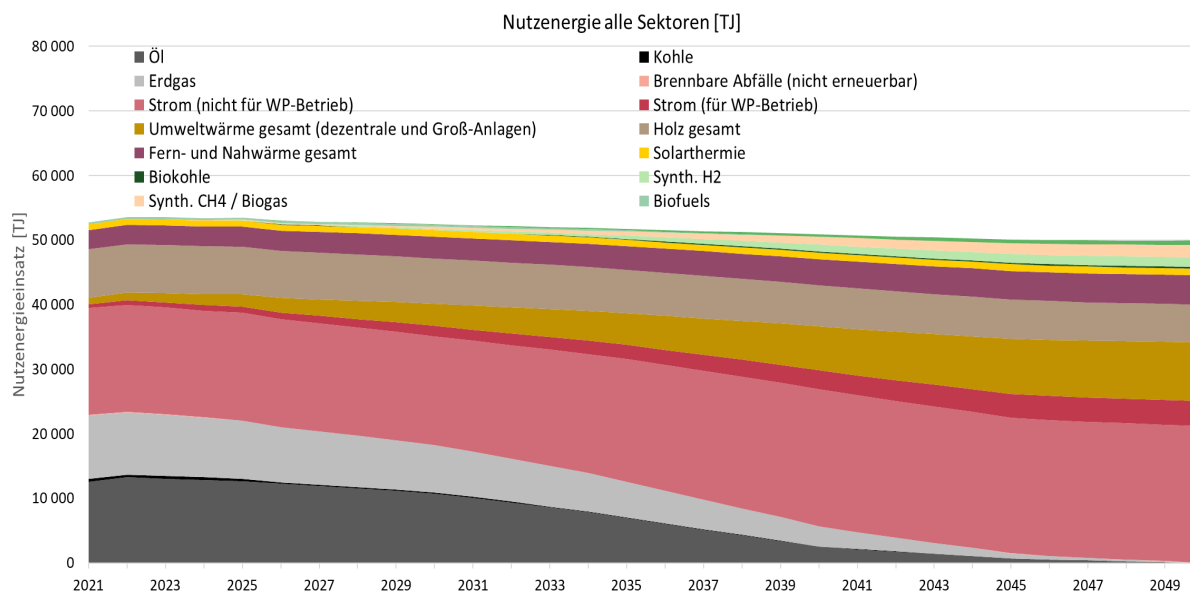


Abb. 20: Entwicklung des Nutzenergiebedarfes 2021 bis 2050¹⁷.

10.2. Endenergiebedarf 2021 bis 2050

Der Endenergiebedarf Tirols setzt sich aus den Endenergiebedarfen in den Sektoren Sonstiges/Gebäude, Produktion und Mobilität zusammen (Kap. 9.1.5, 9.2.4 und 9.3.4). Die Höhe des Endenergiebedarfs des Jahres 2021 als Basiswert der gegenständlichen Studie entstammt den „Bundesländerbilanzen Tirol 1988 – 2021“ der STATISTIK AUSTRIA (2022). Die Höhe der Endenergieeinsätze in den jeweiligen Sektoren im Jahr 2050 wurden unter Berücksichtigung der in Kap. 10.1 angeführten Nutzenergiebedarfe unter Berücksichtigung von angenommenen Wirkungsgraden abgeschätzt. Die dabei berücksichtigte Betrachtung der derzeit (2021) eingesetzten und zukünftig (2050) einzusetzenden Energieträger erlaubt Aussagen zur Entwicklung der Endenergiebedarfsdeckung.

Die summierten Ergebnisse der sektorspezifischen Endenergieanalysen (Einsatz minus Leitungsverluste zum Verbraucher) zeigen eine deutliche Reduktion der eingesetzten Energiemenge von rund 86.985 TJ im Jahr 2021 auf rund 60.769 TJ im Jahr 2050. Das entspricht einer Reduktion um rund 30% (Tab. 18).

Strom wird auch auf Endenergieebene zukünftig der wichtigste Energieträger sein. Während sein Anteil am Endenergieeinsatz im Jahr 2021 bei 23% lag, wird er gemäß Szenario im Jahr 2050 bei 47% liegen. Der Strombedarf

¹⁷ Der leichte Anstieg des Nutzenergiebedarfs zwischen 2021 und 2022 ist auf die Auswirkungen von COVID-19 zurückzuführen.

auf Endenergieebene wird voraussichtlich bei rund 7.904 GWh im Jahr 2050 liegen – verglichen mit etwa 5.572 GWh im Jahr 2021.

Die **Umweltwärme**, die ‚heute‘ lediglich rund 1% des Endenergieeinsatzes abdeckt, wird im Jahr 2050 rund 17% zur Endenergiebedarfsdeckung beitragen. Der Anteil des Energieträgers **Holz** an der Endenergiebedarfsdeckung – Scheitholz, Hackschnitzel, Pellets und Holzabfälle – wird 2050 vergleichsweise zu heute um einen Prozentpunkt auf 13% steigen. Der Anteil der **Fernwärme** am Endenergiebedarf wird sich von 4% im Jahr 2021 auf rund 8% im Jahr 2050 verdoppeln. Derzeit auf Endenergieebene noch kaum eingesetzte Energieträger werden bis 2050 teils wichtige Anteile an der Bedarfsdeckung leisten – insbesondere **synthetisches Methan/Biogas** mit rund 5%, **synthetischer Wasserstoff** mit rund 4% und **synthetische Fuels / Power 2 Liquid** mit rund 3%.

Im Jahr 2021 lag der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieeinsatz bei etwa 43% auf Basis der eingesetzten Endenergie. Um den Endenergiebedarf im Jahr 2050 ausschließlich durch erneuerbare Energien zu decken, ist der Einsatz erneuerbarer Energien gegenüber dem Wert des Jahres 2021 bei gleichzeitiger Reduktion im genannten Umfang um etwa 60% zu erhöhen (Tab. 18).

Abb. 21 zeigt die zeitliche Entwicklung des Endenergiebedarfs sowie die Endenergiebedarfsdeckung gemäß Szenario. Deutlich erkennbar ist das ‚Ausschleifen‘ der fossilen Energieträger Öl, Erdgas und Kohle an der Basis sowie der kontinuierliche Ausbau der Nutzung Erneuerbarer Energieträger. Der Einsatz von Strom steigt sowohl absolut gesehen als auch anteilig an der Nutzenergiebedarfsdeckung – verstärkt aufgrund des zusätzlichen Strombedarfs für die stark steigende Umweltwärmenutzung. Der absolut betrachtet leichte Zuwachs an Fernwärme wird bei einer verbesserten Energieeffizienz der Gebäude infolge umfassender Sanierungen deutlich mehr Gebäude mit Wärme versorgen können. Der absolut gesehen verringerte Einsatz von Holz auf Endenergieebene ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass Holz zukünftig vermehrt in der Sekundärenergieebene Einsatz finden wird – unter anderem in Heizwerken und Holzvergasern bzw. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen.

Tab. 18: Endenergiebedarf in Tirol 2021 gemäß STATISTIK AUSTRIA (2022), und 2050 gemäß Szenario.

Energieträger	Endenergiebedarf						Änderung 2050 ggb. 2021 [%]
	2021			2050			
	[TJ]	[GWh]	[%]	[TJ]	[GWh]	[%]	
Strom	20.059	5.572	23 %	28.453	7.904	47 %	+42%
Holz	10.505	2.918	12 %	8.118	2.255	13 %	-23%
Umweltwärme	1.149	319	1 %	10.320	2.867	17 %	+798%
Fernwärme*	3.096	860	4 %	4.843	1.345	8 %	+56%
Solarthermie	901	250	1 %	1.233	343	2 %	+37%
Biokohle				479	133	1 %	
Synth. H2				2.439	678	4 %	
Synth. CH4 / Biogas	13	4		2.924	812	5 %	
Biofuels	1.597	444	2 %				-100%
Synth. Fuels / Power2Liquid				1.947	541	3 %	
Sonst. Biogene	149	41	0 %				-100 %
Brennbare Abfälle	148	41	0 %	12	3	0 %	-91%
Öl	35.092	9.748	40 %				-100%
Kohle	897	249	1 %				-100%
Erdgas	13.337	3.705	15 %				-100%
Fossil	49.326	13.702	57%	12	3	0%	-100%
Erneuerbar	37.659	10.461	43%	60.756	16.877	100%	+61%
Gesamt	86.985	24.163	100%	60.769	16.880	100%	-30%

* Berücksichtigung als 100% Erneuerbar

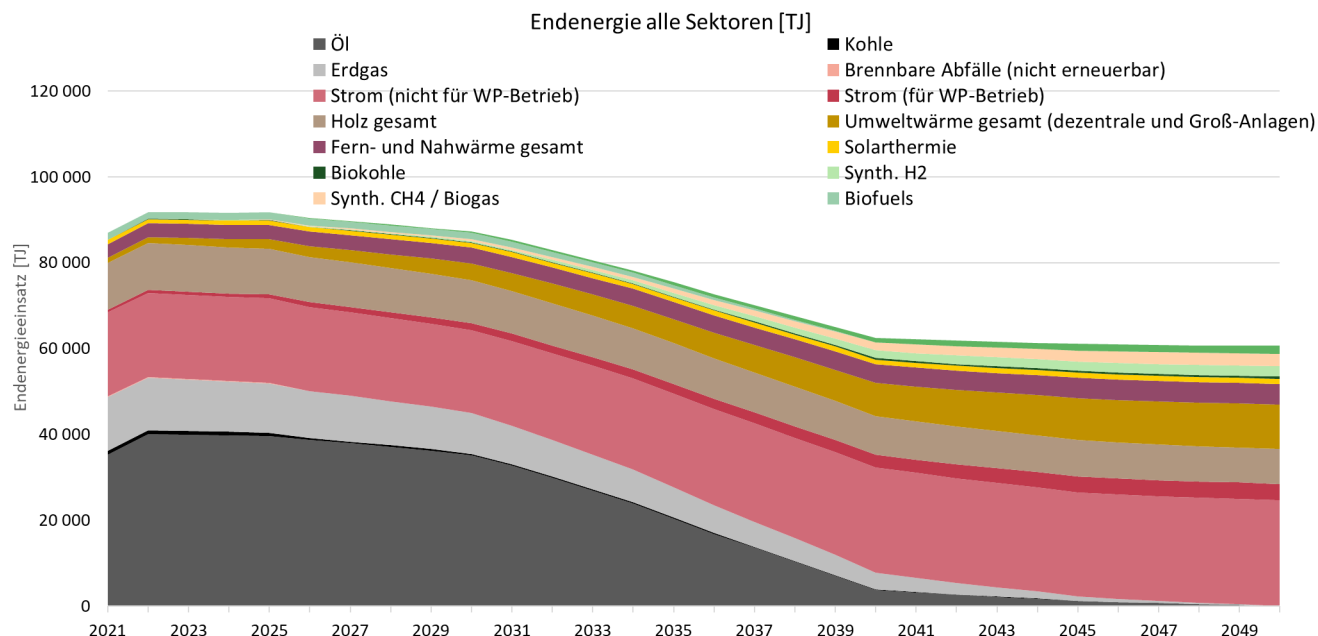


Abb. 21: Entwicklung des Endenergie-Einsatzes 2021 bis 2050¹⁸.

Die insgesamt verstärkte Reduktion der eingesetzten Energiemengen auf Endenergieebene um rund 30% zwischen 2021 und 2050 im Vergleich zur Nutzenergieebene (minus 5 %) verdeutlicht die erwarteten Effizienzsteigerungen im Zuge des Umbaus des Energiesystems durch Technologiewechsel und Substitution fossiler Energieträger durch Erneuerbare. Die absoluten Verluste von Endenergie- zur Nutzenergieebene betragen im Jahr 2021 noch rund 34.230 TJ – für das Jahr 2050 werden sie trotz des angenommenen Wirtschaftswachstums und angenommener steigender Bevölkerungszahlen auf rund 10.819 TJ sinken. Dies ergibt sich primär aus dem Wechsel von Verbrennungsmotor-getriebenen Fahrzeugen zu elektrisch betriebenen Fahrzeugen aber auch durch die Gebäudesanierung.

¹⁸ Der leichte Anstieg des Endenergiebedarfs zwischen 2021 und 2022 ist auf die Auswirkungen von COVID-19 zurückzuführen.

10.3. Eingesetzte Energiemengen 2021 bis 2050

Die nachfolgend angeführte eingesetzte Energiemenge des Jahres 2021 stellt die Menge an Primärenergie und importierter Energie **ohne Stromimporte** sowie unter Berücksichtigung stattfindender Pelletexporte (Betrachtung im Saldo) dar, die im Energiesystem Tirols im Jahr 2021 erforderlich war. Der ergänzend dargestellte Verlauf der eingesetzten Energiemenge bis zum Jahr 2050 beziffert die jährlich im Saldo benötigte Primärenergie bei jahresbilanzieller Betrachtung des Energiesystems – das heißt ohne Betrachtung der zeitlichen Dimension von Dargebot und Nachfrage und somit ohne Energiespeicher und ohne Stromimporte.

Gemäß STATISTIK AUSTRIA (2022) betrug die eingesetzte Energiemenge ohne Stromimporte und abzüglich exportierter Pellets im Jahr 2021 in Summe 26.428 GWh. Im Rahmen der gegenständlichen Studie wurde die erforderliche einzusetzende Energiemenge für das Jahr 2050 mit 22.249 GWh beziffert und die eingesetzten Mengen zwischen 2021 und 2050 linear dargestellt, da ein zukünftiger Anlagenausbau aus heutiger Sicht nicht verlässlich prognostiziert werden kann. Als Zwischenziele wurden das Photovoltaik-Ausbauziel bis 2027 – plus 1.000 GWh/a zwischen 2022 und 2027 und die Inbetriebnahme einer thermischen Abfallverwertungsanlage hinterlegt.

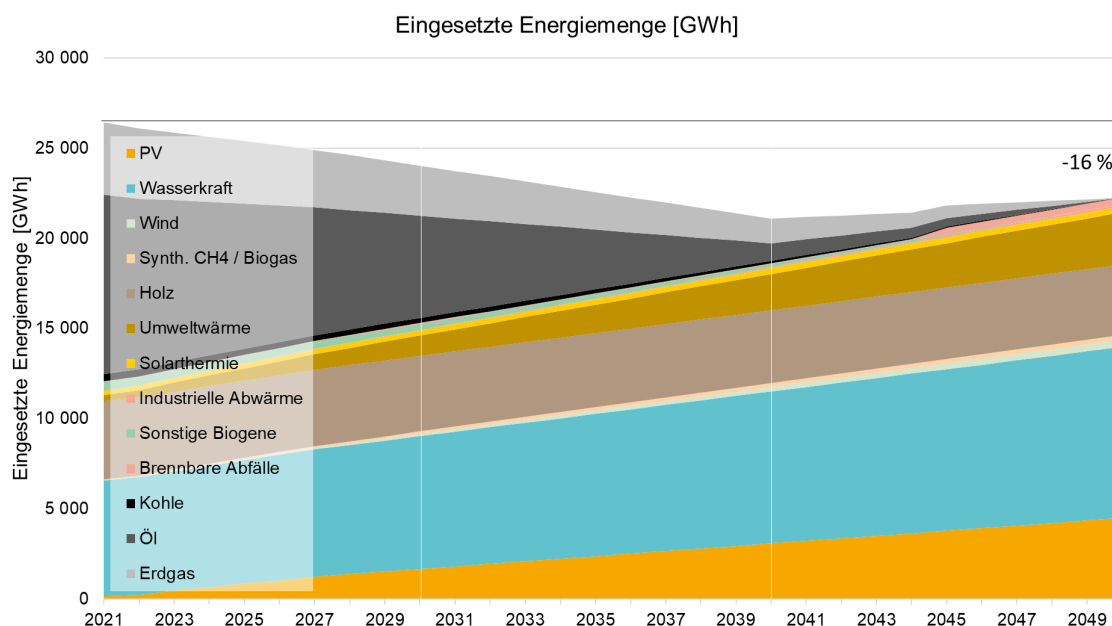


Abb. 22: Eingesetzte Energiemengen ohne Stromimporte 2021 und 2050.

Abb. 22 zeigt die einzusetzenden Energiemengen auf Energieträger-Basis. Die Reduktion der insgesamt einzusetzenden Energiemengen um etwa 16% bis 2050 verdeutlicht die hinterlegten Effizienzsteigerungen des Energiesystems.

Tab. 19 zeigt analog zu Abb. 22 die Verteilung der einzusetzenden Energieträger für die Jahre 2021 und 2050 und gibt einen Überblick über Änderungen gegenüber dem Basisjahr 2021. Der starke Ausbau erneuerbarer Energieträger zeigt sich vor allem beim Zuwachs der Photovoltaik, die um 2.615% gegenüber 2021 ansteigt und der Umweltwärme, die einen Anstieg von 764% im Vergleich zu 2021 verzeichnet. In Summe werden alle fossilen Energieträger bis auf brennbare Abfälle, die für die thermische Abfallverwertungsanlage benötigt werden durch erneuerbare Energieträger ersetzt. Gleichzeitig wird der Energiebedarf bis zum Jahr 2050 um 16% reduziert.

Tab. 19: Einzusetzende Energie 2021 und 2050.

	2021		2050		Änderung ggb. 2021
	[GWh]	[%]	[GWh]	[%]	2050
Wasserkraft	6.416	24 %	9.479	43 %	48 %
Photovoltaik	164	1 %	4.507	20 %	2.648%
Wind	0	0 %	400	2 %	
Synth. CH4 / Biogas	66	0 %	280	1 %	326 %
Holz	4.323	16 %	3.878	17 %	-10 %
Umweltwärme	336	1 %	2.899	13 %	764 %
Solarthermie	252	1 %	343	2 %	36 %
Industrielle Abwärme	0	0 %	110	0 %	
Sonstige Biogene	489	2 %	0	0 %	-100 %
Brennbare Abfälle	41	0 %	353	2 %	760 %
Öl	9.917	38 %	0	0 %	-100 %
Kohle	407	2 %	0	0 %	-100 %
Erdgas	4.018	15 %	0	0 %	-100 %
Fossile	14.383	54 %	353	2 %	-98 %
Erneuerbare	12.046	46 %	21.809	98 %	81 %
Summe	26.428	100 %	22.249	100 %	-16 %

10.4. Vereinfachtes Energie-Flussbild 2050

Ergänzend zum detaillierten Energie-Flussbild (Kap. 13) enthält (Abb. 23) eine stark vereinfachte Darstellung des Energiesystems 2050. Die Breite der Energieflüsse (grün) sowie der Verluste (grau) sind proportional dargestellt.

Das Flussbild zeigt vereinfacht die aufgrund der angesetzten und angenommenen Rahmenbedingungen erwartete Nachfragemenge an **Nutzenergie** bei den Endnutzern und zeigt aufsummiert die benötigten Energiemengen auf den Ebenen **Endenergie** und **eingesetzte Energie ohne Stromimporte (Primärenergie)** zur Bereitstellung der nachgefragten Nutzenergie, wobei die benötigten Energiemengen in Richtung eingesetzte Energiemenge/Primärenergie aufgrund auftretender **Verluste durch Umwandlung, Transport und Verteilung** stetig steigen.

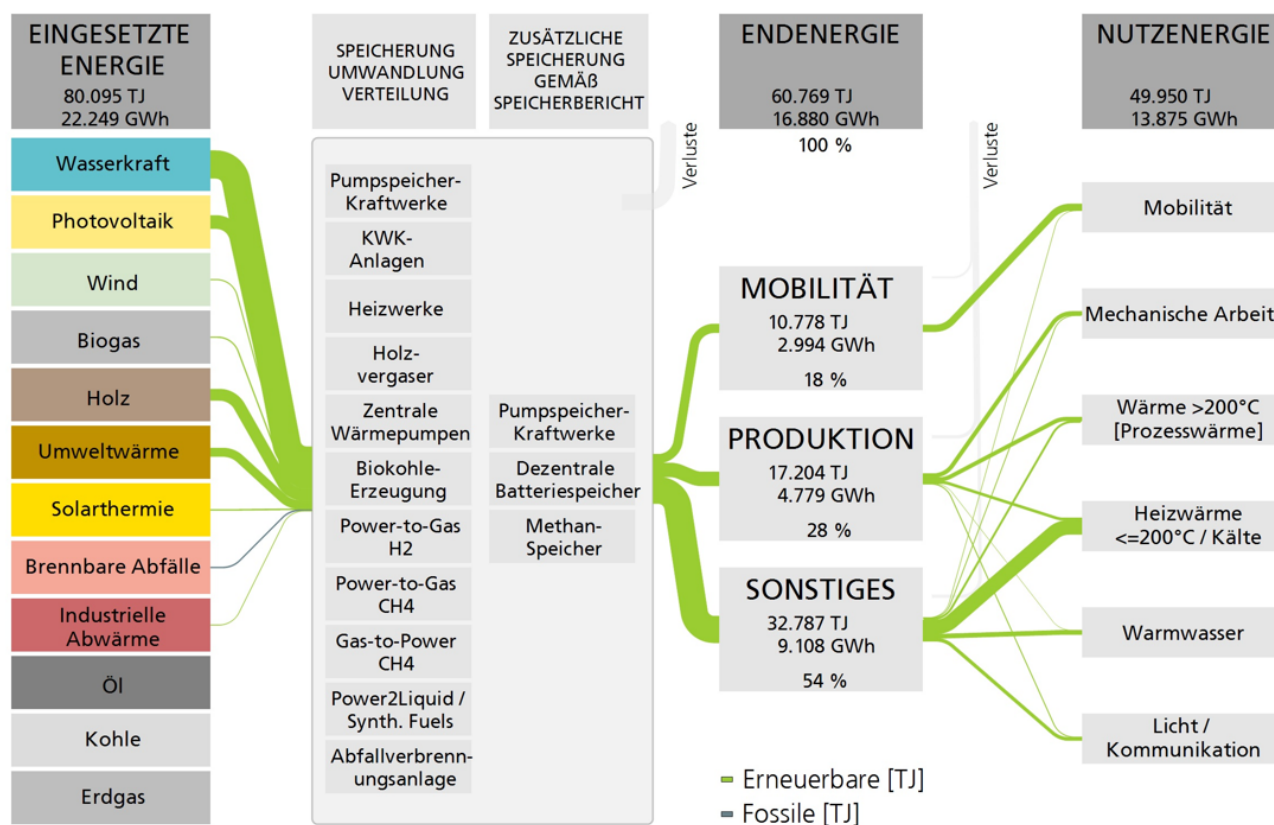


Abb. 23: Vereinfachtes Energie-Flussbild 2050.

11. Diskussion der Ergebnisse unter Einbeziehung der Studie „Energiespeicher Tirol 2050“

Die gegenständliche Studie verfolgt das Ziel, darzustellen, ob und unter Einsatz welcher Technologien und welchen Energieaufwands auf verschiedenen Energiesystemebenen die Erreichung des Landesziels „Tirol 2050 energieautonom“ gelingen kann. Gemäß Zielsetzung des Landes Tirol soll die Energieautonomie im Jahr 2050 jahresbilanziell erfolgen. Die Auswertungen der gegenständlichen Studie basieren auf den Daten der Bundesländerbilanz 2021 (STATISTIK AUSTRIA 2022) sowie diversen weiteren Annahmen wie z.B. bezüglich Bevölkerungsentwicklung und Wirtschaftsentwicklung, aber auch politischen Zielsetzungen (Kap. 7).

Die im Jahr 2023 abgeschlossene Studie ‚Energiespeicher Tirol 2050‘ (EBENBICHLER et al. 2023) beleuchtet aufbauend auf der Vorgängerstudie (EBENBICHLER et al. 2021) der gegenständlichen Studie die gleiche Thematik, jedoch erweitert um die Berücksichtigung der Verfügbarkeit und Nachfrage nach Energie in hoher zeitlicher Auflösung (Stundenmittelwerte) sowie Hinterlegung eines durchschnittlichen ‚Standard‘-Wetterjahres zur Abbildung der Produktion der volatilen Energieträger. Um die erhöhte **Nachfrage nach Energie im Winter** bei gleichzeitig relativ geringer Energieerzeugung durch die erhöhte **Energieerzeugung im Sommerhalbjahr** decken zu können, wurden in der Studie verschiedene Speichertypen und -größen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten berücksichtigt, wie zum Beispiel **Methanspeicher, Pumpwasserkraftwerke, Batterien** oder auch **Wasserstoffspeicher**. Da die Berücksichtigung von Energiespeichern mit Verlusten behaftet ist, stieg der Bedarf an einzusetzender Energie gegenüber der Studie ‚Energie-Ziel-Szenario 2050 mit Zwischenziel 2030‘ (EBENBICHLER et al. 2021) bei gleicher Datenbasis – Bundesländerbilanzdaten das Jahr 2016 (STATISTIK AUSTRIA 2017) – an.

Die gegenständliche Studie ist aufgrund der abweichenden Datengrundlagen – Bundesländerbilanzdaten der Jahre 2021 bzw. 2016 – **nur bedingt** mit der Energiespeicher-Studie **vergleichbar**, folgende Grundaussagen gelten jedoch für beide Studien:

- > Die **Zielerreichung** der Energieautonomie Tirols ist bis zum Jahr 2050 bei den gegebenen nutzbaren Energiepotenzialen Tirols **mit den derzeit verfügbaren Technologien machbar**.
- > Zur Zielerreichung sind **alle zur Verfügung stehenden Energieressourcen** in Tirol **optimal zu nutzen**, eine Konzentration auf einzelne wenige Ressourcen reicht nicht aus.
- > Bei einer hochaufgelösten Betrachtung der zeitlichen Verfügbarkeit von Energieerzeugung und -nachfrage ist eine **verstärkte Speicherung** im System notwendig. Gemäß Studie ‚Energiespeicher Tirol 2050‘ wird diese in einer Größenordnung liegen, die einen **Mehrbedarf an einzusetzender Energie** aufgrund von Speicher- und Umwandlungsverlusten verursacht. Der **Energiemehrerzeugungsaufwand** liegt demnach bei **rund 2.194 GWh/a** Strom, der beispielhaft durch **Photovoltaik Aufdach-Anlagen bzw. Windkraftanlagen** erzeugt werden kann.

12. Möglicher Anlagenbestand 2050

Nachfolgend wird grob ein möglicher Anlagenbestand zur Sicherstellung der ermittelten benötigten Erzeugung im Jahr 2050 gemäß Kap. 10 angeführt. Die angeführte Anzahl von Anlagen ist als **grober Richtwert** zu sehen und hängt von der jeweiligen Anlagenleistung, den Betriebsstunden sowie der tatsächlichen Erzeugung ab.

12.1.1. Wasserkraft-Anlagen

Gemäß Tiroler Energiemonitoring 2022 (HERTL et al. 2023) lag die Energieerzeugung aus Wasserkraft Mitte 2023 bei rund 7.580 GWh/a. Gemäß Wasserkraftausbauziel (ADTLR 2011) soll das Regelarbeitsvermögen (RAV) der Tiroler Wasserkraftwerke bei 9.479 GWh/a liegen (Kap. 8.1). Da im Rahmen der gegenständlichen Studie darüber hinaus kein weiterer Ausbau angesetzt wurde, verbleibt ein zusätzlich benötigter Ausbau des Regelarbeitsvermögen von 1.899 GWh/a bis 2050 im Saldo, welcher durch die Neuerrichtung von Kraftwerken sowie durch die Revitalisierung bestehender Kraftwerksanlagen erreicht werden soll (Tab. 21).

Tab. 20: Möglicher Wasserkraftanlagen-Ausbau bis 2050.

Wasserkraftwerke	
Erzeugung 2023 (RAV)	7.580 GWh/a
Erzeugungs-Ziel 2050 gemäß Szenario (RAV)	9.479 GWh/a
Geplanter Anlagenzubau bis 2050	
Zubau von Groß-Wasserkraftwerken	1.400 GWh/a
Zubau von Regional-Wasserkraftwerken	300 GWh/a
Revitalisierung, Ausbau, Neubau von Kleinwasserkraftwerken	199 GWh/a
Summe Erzeugung durch Neubau und Revitalisierung bis 2050 (RAV)	1.899 GWh/a

12.1.2. Photovoltaik-Anlagen

Gemäß STATISTIK AUSTRIA (2023) betrug die erzeugte Strommenge mittels Photovoltaik in Tirol im Jahr 2022 rund 249 GWh, wovon 16 GWh auf Freiflächenanlagen entfielen (Kap. 8.3.4).

Entsprechend dem vorliegenden Szenario soll der Photovoltaik-Anlagenpark bis 2050 eine Mehrerzeugung von 4.195 GWh/a leisten, was in etwa einem Ausbau von PV-Anlagen um in Summe rund 4.195 MW_p entspricht. 3.989 GWh/a entfallen dabei auf Dachflächen, 206 GWh/a auf Freiflächen-Anlagen (Tab. 21).

Beispielhaft könnte diese Erzeugung durch die Errichtung von rund 126.000 Anlagen à 15 kW_p auf Wohngebäuden (Modulfläche je etwa 75 m²) sowie 15.000 Anlagen à 140 kW_p auf gewerblichen Gebäuden, Hallen etc. (Modulfläche je etwa 700 m²) sowie zusätzlich etwa 86 Freiflächen-Anlagen in Dimension und Ertrag gemäß des Freiflächen-Photovoltaikparks Assling (2.000 kW_p mit einer Modulfläche von 13.500 m²) erreicht werden (Tab. 21).

Tab. 21: Möglicher Photovoltaik-Anlagen-Zubau bis 2050.

Photovoltaik-Anlagen	
Erzeugung 2022	249 GWh/a
Erzeugungs-Ziel 2050 Aufdach-Anlagen gemäß Szenario	4.285 GWh/a
Erzeugungs-Ziel 2050 Freiflächen-Anlagen gemäß Szenario	222 GWh/a
Möglicher Anlagenzubau bis 2050	
Wohngebäude (Aufdach-Anlagen à 15 kW _p) 130.000 Anlagen	1.952 GWh/a
Gebäude für öffentliche / private Dienstleistungen, Hotels, Industrie- und Lagergebäude (Aufdach-Anlagen, à 140 kW _p) 15.000 Anlagen	2.100 GWh/a
Freiflächenanlagen (à Freiflächenanlage Assling, 2.000 kW _p , 30.000 m ² Fläche) 86 Anlagen	206 GWh/a
Summe zusätzliche Erzeugung bis 2050	4.258 GWh/a

12.1.3. Windkraft-Anlagen

Gemäß Energiemonitoring Tirol 2022 (HERTL et al. 2023) wurden in Tirol im Herbst 2023 fünf Kleinwindkraft-Anlagen mit einer geschätzten Stromerzeugung von rund 12.000 kWh/a betrieben. Gemäß Szenario sollen im Jahr 2050 rund 400 GWh/a Strom mittels Windkraftanlagen für das Energiesystem Tirols erzeugt werden.

Tab. 22: Möglicher Windkraft-Anlagen-Zubau bis 2050

Windkraft-Anlagen	
Erzeugung 2023	~ 0,012 GWh/a
Erzeugungs-Ziel 2050	400 GWh/a
Möglicher Anlagenzubau bis 2050	
Windkraft-Räder à 4 MW und einer Erzeugung von rund 9 GWh/a 45 Anlagen	400 GWh/a
Summe zusätzliche Erzeugung bis 2050	400 GWh/a

Beispielhaft könnte diese Erzeugung durch die Errichtung von 5 Anlagenparks mit je 9 Windrädern à 4 MW erreicht werden.

12.1.4. Synthetischer Wasserstoff

Wasserstoff als Umwandlungsprodukt der Sekundärenergieebene wird im Jahr 2050 eine wichtige Rolle im Energiesystem Tirols spielen. Gemäß Szenario werden 2050 rund 753 GWh Wasserstoff benötigt. Die derzeit in Tirol bei einigen Unternehmen eingesetzten Wasserstoff-Mengen werden – abgesehen von der Wasserstoff-Tankstelle

Innsbruck – durch die Unternehmen selbst vor Ort produziert und werden somit im Energiesystem auf Endenergieebene als eingesetzte Strom- oder Gasmenge abgebildet.

Tab. 23: Möglicher Elektrolyseur-Zubau bis 2050

Synthetischer Wasserstoff	[GWh]
Erzeugung 2023*	0 GWh/a
Erzeugungs-Ziel 2050	753 GWh/a
Möglicher Anlagenzubau bis 2050	
Elektrolyseure à 3,2 MW mit einer Erzeugung von 15,7 GWh/a (à la MPreis-Anlage in Völs) 48 Elektrolyseure	753 GWh/a
Summe zusätzliche Erzeugung bis 2050	753 GWh/a

* Der firmenintern erzeugte Wasserstoff wird auf Nutzenergieebene bilanziert.

Im März 2022 wurde der gewerbliche Elektrolyseur der Firma MPreis in Betrieb genommen. Mit einer Leistung von 3,2 MW können auf dem Betriebsgelände in Völs täglich rund 1.290 kg Wasserstoff erzeugt werden. Die maximal mögliche erzeugte Wasserstoffmenge beinhaltet rund 15,7 GWh/a (<https://www.mpreis.at/wasserstoff/faq>).

Ob die benötigten Wasserstoffmengen durch größere zentrale Anlagen erzeugt und mittels Pipelines oder Trailern zu den Abnehmern geführt werden oder aber die Wasserstoffproduktion vornehmlich an den Unternehmensstandorten selbst bedarfsorientiert on demand erfolgen wird, wird sich zeigen. Sollte letzteres der Fall sein, würde sich auf Endenergieebene der Wasserstoffbedarf reduzieren, der Strombedarf entsprechend – unter Berücksichtigung der anfallenden Verluste bei der Elektrolyse – erhöhen.

12.1.5. Synthetisches Methan

Synthetisches Methan kann unter Stromeinsatz in Power-to-Gas-Anlagen über den Energieträger Wasserstoff produziert werden. Für Tirol wird angenommen, dass gemessen an Tiroler Standards eher größere Anlagen errichtet werden, da sich dieser Energieträger leicht im bestehenden Gasnetz verteilen lässt.

Eine beispielhafte Anlage mit einer elektrischen Leistung von 4 MW kann rund 10 GWh/a an synthetischem Methan produzieren – demnach wäre ein Bestand von rund 77 Anlagen dieser Größenordnung im Jahr 2050 notwendig (Tab. 24).

Tab. 24: Möglicher Anlagen-Zubau zur Erzeugung synthetischen Methans bis 2050.

Synthetisches Methan	
Erzeugung 2023	0
Erzeugungs-Ziel 2050	678 GWh/a
Möglicher Anlagenzubau bis 2050	
Power-to-Gas-Anlagen à 4 MW mit einer Erzeugung von 10 GWh/a 67 Anlagen	678 GWh/a
Summe zusätzliche Erzeugung bis 2050	678 GWh/a

12.1.6. Biokohle

Biokohle wird gemäß Szenario vor allem im Produktionsbereich zu geringen Anteilen auch in der Mobilität (u.a. Achensee- und Zillertalbahn) benötigt. Der Gesamtbedarf wird 2050 bei rund 133 GWh/a liegen.

Die Biokohleproduktion kann gemäß Szenario entweder mittels **Pyrolyse oder Holzvergasung erfolgen**. Es wird angenommen, dass 70% der benötigten Biokohle durch Pyrolyse und 30% durch Holzvergasung erzeugt werden. Dies kann beispielsweise mit mittels etwa neun Pyrolyse-Anlagen à 1,5 MW Brennstoffleistung sowie 15 Holzvergaser-Anlagen à 3,5 MW Brennstoffleistung geschehen (Tab. 25).

Die bei den Pyrolyseanlagen anfallende Abwärme wird direkt an den Erzeugungsanlagen für Trocknung und internen Wärmebedarf verwendet, eventuelle Überschusswärme kann – bei günstigen Rahmenbedingungen – für weitere industrielle Zwecke verwendet werden. Eine Einbindung in das Fernwärmenetz ist aufgrund des Temperaturniveaus nicht standardmäßig vorgesehen.

Tab. 25: Möglicher Anlagen-Zubau zur Biokohle-Erzeugung bis 2050.

Biokohle	
Erzeugung 2022	0
Erzeugungs-Ziel 2050	133 GWh/a
Möglicher Anlagenzubau bis 2050	
Möglicher Anlagenzubau bis 2050	
Holzvergaser à 3,5 MW Brennstoffleistung 14 Anlagen	40 GWh/a
Biokohle Erzeugungs-Anlagen (Pyrolyse) à 1,5 MW Brennstoffleistung 16 Anlagen	93 GWh/a
Summe zusätzliche Erzeugung bis 2050	133 GWh/a

12.1.7. Fernwärme

Die Zunahme des Nah- und Fernwärmebedarfs gemäß Szenario (1.583 GWh/a in 2050) erfordert sowohl den Ausbau und die Verdichtung bestehender Wärmenetze als auch den Bau neuer Wärmenetze in geeigneten Regionen. 2022 wurden in Tirol gemäß STATISTIK AUSTRIA (2023) rund 777 GWh Fernwärme auf Endenergiebasis eingesetzt. Bei angenommenen durchschnittlichen Leitungs- und Transportverlusten in Höhe von 15% ergibt sich eine Nah- und Fernwärmeerzeugung „heute“ in Höhe von rund 914 GWh/a. Demnach ergibt sich ein benötigter Zubau an Anlagen mit einer Nah- und Fernwärmeerzeugung in Höhe von rund 669 GWh/a (Tab. 26). Der zusätzliche Bedarf an Fernwärme im Jahr 2050 könnte beispielsweise durch die Errichtung von etwa zwölf Heizwerken in der Größenordnung der Anlage in Imst (thermische Leistung von rund 22,2 MW; erzeugte Wärmemenge rund 57 GWh/a) gedeckt werden.

Tab. 26: Möglicher Anlagen-Zubau zur Fernwärme-Erzeugung bis 2050

Nah- und Fernwärme	
Erzeugung 2021	914 GWh/a
Erzeugungs-Ziel 2050	1.583 GWh/a
Möglicher Anlagenzubau bis 2050	
Heizwerke à la Biowärme Imst (22,2 MW; 57 GWh/a Wärme) 12 Anlagen	669 GWh/a
Summe zusätzliche Erzeugung bis 2050	669 GWh/a

12.1.8. Umweltwärme

Die Umweltwärme wird einen wichtigen Beitrag zur Wärmebereitstellung in Gebäuden im Jahr 2050 leisten, aber auch in der Produktion wird Umweltwärme benötigt werden. Der gemäß Szenario benötigte Wärmebedarf aus Umweltwärme beträgt rund 2.867 GWh/a.

Gemäß STATISTIK AUSTRIA (2023) wurden im Jahr 2022 in Tirol auf Endenergieebene rund 393 GWh Wärme aus Umweltwärme eingesetzt – es verbleibt somit ein Erschließungsziel bis zum Jahr 2050 von rund 2.474 GWh/a im Saldo. Davon sollen gemäß Szenario rund 90% im Sektor Sonstiges/Gebäude, 10% im Sektor Produktion eingesetzt werden. Tab. 27 stellt einen möglichen Ausbau von Wärmepumpen bis 2050 dar. Dabei wurde ein durchschnittlicher Wärmebedarf (Heizen und Warmwasser) in Abhängigkeit des Gebäudetyps angenommen und die im Jahr 2050 somit auftretenden Wärmebedarfe, die durch die Wärmepumpen gedeckt werden müssen, berechnet.

Insgesamt werden mit diesem Ansatz bis 2050 grob etwa 107.000 zusätzliche Wärmepumpen benötigt – 80.000 für Einfamilienhäuser, 24.500 für Mehrfamilienhäuser und 2.450 für die Produktion.

Tab. 27: Möglicher Zubau von Wärmepumpenanlagen bis 2050

Umweltwärme	
Erzeugung 2022	393 GWh/a
Erzeugungs-Ziel 2050	2.867 GWh/a
Möglicher Anlagenzubau bis 2050	
Wärmepumpen zur Heiz- und Warmwasserbereitstellung in sanierten Einfamilienhäusern	80.000 Anlagen
Wärmepumpen zur Heiz- und Warmwasserbereitstellung in sanierten Mehrfamilienhäusern mit durchschn. 8 Wohnungen	24.500 Anlagen
Wärmepumpen zur Heiz- und Warmwasserbereitstellung in Produktionsbereich	2.450 Anlagen
Summe zusätzliche Erzeugung bis 2050	2.474 GWh/a

12.1.9. Thermische Abfallverwertung

Basierend auf anlagenspezifischen Kennzahlen der AVA-Bozen (Mitt. Bilanzdaten MVA-Bozen 2016-2023) ergibt sich eine jährlich durchschnittlich verarbeitete Restmüllmenge von rund 127.000 t/a. Aktuelle Daten der Abfallverbände in Tirol (Mitt. Abfallverbände 2023) für das Jahr 2022, ohne Osttirol und Reutte, zeigen eine Gesamtmenge von rund 117.000 t verarbeitetem Siedlungsabfall. In weiterer Folge wird bis zum Jahr 2050 ein prognostiziertes Bevölkerungswachstum (STATISTIK AUSTRIA 2022) hinterlegt und demzufolge mit einer jährlich aufkommenden Restmüllmenge von etwa 126.000 t/a gerechnet. Angesichts der ähnlichen Größenordnung jährlich anfallender Restmüllmengen im Einzugsgebiet rund um Bozen und in Tirol wird somit eine in der Größenordnung gleichwertige MVA in Tirol angedacht. Insgesamt könnten mit dieser geschätzten Menge an Siedlungsabfällen in etwa 80 GWh Wärme und 89 GWh elektrische Energie erzeugt werden,

Tab. 28: Möglicher Zubau einer thermischen Abfallverwertungsanlage

Thermische Abfallverwertungsanlage	
Anlagenbestand 2022	keine
Erzeugungsziel Wärme bis 2050	80 GWh/a
Erzeugungsziel Strom bis 2050	89 GWh/a
Möglicher Anlagenzubau bis 2050	
MVA à la MVA-Bozen (59 MW _{th} , 15 MW _{el})	1 Anlage

12.1.10. Zusammenfassung des möglichen benötigten Anlagenzubaus bis 2050

Es wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die angeführte Anzahl von Anlagen lediglich als grobe beispielhafte Richtwerte zu verstehen sind. Die tatsächliche Zahl zusätzlich benötigter Anlagen hängt ganz wesentlich von der weiteren Entwicklung des Energiesystems sowie auch vom Energiebedarf und der jeweiligen Anlagenleistung sowie der tatsächlichen Erzeugung ab.

Tab. 29: Überblick über einen möglichen Anlagenzubau bis zum Jahr 2050.

Energieträger	Anlagentyp/-spezifizierung	Szenario 2050
Wasserkraft	Groß-Wasserkraftwerke	+ 1.400 GWh
	Regional-Wasserkraftwerke	+ 300 GWh
	Revitalisierung von Kleinwasserkraftwerken	+ 199 GWh
Photovoltaik	Aufdach Wohngebäude (à 15 kW _p)	+ 130.000 Anlagen
	Aufdach Dienstleistungsgebäude, Hotels, Industrie- und Lagerhallen (à 140 kW _p)	+ 15.000 Anlagen
	Freifläche (à 1.000 kW _p)	+ 86 Anlagen
Wind	Windturbine (à 4 MW)	+ 45 Anlagen
Wasserstoff	Gewerbliche Elektrolyseure (à 3,2 MW)	+ 48 Anlagen
Synthetisches Methan	P2G-Anlage (à 4 MW)	+ 67 Anlagen
Biokohle	Pyrolyse (à 1,5 MW)	+ 16 Anlagen
	Holzvergaser (à 3,5 MW)	+ 14 Anlagen
Fernwärme	Heizkraftwerk (à 22,2 MW)	+ 12 Anlagen
Umweltwärme	Wärmepumpen zur Heiz- und Warmwasserbereitstellung in sanierten Einfamilienhäusern	+ 80.000 Anlagen
	Wärmepumpen zur Heiz- und Warmwasserbereitstellung in sanierten Mehrfamilienhäusern mit durchschn. 8 Wohnungen	+ 24.500 Anlagen
	Wärmepumpen zur Heiz- und Warmwasserbereitstellung in Produktionsbereich	+ 2.450 Anlagen
Abfälle	Thermische Abfallverwertungsanlage (59 MW _{th} , 15 MW _{el})	+ 1 Anlage



Energie-Zielszenario
TIROL 2050 energieautonom
Aktualisierung 2024

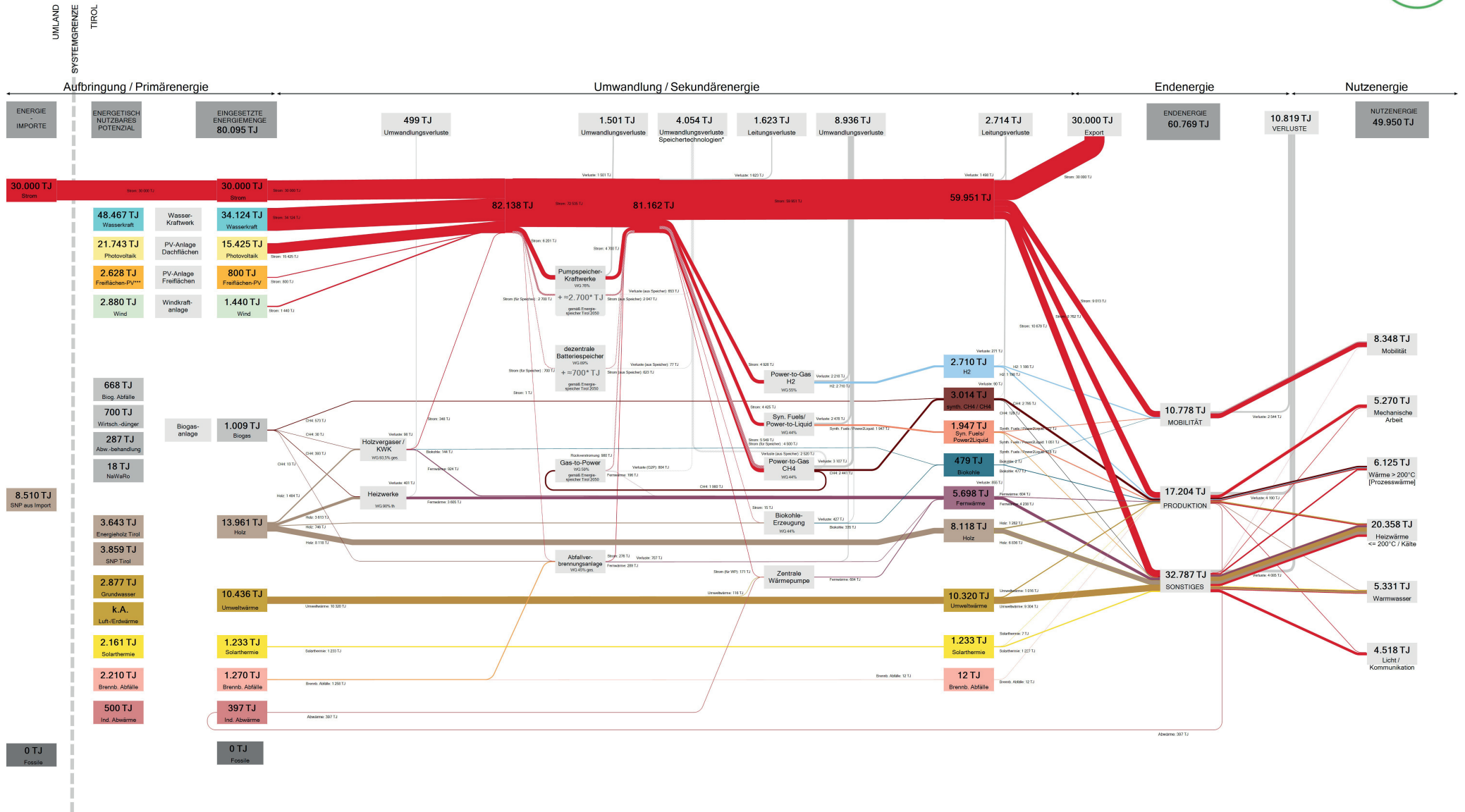


13. Flussbild Szenario 2050

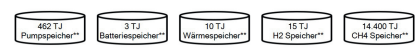
Energie-Zielszenario Tirol 2050 - Aktualisierung 2024

ENERGIEFLÜSSE TIROL 2050

Betrachtung im Jahressaldo plus Speicherbedarf gemäß Studie "Energiespeicher Tirol 2050"



Anmerkung:
 * benötigter Strom-Mehrabbedarf in Anlehnung an Studie "Energiespeicher Tirol 2050"
 ** benötigte Kapazität in Anlehnung an Studie "Energiespeicher Tirol 2050"
 *** exklusive Potenzial aus hochalpinen Flächen / Aintflächen



14. Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AVA	Abfallverbrennungsanlage
AWEL	Alcaline Water Elektrolyse
BEV	Battery Electric Vehicle
BHKW	Bioheizkraftwerk
CH ₄	Methangas
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EAT	Energieagentur Tirol GmbH
EFH	Einfamilienhaus
EMIKAT	Datenmanagementsystem für Emissions- und Energiekataster (emikat.at)
ETS	EU Emissions Trading System (Handelssystem für Treibhausgase)
GJ	Gigajoule [GJ = 10 ⁹ Joule]
GVE	Großvieheinheit
GWh	Gigawattstunde [GW = 10 ⁹ Watt]
h	Stunde
H ₂	Wasserstoff
ILF	ILF Group Holding GmbH
kWh	Kilowattstunde [kW = 10 ³ Watt]
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
kW _p	Kilowattpeak – maximale Leistung von Photovoltaikmodulen unter Standardbedingungen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
MCI	Management Center Innsbruck
MFH	Mehrfamilienhaus
MW	Megawatt [MW = 10 ⁶ Watt]
Nm ³	Normkubikmeter
ORC	Organic Rancine Cycle
ÖWAV	Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
ÖWI	Österreichische Waldinventur
PEMEL	Proton Exchange Membrane Elektrolyse
PHEV	Plug-in Hybrid Vehicle
PtG	Power to Gas
PtL	Power to Liquid
RAV	Regelarbeitsvermögen
SAF	Sustainable Aviation Fuels (nachhaltige Flugtreibstoffe)
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SOEL	Solid Oxide Elektrolyse
STATcube	Statistische Datenbank der Statistik Austria
t	Tonne
TJ	Terajoule [TJ = 10 ¹² Joule]
TWh	Terawattstunden [TW = 10 ¹² Watt]
WP	Wärmepumpe

15. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Systemverständnis	15
Abb. 2:	Energiewandlungskette und Begriffe	17
Abb. 3:	Sanierungsrate und Austauschrate im Szenario (Detail Wohngebäude).....	43
Abb. 4:	Heizwärmebedarfe (HWB) der untersuchten Gebäudekategorien (nach Renovierung und für Neubauten), die im Modell für das Referenz- und das Best-Case-Szenario verwendet wurden.	44
Abb. 5:	Angenommene Bevölkerungsentwicklung in Tirol bis 2050.	44
Abb. 6:	Nutzenergie, die für Raumheizung, Warmwasserbereitung, Haushaltsgeräte und Betriebsstrom (z. B. für öffentliche Gebäude) in den Jahren 2021 und 2050 gemäß Referenz-Szenario benötigt wird.	45
Abb. 7:	Entwicklung des Endenergiebedarfs des Gebäudesektors mit Heizwärmebedarf gemäß Referenz-Szenario.	46
Abb. 8:	Energieträgerverteilung 2021 und 2050 für die beiden untersuchten Szenarien.....	48
Abb. 9:	Beitrag der einzelnen Energieträger zur Deckung des Endenergiebedarfs (gemäß Ref-Szenario für Gebäudesanierungsqualität).	49
Abb. 10:	Energieproduktivität - Vergangenheit (orange) und Prognose (grün).	52
Abb. 11:	Nutzenergieverlauf bis 2050 des Sektors Produktion inklusive Industriegebäude	55
Abb. 12:	Vergleich von Endenergiedaten des 2021 veröffentlichten Szenarios und des gegenständlichen Szenarios. 2016 sind in beiden Fällen Daten aus der Nutzenergieanalyse, 2020 Daten aus dem Szenario (2021) und Realdaten und 2050 Szenariendaten dargestellt.	57
Abb. 13:	Endenergie des Sektors Produktion bis 2050 ohne Industriegebäude.	58
Abb. 14:	Endenergie des Sektors Produktion bis 2050 inklusive Industriegebäude.	58
Abb. 15:	Endenergie des Sektors Produktion ab 2010 ohne Industriegebäude.....	59
Abb. 16:	Hinterlegte Anteile der Fahrleistungen im Leichtverkehr im Szenario 2050.....	65
Abb. 17:	Anteil der Fahrleistungen im Schwerverkehr, Szenario 2050.....	66
Abb. 18:	Zeitlicher Verlauf der Nutzenergie Mobilität, Szenario 2050.....	72
Abb. 19:	Zeitlicher Verlauf der Endenergie Mobilität, Szenario 2050.....	72
Abb. 20:	Entwicklung des Nutzenergiebedarfes 2021 bis 2050.....	75
Abb. 21:	Entwicklung des Endenergie-Einsatzes 2021 bis 2050.....	78
Abb. 22:	Eingesetzte Energiemengen ohne Stromimporte 2021 und 2050.....	79
Abb. 23:	Vereinfachtes Energie-Flussbild 2050.....	81
Abb. 24:	Mobilitätsbezogene Betrachtung der Systemabgrenzung.....	98
Abb. 25:	Grobabschätzung des Potenzials zur Energieeinsparung durch Verhaltensänderung.....	100

16. Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht der Umwandlungstechnologien und deren Wirkungsgrade	27
Tab. 2:	Wasserkraftanlagen-Ausbaupfad Tirol 2011 bis 2050 (gerundet).....	30
Tab. 3:	PV-Freiflächenanlagen in Tirol.....	33
Tab. 4:	Methanertragspotenziale in Tirol 2021 und 2050 (gerundet).....	35
Tab. 5:	Überblick über energetisch nutzbare Potenziale Tirols 2050 aus der vorliegenden Studie sowie der Vorstudie.....	39
Tab. 6:	Datenbasis Wohngebäude.....	41
Tab. 7:	Datenbasis Nicht-Wohngebäude.....	41
Tab. 8:	Beiträge der verschiedenen Verwendungszwecke des Endenergiebedarfs im Sektor Gebäude (mit Referenz- Heizbedarf) in den Jahren 2021 und 2050.	47
Tab. 9:	Verbesserung der Wirkungsgrade für Industrieprozesse.	53
Tab. 10:	Maximale Wirkungsgrade der einzelnen Bereiche nach Energieträger aufgeschlüsselt.....	54
Tab. 11:	Endenergieeinsätze im Sektor Produktion der Vorgänger-Studie (2016) sowie der gegenständlichen Studie (2021 und 2050), aufgeschlüsselt pro Energieträger.....	56
Tab. 12:	Nutz- und Endenergieeinsatz [TJ] des Sektors Mobilität 2016 bis 2021.....	60
Tab. 13:	Nutz- und Endenergieeinsatz [GWh] des Sektors Mobilität 2016 bis 2021.....	61
Tab. 14:	Vergleich von Szenarien- (EBENBICHLER et al. 2021) und Realwerten des Nutzenergieeinsatzes des Sektors Mobilität 2019.....	61
Tab. 15:	Nutzenergie Mobilität 2021.....	69
Tab. 16:	Nutzenergie Mobilität 2050.....	69
Tab. 17:	Nutzenergiebedarf in Tirol 2021 und 2050 gemäß Szenario.....	74
Tab. 18:	Endenergiebedarf in Tirol 2021 gemäß STATISTIK AUSTRIA (2022).und 2050 gemäß Szenario.....	77
Tab. 19:	Einzusetzende Energie 2021 und 2050.....	80
Tab. 20:	Möglicher Wasserkraftanlagen-Ausbau bis 2050.....	83
Tab. 21:	Möglicher Photovoltaik-Anlagen-Zubau bis 2050.....	84
Tab. 22:	Möglicher Windkraft-Anlagen-Zubau bis 2050.....	84
Tab. 23:	Möglicher Elektrolyseur-Zubau bis 2050.....	85
Tab. 24:	Möglicher Anlagen-Zubau zur Erzeugung synthetischen Methans bis 2050.....	86
Tab. 25:	Möglicher Anlagen-Zubau zur Biokohle-Erzeugung bis 2050.....	86
Tab. 26:	Möglicher Anlagen-Zubau zur Fernwärme-Erzeugung bis 2050.....	87
Tab. 27:	Möglicher Zubau von Wärmepumpenanlagen bis 2050.....	88
Tab. 28:	Möglicher Zubau einer thermischen Abfallverwertungsanlage.....	88
Tab. 29:	Überblick über einen möglichen Anlagenzubau bis zum Jahr 2050.....	89
Tab. 30:	Energieeinsparung im Bereich Schwerverkehr.....	102

17. Literaturverzeichnis

- ARGE ECO.IN (2011): Studie über die Erschließung des Potenzials biogener Haushaltsabfälle und Grünschnitt zum Zwecke der Verwertung in einer Biogasanlage zur optimierten energetischen und stofflichen Verwertung. Anwendungsbeispiel Modellregion Mödling. 204 S.
- AdTLR (2011): Wasserkraft in Tirol. Potenzialstudie. Ermittlung des noch verfügbaren Wasserkraftpotenzials in Tirol. 126 S.
- AdTLR (2011): Deklaration. Gemeinsames Verständnis zur künftigen Wasserkraftnutzung in Tirol. 1 S.
- AdTLR (2014): Kläranlagenkataster Tirol 2013. Gesamtauswertung Tirol. 16 S.
- AdTLR (2015): Solarpotenziale im Land Tirol und der Provinz Bozen. 9 S.
- AdTLR (2017): Tiroler Abfallstatistik. 13 S.
- AdTLR (2022): Demographische Daten Tirol 2021. 139 S.
- ANDERLE, N. & ARIC, K. & STEINHAUSER, P. (1978): Erste Ergebnisse der Erfassung des Grundwasserdargebotes. Tiroler Umweltschutzkonzept-Bestandsaufnahme. 65 S.
- AUSTRIATECH (2019): Elektro-Autos zuhause laden - Bedarf an und Maßnahmen für Heimladestationen in Wohnanlagen. Mobility Explored.
- BMK (2021): Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich. Der neue Klimaschutz-Rahmen für den Verkehrssektor. Nachhaltig - resilient - digital. 72 S.
- BMLFUW (2014): Kommunales Abwasser. Österreichischer Bericht 2014. 116 S.
- BMNT (2017): Bundesabfallwirtschaftsplan 2017. Teil 1. 304 S.
- BMNT (2017): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017. Teil 2. 292 S.
- BMNT (2018): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2018. 97 S.
- BLANCO, H. & WOUTER, N. & RUF, J. & FAAIJ, A. (2018): Potential of Power-to-Methane in the EU energy transition to a low carbon system using cost optimization. In: Applied Energy, Band 232. S. 323 - 340.
- BLOME, P. & DUNCKER, T. & PATAUNER, E. & RIEDEL, J. ET AL. (2022): Photovoltaik-Freiflächenpotenzial in Tirol. 79 S.
- BOS, M. & KERSTEN, S. & BRILMAN, D. (2020): Wind power to methanol: renewable methanol production using electricity, electrolysis of water and CO₂ air capture. In: Applied Energy, Band 264. S. 1 - 10.
- BUTTLER, A. & SPLIETHOFF, H. (2018): Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids. In: Renewable and Sustainable Energy Review, Band 82. S. 2440-2454.
- DIETERICH, V. & BUTTLER, A. & HANEL, A. & SPLIETHOFF, H. ET AL. (2020): Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer-Tropsch-fuels: a review. In: Energy & Environmental Science, Band 13/2020. S. 3207 - 3252.
- DOBLER, C. & PFEIFER, D. & STREICHER, W. (2017): Energieplan Innsbruck. Energie-Szenarien: 2015 - 2050. 24 S.
- ECOCENTER (2024): Müllverbrennungsanlage Bozen - Betriebsdaten 2016-2023. 8 S.
- EBENBICHLER, R. & HERTL, A. & GLEIRSCHER, R. & BLOME, P. & HOFMANN, A. & SCHAAF, N. & STREICHER, W. & TOSATTO, A. & OCHS, F. & MAILER, M. & ANTON, I. & SCHÖNIGER, F. & HASENGST, F. & RESCH, G. (2023): Energiespeicher Tirol 2050. Modellberechnung. 117 S.
- EBENBICHLER, R. & HERTL, A. & HOFMANN, A. & STREICHER, W. & MAILER, M. & TOSTATTO, A. & ANTON, I. & REITH, F. & SCHAAF, N. & RZEHA, S. & OCHS, F. (2021): Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050 und 2040 mit Zwischenziel 2030. 158 S.
- EBENBICHLER, R. & HERTL, A. & STREICHER, W. & FISCHER, D. & RICHTFELD, C. & MAILER, M. & ANTON, I. & HOFMANN, A. & POEHAMM, C. (2018): Ressourcen- und Technologieeinsatz-Szenarien Tirol 2050. Endbericht. 220 S.
- EBERHARD, T. (2020): Öffentliche Ladeinfrastruktur. Regulativer Rahmen und was ist noch nötig? Mobilitätsdialog der BieM. 22 S.
- EICKER, U. (2011): Solarthermische Anlagen für Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung.
- EUROPÄISCHE UNION (2023): Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr (Initiative "Refueleu Aviation"). 92 S.
- FLEISCHHACKER, E. (1994): Methodischer Problemlösungsansatz für ein zukunftsorientiertes Wasserwirtschaftskonzept.

- In: Wasserwirtschaft, Band 84. S. 544-548.
- FRITZ, D. & HEINFELLNER, H. & LICHTBLAU, G. & PÖLZ, W. ET AL. (2016): Ökobilanz alternativer Antriebe. Fokus Elektrofahrzeuge. 60 S.
- HEINFELLNER, H. & ANGELINI, A. & KRUTZLER, T. & VOGEL, J. ET AL. (2020): Pathways to a Zero Carbon Transport Sector. 61 S.
- HERTL, A. & GLEIRSCHER, R. (2023): Tiroler Energiemonitoring 2022. Statusbericht zur Umsetzung der Tiroler Energiestrategie. 144 S.
- HERTL, A. & OBLASSER, S. & SEEHAUSER, C. & EBENBICHLER, R. (2017): Tiroler Energiemonitoring 2016. Statusbericht zur Umsetzung der Tiroler Energiestrategie. 186 S.
- HIDALGO, D. & MARTÍN-MARROQUÍN, J. (2020): Power-to-methane, coupling C=2 capture with fuel production: An overview . In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Band 132. S. 110057 - 110063.
- IUT (2003): Restmüllentsorgung Tirol - Kurzbericht. 61 S.
- INGERLE, K. (1988): Beitrag zur Berechnung der Abkühlung des Grundwasserkörpers durch Wärmepumpen. In: Österreichische Wasserwirtschaft, Band 40(11/12).
- KALTSCHMITT, M. & STREICHER, W. & WIESE, A. (2020): Erneuerbare Energien. Systemtechnik - Wirtschaftlichkeit - Umweltaspekte. 6. Auflage. 1285 S.
- LWK TIROL (2019): Viehbestand in Tirol 2018 (im Vergleich zu 2017) - Auszug. 1 S.
- LINDORFER, J. & FAZENL, K. & TICHLER, R. & STEINMÜLLER, H. (2017): Erhöhung des Einsatzes von erneuerbarem Methan im Wärmebereich. 109 S.
- NIKOLAIDIS, P. & POUILLIKAS, A. (2017): A comparative overview of hydrogen production processes. In: Renewable and sustainable Energy Reviews, Band 67. S. 597 - 611.
- OBERHUBER, A. & DENK, D. (2014): Zahlen, Daten, Fakten zu Wohnungspolitik und Wohnungswirtschaft in Österreich.
- OBLASSER, S. & FLEISCHHACKER, E. (1993): Neues Energiekonzept für Tirol. 364-371 S.
- PANZONE, C. & PHILIPPE, R. & CHAPPAZ, A. & FONGARLAND, P. ET AL. (2020): Power-to-Liquid catalytic CO₂ valorization into fuels and chemicals: focus on the Fischer-Tropsch route. In: Journal of CO₂ Utilization, Band 38. S. 314 - 347.
- PFEIFER, D. (2017): Entwicklung, Untersuchung und Bewertung von Berechnungsmodellen zur Erstellung von kommunalen Energiebilanzen im Gebäudebereich. 307 S.
- PFEIFER, D. & KEPPLINGER, P. (2016): EneRALP Tool Softwaredokumentation - Datenintegrations- und Energiebedarfsberechnungsmodell.
- PYREG GMBH (2022): Prozessauslegung über eine PYREG-Karbonisierungsanlage PX1500-H. Angebot.
- PÖSCHL, M. & WARD, S. & OWENDE, P. (2010): Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. In: Applied Energy, Band 87/11. S. 3305 - 3321.
- RECHNUNGSHOF ÖSTERREICH (2006): Abfallwirtschaftskonzept im Land Tirol. 21 S.
- RECHNUNGSHOF ÖSTERREICH (2017): Restmüllentsorgung in Tirol; Follow-up-Überprüfung. Bericht des Rechnungshofes. 20 S.
- REITZNER, G. (2011): Wasserkraftpotentialstudie Tirol. Nutzbares Wasserkraftpotential in Tirol. 39 S.
- STATCUBE (2016): Baubewilligungen, Neuerrichtung ganzer Gebäude ab 2010 ([www](http://www.statcube.at), abgerufen am 24.07.2016).
- STATCUBE (2018): Registerzählung 2011. Gebäude- und Wohnungszählung (GWZ).
- SCHRIEFL, E. (2007): Modellierung der Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im österreichischen Wohngebäudebestand unter Annahme verschiedener Optimierungsziele.
- SOULOPOULOS, N. & BOERS, M. & FISHER, R. & O'DONOVAN, A. ET AL. (2021): Hitting the EV Inflection Point. Electric vehicle price parity and phasing out combustion vehicle sales in Europe. 58 S.
- STATISTIK AUSTRIA (2017): Bundesländer-Energiebilanzen Tirol 1988-2016. 61 S.
- STATISTIK AUSTRIA (2017): Vorausberechnete Bevölkerungsstruktur für Tirol 2016-2100 laut Hauptszenario. 1 S.
- STATISTIK AUSTRIA (2022): Energiebilanz Tirol 1988 - 2021. 84 S.
- STATISTIK AUSTRIA (2022): Energiebilanz Tirol 1988-2021. 85 S.
- STATISTIK AUSTRIA (2022): Nutzenergieanalyse Tirol. 1993 - 2021. 30 S.
- STATISTIK AUSTRIA (2022): Bevölkerungsprognose 2022-2100 für Tirol (Hauptvariante). 13 S.

- STATISTIK AUSTRIA (2023): Kfz- und Pkw-Bestand nach Bundesländern in Österreich am 31.12.2022. 9 S.
- STATISTIK AUSTRIA (2023): Energiebilanz Tirol 1988-2022. 83 S.
- STATISTIK AUSTRIA (2023): Fahrleistungen und Treibstoffeinsatz privater Personenkraftwagen 1999 - 2022 nach Bundesländern. 10 S.
- STREICHER, W. & SCHNITZER, H. & TITZ, M. & TATZBER, F. ET AL. (2010): Energieautarkie für Österreich 2050. Feasibility Study. Endbericht. 141 S.
- TB HAUER (2010): Tiroler Abfallwirtschaft. Grundlagen zur "Phase 3 - Thermische Abfallbehandlungsanlage in Tirol". Studie im Auftrag Amt der Tiroler Landesregierung. 128 S.
- THALHEIM, F. (2019): Wie heizt Tirol? Pilotgebiet Planungsverband 29 - Wörgl und Umgebung. Energiesystemanalyse Planungsverband 29. 54 S.
- TIROLER FLUGHAFENBETRIEBS-GMBH (2017): Nachhaltigkeitsbericht 2017 mit aktualisierter integrierter Umwelterklärung gemäß EMAS-III-Verordnung (Daten 2016). 47 S.
- TIROLER FLUGHAFENBETRIEBS-GMBH (2019): Nachhaltigkeitsbericht 2019 mit aktualisierter integrierter Umwelterklärung gemäß EMAS-III-Verordnung (Daten 2018). 92 S.
- TIROLER FLUGHAFENBETRIEBSGESELLSCHAFT (2019): Nachhaltigkeitsbericht 2018 mit integrierter Umwelterklärung gemäß EMAS-III-Verordnung (Daten 2017). 92 S.
- TIROLER FLUGHAFENBETRIEBSGESELLSCHAFT (2021): Nachhaltigkeitsbericht 2020. 52 S.
- TIROLER FLUGHAFENBETRIEBSGESELLSCHAFT (2022): Nachhaltigkeitsbericht 2021. 100 S.
- TIROLER FLUGHAFENBETRIEBSGESELLSCHAFT (2023): Nachhaltigkeitsbericht 2022. 186 S.
- TOMSCHY, R. & HERRY, M. & SAMMER, G. & KLEMENSCHITZ, R. ET AL. (2016): Österreich unterwegs 2013/14. Ergebnisbericht zur österreichweiten Mobilitätsstudie "Österreich unterwegs 2013/14".
- UBA (2010): Biomassefeuerungsanlagen im Leistungsbereich von 400 kW bis 10 MW. 76 S.
- UMWELTBUNDESAMT (2017): Energie- und Treibhausgas-Szenarien im Hinblick auf 2030 und 2050. Synthesebericht 2017. 95 S.
- UMWELTBUNDESAMT (2024): Energieproduktivität. Der Begriff der Energieproduktivität und Endenergieproduktivität seit 1990. 2 S.
- VCÖ (2020): Grünen Wasserstoff sinnvoll im Verkehr einsetzen. 8 S.
- WKO (2017): WKO Statistik Österreich. Wirtschaftstlage und Prognose der Sachgütererzeugung.
- WASSER TIROL & SPIEGLTEC (2009): Abwärmekataster Tirol. Potentialanalyse über die Wärmeversorgung von Haushalten aus industrieller Abwärme für den Tiroler Zentralraum. 90 S.
- WESSELAK, V. & SCHABBACH, T. & LINK, T. & FISCHER, J. (2017): Handbuch Regenerative Energietechnik. 943+XV S.
- WIETSCHEL, M. & GNANN, T. & KÜHN, A. & PLÖTZ, P. ET AL. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. 311 S.
- AUSTRIATECH (2023): Elektromobilität in Österreich. Zahlen, Daten & Fakten, November 2023. 7 S.
- DENA (2017): Baustein einer Integrierten Energiewende. Roadmap Power to Gas. 32 S.
- E3 CONSULT (2023): Windenergiepotenzial in Tirol. 45 S.
- ÖWAV (2009): ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds - Heizen und Kühlen. 66 S.

18. Anhang

18.1. Mobilität

18.1.1. Systemgrenze

In der Nutzenergieanalyse wird die Energiemenge ausgewiesen, die für den Transport (z.B. im Sonstigen Landverkehr) in Tirol bezogen (getankt) wird. Diese beinhaltet damit auch die Energie, die zwar in Tirol bezogen (getankt), aber nicht im Land verfahren wird („Tanktourismus“). In der bisherigen Energiebilanzierung (STATISTIK AUSTRIA 2017) wird nur jene Energie berücksichtigt, die in Tirol bezogen (getankt) wird. In der gegenständlichen Studie wurde dieser Top-Down-Ansatz übernommen, um die Vergleichbarkeit mit den bisherigen Bilanzierungen sicherzustellen.

Aus Sicht der Verkehrsplanung wäre die **Systemgrenze nicht** in dieser Form **territorial, sondern anhand der Mobilitätsbeziehungen zu definieren**. Jeder Weg hat einen Wegezweck, der mit einem Bedürfnis verbunden ist, das in der Regel mit einer Aktivität am Zielort befriedigt wird. Diese Aktivitäten sind in vielen Fällen auch für die Wirtschaft am Zielort relevant (z.B. Einkauf, Tourismus, ...). Dementsprechend müsste der Aufwand (Energieeinsatz) des Weges immer dem Zielort zugerechnet werden.

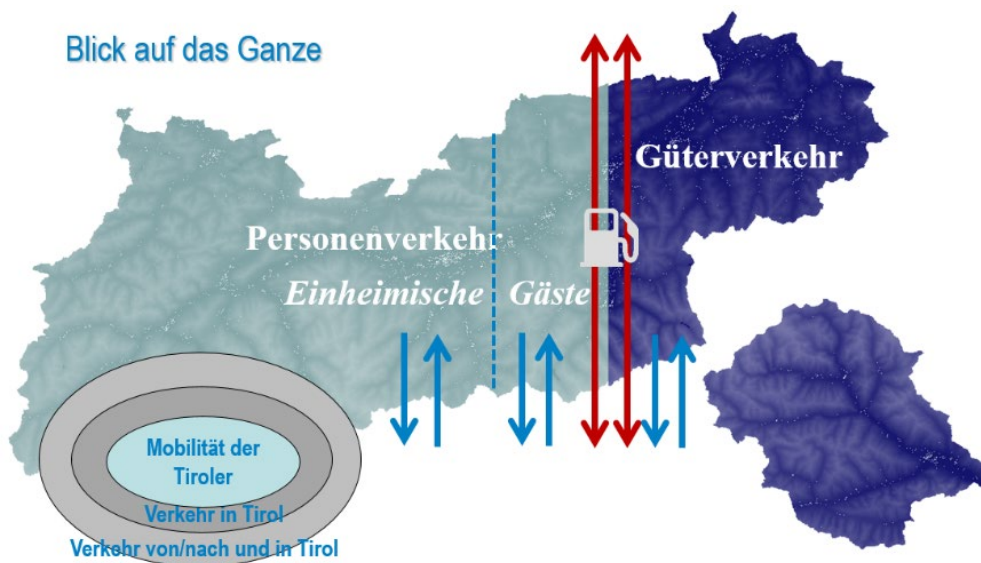


Abb. 24: Mobilitätsbezogene Betrachtung der Systemabgrenzung.

Abb. 24 veranschaulicht diese Betrachtung. Im Personenverkehr ist die Mobilität der Tiroler Bevölkerung als Binnen-, Ziel- und Quellverkehr ebenso zu berücksichtigen wie der Ziel- und Quellverkehr der Gäste und deren Mobilität in Tirol. Der Durchgangsverkehr (Transit) ist nur einzubeziehen, wenn im Land getankt wird. Ähnlich verhält es sich im Güterverkehr, wo neben dem Binnenverkehr auch die grenzüberschreitende Zulieferung und der Abtransport (Warenimport und -export) zu berücksichtigen sind. Eine Abgrenzung kann daher mit Fokus auf die Mobilität

der Tiroler Bevölkerung, die in Mobilitätshebungen wie „Österreich Unterwegs 2013/14“ (TOMSCHY et al. 2016) erfasst wird, erfolgen oder mit Fokus auf den Verkehr innerhalb der Tiroler Landesgrenzen (inkl. Verkehr der Gäste, mit Anteilen des Ziel- und Quellverkehrs und des Durchgangsverkehrs), wie dies z.B. in der Studie „Energieautarkie für Österreich“ (STREICHER et al. 2010) gemacht wurde oder mit Ergänzung des Verkehrs, der außerhalb der Landesgrenzen als Ziel- und Quellverkehr mit dem Gesellschafts- und Wirtschaftssystem des Landes in Verbindung steht. Diese weitgefaste Systemabgrenzung wurde in einem alternativ entwickelten Bottom-Up-Ansatz berücksichtigt, der in der ersten Studie zu dem Technologie- und Ressourceneinsatz (EBENBICHLER et al. 2018) im Anhang dargestellt ist. Dieser Ansatz ermöglicht es, Maßnahmen direkt mit dem Verhalten in Verbindung zu bringen und so Handlungs-Maßnahmenoptionen deutlich zu machen.

Die beiden Abgrenzungen unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Behandlung des grenzüberschreitenden Verkehrs. Ziel- und Quellverkehr von bzw. nach Tirol (z.B. An- und Abreise im Tourismus, Güterimporte und -exporte) bzw. Durchgangsverkehre durch Tirol (z.B. Güter- und Tourismustransit) überqueren die territoriale Systemgrenze. Grundsätzlich stehen Ziel- und Quellverkehr in direkter Verbindung mit dem „Wirtschafts- und Gesellschaftssystem“ Tirol. Durchgangsverkehr beeinflusst dieses jedenfalls über deren Folgewirkungen (z.B. Emissionen, Raumbedarf, ...) und dann, wenn es im Zuge der Durchfahrt zu einer Interaktion (z.B. Einkauf, Bezahlung von Maut, ...) kommt. Im Sinne der bisherigen Energiebilanzierung (Statistik Austria, Energiemonitoring des Landes Tirol) wird nur jene Energie berücksichtigt, die in Tirol bezogen wird. Somit werden der Ziel- und Quellverkehr sowie Durchgangsverkehr durch den Treibstoff berücksichtigt, der von ihnen in Tirol bezogen wird (z.B. Tanktourismus). In einem mobilitätsorientierten Ansatz würden der Energiebedarf von Ziel- und Quellverkehr in einer Relation (der Zielrichtung) und jener des Durchgangsverkehrs nicht berücksichtigt. Wird beim Durchgangsverkehr jedoch gehalten, um eine (wirtschaftliche) Aktivität durchzuführen (z.B. Tanken), entsteht eine Verbindung zum Wirtschaftssystem. Dementsprechend wäre z.B. die im „Tanktourismus“ bezogene Energiemenge zu berücksichtigen.

In dieser Hinsicht ist in der jährlichen Nutzenergieanalyse der Statistik Austria im Bereich der Treibstoffe und vor allem beim Diesel eine wesentliche Unschärfe zu vermuten. Nach einer Änderung der Umlegung des Tanktourismus in der Nutzenergieanalyse auf die Bundesländer sind diese Werte für Tirol deutlich zurückgegangen. Es ist davon auszugehen, dass der Bedarf im Tanktourismus in Tirol mit der aktuellen Methode deutlich unterschätzt wird. Im Bericht „Ressourcen- und Technologieeinsatz-Szenarien Tirol 2050“ (EBENBICHLER et al. 2018) wurde anhand eines Bottom-Up-Ansatzes eine grobe Abschätzung zur Plausibilisierung vorgenommen. Damit wurde für den Tanktourismus mit Bezugsjahr 2016 eine Energiemenge von etwa 19.000 TJ abgeschätzt, die in der aktuellen Statistik nur zu etwa einem Drittel berücksichtigt sein dürfte. Diese Abschätzung scheint auch in Hinblick auf eine in der Zwischenzeit vom Land Tirol durchgeführte Tankstellenbefragung plausibel zu sein. Für die An- und Abreise im Tourismus mit Pkw, welche ca. 80 % der Gäste betrifft, wurde zudem im Bottom-Up-Ansatz eine Energiemenge von 9.000 TJ abgeschätzt, wobei im Sinne der Zuordnung auf den Zielzweck nur eine Fahrtrichtung (Anreise) berücksichtigt wurde. Diese Energiemenge ist in der Energiestatistik, die für das Jahr 2016 insgesamt 30.000 TJ im Mobilitätsbereich ausweist, bisher kaum erfasst, da sie überwiegend im Ausland bezogen (getankt) wird.

Für das Szenario im Jahr 2050 wurde davon ausgegangen, dass bei den dann eingesetzten Technologien der Tanktourismus nur noch eine untergeordnete Rolle spielt (z.B. im on-trip Charging von batterieelektrischen

Fahrzeugen auf der Durchreise bzw. Tanken von Wasserstoff von Transit-Lkw), da die aktuellen Preisvorteile beim Tanken in Österreich nicht mehr gegeben sein dürften.

18.1.2. Potenzielle Verhaltensänderungen und alternativer Technologieansatz

Der in ersten Studie zum Technologie- und Ressourceneinsatz (EBENBICHLER et al. 2018) im Anhang dargestellte Bottom-Up-Ansatz lässt auch Rückschlüsse zu, wie sich einzelne Maßnahmen auswirken können. Um dies zu demonstrieren, wurde dort beispielhaft das **Einsparungspotenzial von Verhaltensänderungen in der Mobilität der Bevölkerung** ermittelt und in einem Stakeholder-Workshop, der im Rahmen der ersten Studie durchgeführt wurde, präsentiert und diskutiert. Im aktuellen Projekt wurde dies auch in einem Stakeholder-Workshop wiederholt, wobei die Ergebnisse der letzten Mobilitätsbefragung in Tirol 2022 als Vergleichswerte (Achtung Frühjahreswerte) ergänzt wurden (Abb. 25).



Mobilität Grobrechnung 2016 → 2050 Potenzielle Verhaltensänderung MIV/Bevölkerung



1. Alle MIV-Wege kürzer als 1 km zu Fuß (7% der MIV-Wege, 4% aller Wege)

→ 2050: ca. 20 TJ

2. 50% der MIV-Wege zwischen 1 und 5 km auf Fahrrad (37% der MIV-Wege, 22% aller Wege)

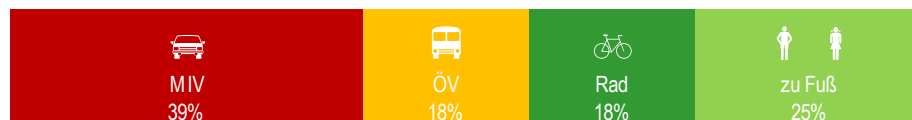
→ 2050: ca. 250 TJ

3. 20% der MIV-Wege über 5 km auf ÖV (56% der MIV-Wege, 34% aller Wege)

→ 2050: ca. 800 TJ

Energieeinsparungspotential:

Summe 2050: ca. 1.100 TJ



→ +30% Wege zu Fuß → Verdreifung Wege mit Rad → 80% mehr ÖV-Fahrten als 2016
(davon jeweils 11% aus Bevölkerungszuwachs)



Zielwert 2020

Frühjahr 2022

Abb. 25: Grobabschätzung des Potenzials zur Energieeinsparung durch Verhaltensänderung.

In dieser **Grobabschätzung** wurde zunächst davon ausgegangen, dass alle Wege mit einer Länge unter 1 km mit nicht-motorisierten Verkehrsmitteln (in diesem Fall zu Fuß) zurückgelegt werden. Laut der letzten Mobilitätsbefragung waren 7 % der mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) zurückgelegten Wege weniger als 1 km lang, das waren 4 % aller Wege. Bezogen auf 2016 würde diese Verhaltensänderung etwa 80 TJ pro Jahr einsparen,

bezogen auf 2050 auf Grund der geringeren spezifischen Verbräuche der Elektromotoren nur noch etwa 20 TJ. Bei den MIV-Wege mit einer Wegelänge zwischen 1 km und 5 km wurde eine Verlagerung von 50 % auf nicht-motorisierte Verkehrsmittel (in diesem Fall auf das Fahrrad) angesetzt. Die Mobilitätserhebung weist 37 % der MIV-Wege in dieser Distanzklasse aus, das sind 22 % aller Wege. Das Einsparungspotenzial beträgt im Jahr 2016 ca. 1.000 TJ, im Jahr 2050 ca. 250 TJ. Zuletzt wurde davon ausgegangen, dass 20 % der MIV-Wege mit einer Distanz über 5 km auf den Öffentlichen Verkehr (ÖV) verlagert werden können. Daraus würde 2016 eine Reduktion um ca. 3.200 TJ und 2050 um ca. 800 TJ resultieren. Das **Gesamtpotenzial aus der Verhaltensänderung** in der Mobilität der Bevölkerung für 2050 liegt unter diesen Annahmen **bei ca. 1.100 TJ**.

Diese Annahmen beschreiben eine **sehr starke Veränderung des Mobilitätsverhaltens**, die eine Reduktion des Anteils der im MIV zurückgelegten Wege von 61 % im Jahr 2016 auf 39 % im Jahr 2050 bedeuten würde. Damit würden bei einer Zunahme der Bevölkerung um 11 % die Anzahl der zu Fuß zurückgelegten Wege um 30 % zunehmen, die Anzahl der mit Fahrrad absolvierten Wege würde sich verdreifachen und die Zahl der Fahrten im ÖV um 80 % steigen. Um die Voraussetzungen für eine derartige Verhaltensänderung zu schaffen, müssten die Angebote, Infrastrukturen und Rahmenbedingungen für das Zufußgehen, Radfahren und den Öffentlichen Verkehr dementsprechend massiv verbessert werden. Es ist zudem davon auszugehen, dass zusätzlich zu begleitenden bewussteinbildende Maßnahmen notwendig sind, die neben der Motivation zur Nutzung des Umweltverbands auch die Akzeptanz von gleichzeitig notwendigen restriktiven Maßnahmen im motorisierten Individualverkehr erhöhen.

Um das Potenzial der Verhaltensänderung ins Verhältnis zu setzen lässt sich bei einer Betrachtung **alternativer Technologieeinsatzes** folgendes festhalten:

- > Das grob abgeschätzte Potenzial einer massiven Änderung des Mobilitätsverhaltens der einheimischen Bevölkerung beträgt 1.100 TJ im Jahr. Da der reduzierte Pkw-Verkehr im Szenario für 2050 als rein elektrisch angesetzt ist, entspricht dies der Energie, die mit 2,135 Mio. m² Photovoltaik-Modulen (entspricht etwa 128 Freiflächenanlagen à la Assling) oder mit 34 Windkraftanlagen (à 4 MW und 2.250 Volllaststunden) im Jahr gewonnen werden kann¹⁹.
- > Durch die Umstellung der Fahrleistung im Schwerverkehr von 30 % direkt elektrisch und 70 % Wasserstoff auf 70 % direkt elektrisch (z.B. durch Elektrifizierung der Autobahnen) und 30 % Wasserstoff ergibt sich durch den höheren Wirkungsgrad von Elektromotoren im Vergleich zu Brennstoffzellen eine Endenergieeinsparung von 383 TJ. Dies bedeutet, dass aufgrund der Reduktion der energieintensiven Wasserstoffproduktion eine Energieeinsparung im Strombereich von etwa 1.917 TJ stattfindet. (d.h. rund 222 Freiflächenanlagen à la Assling).

¹⁹ Aufgrund von Effizienzsteigerungen sind diese Werte geringer als im Vorgängerbericht (EBENBICHLER et al. 2021).

Tab. 30: Energieeinsparung im Bereich Schwerverkehr

Schwerverkehr	Nutzenergie [TJ]	Endenergie [TJ]	Wasserstoff Endenergie [TJ]	Strom Endenergie [TJ]
30% Strom, 70% Wasserstoff	2.660	8.977	2.684	6.255
70% Strom, 30% Wasserstoff	2.660	8.593	1.150	7.405
Differenz	0	-383	-1.534	+1.150
Energieeinsparung im Stromsektor [TJ]	-1.534*1/0,5+1.150 = -1.917 TJ			

> Umgekehrt würde der Einsatz von Wasserstoff im Pkw-Bereich schon bei 10 % Anteil an der Pkw-Fahrleistung den Endenergieeinsatz um 165 TJ erhöhen und damit einen zusätzlichen Strombedarf von 825 TJ bedeuten.

Diese Beispiele verdeutlichen, wie wesentlich die sinnvolle Kombination von Verhaltensänderung und möglichst effizienten Antriebstechnologien ist, da damit der Energiebedarf maßgeblich gesenkt werden kann und so der für die Energieautonomie notwendige Ausbau von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie reduziert werden kann.

Mit den Ergebnissen des **Bottom-Up-Ansatzes** wurden im Rahmen des Stakeholder-Workshops die Kernaussagen aus dem Sektor Mobilität in der ersten Studie zum Technologie- und Ressourceneinsatz folgendermaßen ergänzt bzw. formuliert:

- > In der aktuellen Energiebilanz ist die Anreise von Gästen nicht und der Tanktourismus nur teilweise berücksichtigt.
- > Der Vergleich der Technologieszenarien zeigt:
 - Den niedrigsten Energiebedarf bietet der direkte Stromverbrauch (Strom-Szenario).
 - H₂-Nutzung z.B. bei Nutzfahrzeugen verbessert das Speicherpotenzial, doch der Endenergiebedarf steigt und der Strombedarf steigt stark (Sekundärebene).
 - Der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen im Flugverkehr belastet den Strombedarf verhältnismäßig stark (Ausgleich für Herstellung).
- > Ohne Verhaltensänderung ist das ursprüngliche Einsparungsziel im Mobilitätsbereich (-71 %) nicht zu erreichen. Selbst in einem reinen Strom-Szenario wären minus 12 % Nutzenergie/Einwohner (inkl. Güterverkehr) nötig.
- > Die Datenlage für Bottom-Up-Ansatz ist schwierig. Annahmen sind notwendig.
- > Folgende grobe Abschätzungen/Aussagen können dennoch getroffen werden:
 - Würde die Anreise im Tourismus berücksichtigt, stiege der Endenergiebedarf im Mobilitätsbereich um etwa ein Drittel bzw. gäbe es einen hohen Einsparungsbedarf (Potenziale wären noch zu ermitteln).
 - Sollte die politische Zielsetzung der Beschränkung und Verlagerung des Lkw-Transits nicht erreicht werden, ist mit höherem Energiebedarf zu rechnen bzw. sind stärkere Einsparungen nötig.
 - Ein Anstieg des Energiebedarfs durch Autonomes Fahren wäre für die Zielerreichung problematisch.
 - Würden von Transit-Lkw Wasserstoff nicht nur bei Bedarf getankt (on-Trip), sondern so wie derzeit beim Diesel preisgetrieben (Tanktourismus), ergäbe sich in der Bilanz ein deutlich höherer Energiebedarf, der für die Zielerreichung kompensiert werden müsste.