



Klimaneutrales Graubünden – eine greifbare Utopie!

Eine Gesamtsicht auf Machbarkeit und Hausaufgaben im Kanton Graubünden

Um das Klima einigermaßen stabil zu halten, muss die Weltgemeinschaft einen Weg finden, die klimaschädigenden Emissionen zu entfernen. Unser Bericht zeigt auf, dass dies in Graubünden bis 2050 gelingen kann und volkswirtschaftlich auch erstrebenswert ist. Voraussetzung dafür ist aber, dass Graubünden das Tempo des Energieumbaus deutlich erhöht.

21. September 2023

Impressum

<i>Herausgeber</i>	Wirtschaftsforum Graubünden
<i>Autoren</i>	Peder Plaz und Christian Schlatter Berichte des Wirtschaftsforums Graubünden werden durch den Stiftungsrat als Kollektiv zur Publikation freigegeben. Persönliche Einschätzungen einzelner Stiftungsräte zum Thema können deshalb differieren.
<i>Veröffentlichung</i>	21. September 2023
<i>Über das Wirtschaftsforum Graubünden</i>	Das Wirtschaftsforum Graubünden versteht sich als Denkwerkstatt der Wirtschaft und setzt sich für die Verbesserung der Rahmenbedingungen des Wirtschaftsstandortes Graubünden ein. Das Wirtschaftsforum Graubünden stellt sein Wissen über wirtschaftliche Entwicklungen und Zusammenhänge in Graubünden der Öffentlichkeit in Form von Berichten, Referaten und Diskussionen zur Verfügung. Auf Einladung sind Vertreter des Wirtschaftsforums Graubünden jederzeit gerne bereit, an Podiumsdiskussionen teilzunehmen oder als Referenten zu wirken.
<i>Offenlegung von Quellen</i>	Die in diesem Dokument verwendeten Inhalte, Angaben und Quellen wurden mit grösster Sorgfalt zusammengestellt. Die Ausführungen beruhen teilweise auf Annahmen, die aufgrund des zum Zeitpunkt der Auftragsbearbeitung zugänglichen Materials für plausibel erachtet wurden. Die verwendeten Quellen und wortwörtlichen Zitate werden offengelegt. Bei der Verwendung von theoretischen oder wissenschaftlichen Konzepten, welche den gegenwärtigen Erkenntnissen der Wissenschaft entsprechen, wird zur Wahrung der Lesbarkeit und Verständlichkeit auf eine explizite Quellenangabe verzichtet. Gleichwohl kann das Wirtschaftsforum Graubünden keine Haftung für die Richtigkeit der gemachten Annahmen übernehmen.
<i>Kontakt</i>	Wirtschaftsforum Graubünden Poststrasse 3 7000 Chur Tel. +41 81 253 34 34 www.wirtschaftsforum-gr.ch info@wirtschaftsforum-gr.ch

Vorwort

Die Diskussion um die Verhinderung des Klimawandels durch die Dekarbonisierung der Welt ist omnipräsent. Tagtäglich erscheinen Studien zur einen oder anderen Frage. Die für die Dekarbonisierung notwendige Technologie entwickelt sich rasch. In Graubünden wurde politisch die Idee des Aktionsplans Green Deal lanciert, welche wiederum grosse Erwartungen schürt. Nicht zuletzt hat der Angriffskrieg von Russland auf die Ukraine mit den damit zusammenhängenden Verwerfungen bei der Energiebeschaffung auch die Abhängigkeit von Europa von den fossilen Energieträgern nochmals unmissverständlich vor Augen geführt. In Westeuropa mussten im Jahr 2022 noch nie dagewesene hohe Energiepreise bezahlt werden, die sowohl jedes Unternehmen wie auch jeden Haushalt direkt betreffen. Dennoch gelang es Westeuropa innert kürzester Zeit die Energiebezugsquellen umzustellen. Es ist deshalb für uns alle sehr leicht, die Übersicht und den Durchblick zu verlieren.

Angespornt durch die Initiative des Aktionsplans Green Deal wollen wir einen gesamtheitlichen, aktuellen Blick auf die Dekarbonisierung Graubündens werfen und die folgenden Fragen klären:

- Welche Ziele der CO₂-Reduktion sind für Graubünden realistisch?
- Welches sind die wichtigsten Massnahmen zur Reduktion des CO₂ für Graubünden?
- Mit welchen Umstellungskosten ist zu rechnen und sind diese volkswirtschaftlich verkraftbar?

Um diese Fragen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu erörtern, haben wir im vorliegenden Bericht eine Vielzahl von Studien und Daten zusammengetragen. Wir haben zudem einige Grobschätzungen selbst vorgenommen, um die Grössenordnungen von CO₂-Emissionen, Kosten und benötigter Energie zu verstehen. Wir sind uns bewusst, dass alle Zahlen letztlich falsch sind, weil mit vielen unbekanntem Variablen gerechnet werden muss. Dennoch helfen uns die Schätzungen, auch wenn sie grob ausfallen, ein Gefühl für die Dimensionen zu entwickeln. Dies erachten wir als essenzielle Voraussetzung, um energiepolitische Diskussionen breit abgestützt und konstruktiv führen zu können. Deshalb bitten wir den kritischen Leser sich nicht an den Zahlendetails aufzureiben, sondern an ihren Dimensionen zu orientieren und diese für die Suche nach Lösungen zu nutzen.

Wir wünschen Ihnen eine hoffentlich spannende Lektüre!

Ihr Wirtschaftsforum Graubünden

Die Proportionen verstehen!

So viel **zusätzlichen erneuerbaren Strom bzw. Energie** braucht es um **1 Tonne CO₂** aus der Atmosphäre zu entfernen:

791 kWh	für die Umstellung von Liegenschaften mit Ölheizungen auf Wärmepumpen bei gleichzeitiger umfassender Dämmung
847 kWh	für die Umstellung von Personenfahrzeugen auf Elektromotoren
1'100 kWh	für die Abscheidung von CO ₂ (CCS) (davon 10/11 in Form von Wärme)
1'564 kWh	für die Umstellung von Liegenschaften mit Ölheizungen auf Wärmepumpen ohne Dämmung
4'015 kWh	für die Umstellung von LKW auf Wasserstoff / Brennstoffzelle
10'180 kWh	für die Umstellung von LKW, Pistenfahrzeugen oder Flugzeugen auf synthetischen Flüssigtreibstoffen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung & Grundlagen	7
1.1	Aufgabenstellung.....	7
1.2	Treibhauseffekt & CO ₂ -Äquivalente	7
1.3	Klimaziele und internationale Vereinbarungen.....	8
1.4	Klimaauswirkungen in Graubünden	9
1.5	Territorialprinzip vs. Verursacherprinzip	10
2	Reduktionsziele in Graubünden	13
2.1	Aktueller CO ₂ -Ausstoss in Graubünden	13
2.2	Diskussion der Reduktionsziele	15
3	Lösungen für die Eliminierung des Bündner CO₂-Ausstosses	17
3.1	Überprüfung der bisherigen Erfolge in der Schweiz.....	17
3.2	Handlungsmöglichkeiten in der Übersicht	19
3.3	Elektrifizierung des Verkehrs.....	20
3.4	CO ₂ -Reduktion in der Landwirtschaft	24
3.5	Reduktion in den Gebäuden.....	25
3.6	CO ₂ -Emissionen der Industrie.....	27
3.7	Abscheidung des Restausstosses.....	29
3.8	Zusätzlicher Elektrizitätsbedarf für Dekarbonisierung	32
4	Deckung des Strommehrbedarfs	36
4.1	Winter- vs. Sommerstrom	36
4.2	Potenzial des Stromimports	36
4.3	Potenzial Kernkraft	38
4.4	Potenzial der Wasserkraft	40
4.5	Potenzial der Windkraft.....	42
4.6	Potenzial der Solarkraft	45
4.7	Zusammenfassende Erkenntnisse	47
4.8	Rolle der alpinen Solar- und Windparks	49
5	Plan für die Dekarbonisierung Graubündens	54
6	Zur Wirtschaftlichkeit	56
6.1	Schätzung der volkswirtschaftlichen Kosten anhand der Investitionen (Methode 1).....	56
6.2	Schätzung der volkswirtschaftlichen Kosten anhand der jährlichen Energiekosten (Methode 2).....	58
6.3	Diskussion der Kosten und des Kostenvergleichs.....	60

6.4	Entwicklung der Marktpreise für Strom	62
6.5	Volkswirtschaftliche Logik vs. Logik der Einzelnen.....	63
7	Wie schnell ist der Plan umsetzbar?	65
7.1	Zeitlicher Ablauf.....	65
7.2	Umrüstung des Verkehrs	66
7.3	Umrüstung der Wärmeerzeuger in Gebäuden.....	67
7.4	Ausbau der Solar- und Windkraft-Anlagen.....	68
8	Abgleich mit dem Aktionsplan Green Deal	71
8.1	Was ist der Aktionsplan Green Deal	71
8.2	Einordnung des Aktionsplans Green Deal	73
9	Zusammenfassung der Kernerkenntnisse & Diskussionsvorschläge	76
9.1	Kernerkenntnisse.....	76
9.2	Diskussionsvorschläge	79
9.2.1	Vorschlag 1: Umstieg ergibt volkswirtschaftlich Sinn und soll rasch vorangetrieben werden.....	79
9.2.2	Vorschlag 2: Stromproduktion zuerst.....	79
9.2.3	Vorschlag 3: Chance für Ausbau Energieproduktion nutzen.....	79
9.2.4	Vorschlag 4: Runder Tisch für Grossanlagen der Wasser-, Solar- und Windkraft.....	80
9.2.5	Vorschlag 5: Kantonale Klimabürgschaften.....	81
9.2.6	Vorschlag 7: Bedingt rückzahlbare Darlehen für strategische Wasserkraftprojekte	81

1 Einleitung & Grundlagen

1.1 Aufgabenstellung

Ist die Eliminierung des CO₂ in GR bis 2050 machbar?

Die Schweiz und auch der Kanton Graubünden versuchen, bezüglich der Eindämmung der Klimaerwärmung, mit den führenden Industrienationen der Erde eine vorausschauende Politik zu betreiben. Die Klimapolitik der Industriestaaten zielt auf 'Netto-Null' bis im Jahr 2050, einzelne früher, wie zum Beispiel Finnland bis 2035. Das heisst, die Atmosphäre soll ab 2050 nicht mehr zusätzlichen Treibhausgasen belastet werden.

Dies gelingt nur, wenn jeder Staat seinen Beitrag leistet und seinen eigenen Nettoausstoss von Treibhausgasen eliminiert. Selbstverständlich müssen die wohlhabenden Länder der Erde, welche pro Kopf am meisten Treibhausgase verursachen, eine Vorbild- und Vorreiterrolle einnehmen. Damit können die notwendigen Technologien entwickelt werden, die dann auch in Schwellen- und Entwicklungsländern übernommen werden können.

In Graubünden ist spätestens mit dem Vorstoss im Grossen Rat zum «Aktionsplan Green Deal»¹ das Thema in aller Munde. Auch das Wirtschaftsforum Graubünden will genauer hinschauen und folgende Fragen klären:

- Welche Ziele der CO₂-Reduktion sind für Graubünden realistisch?
- Welches sind die wichtigsten Massnahmen zur Reduktion des CO₂ für Graubünden?
- Mit welchen Umstellungskosten ist zu rechnen und sind diese volkswirtschaftlich verkraftbar?

Zum Thema Klima- und Energiepolitik bestehen unzählige Studien in der Schweiz. Es wäre deshalb anzunehmen, dass alles klar ist und keine zusätzliche Studie des Wirtschaftsforums Graubünden notwendig ist. Bei der Beschäftigung mit unseren Fragen haben wir aber festgestellt, dass das Zusammentragen des aktuellen Wissens sehr aufwendig ist und es für den Laien sehr schwierig ist, ein Gesamtbild zu gewinnen.

Wir haben deshalb entschieden, unsere Erkenntnisse in einer einfachen Übersicht zusammenzufassen und für die Allgemeinheit zu publizieren. Wir stellen bewusst einige Themen vereinfachend dar, damit die grossen Linien und Handlungsmöglichkeiten der Bündner Politik erkennbar werden.

1.2 Treibhauseffekt & CO₂-Äquivalente

Verschiedene Treibhausgase erwärmen die Erde

Auf dem Planet Erde ermöglicht der Treibhauseffekt Leben. Die Sonne gibt Wärme auf die Erde ab, die teilweise von der Erdoberfläche absorbiert und teilweise Richtung Weltall zurückgeworfen wird. Verschiedene Gase halten die zurückgeworfene Wärme analog einem Treibhaus für die Pflanzenzüchtung zurück. Die verschiedenen Gase sorgen dabei unterschiedlich stark für eine Rückhaltung der Wärme. Aus natürlichen Quellen stammt beispielsweise Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄). Dabei gilt: Je höher der Anteil dieser Treibhausgase in der Atmosphäre, desto stärker die Erwärmung.

Der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre lag in der vorindustriellen Zeit unter 300 ppm und beträgt seit kurz nach der letzten Jahrtausendwende über 400 ppm². Der Anstieg ist nach aktuellem Stand der Wissenschaft im Wesentlichen auf die Verbrennung **fossiler Brenn- und Treibstoffe**

¹ Ursprung des Green Deal im Kanton Graubünden ist der Auftrag Wilhelm: <https://www.gr.ch/DE/institutionen/parlament/PV/Seiten/20190213Wilhelm19.aspx>

² ppm sind parts per million. Das heisst, dass die Häufigkeit der CO₂-Verbindungen in der Atmosphäre um einen Drittel zugenommen hat und dadurch, wie vorher beschrieben, auch mehr Wärme auf der Erde zurückgehalten wird.

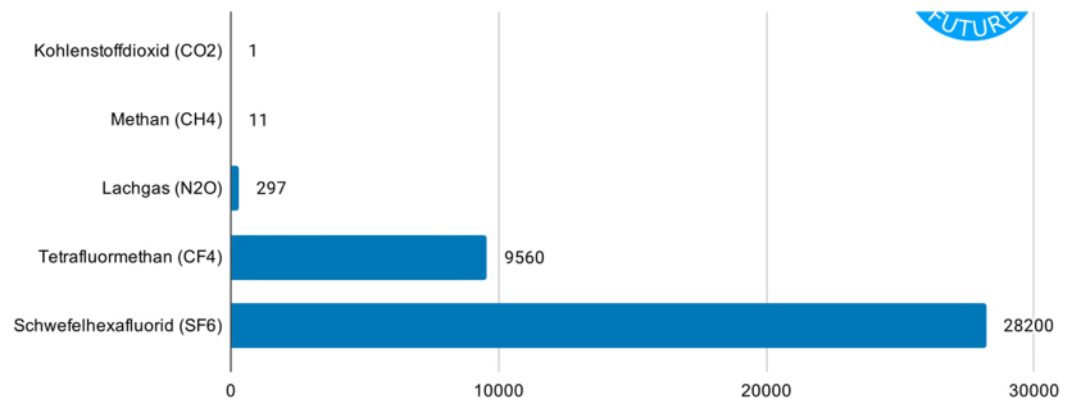
wie Öl, Erdgas und Kohle zurückzuführen. Diese stossen bei der Verbrennung die Kohlen-Sauerstoffverbindung CO₂ aus. Es wird also CO₂ freigesetzt, das seit Millionen Jahren im Erduntergrund gebunden war.

Bei der Verbrennung **nicht fossiler Brennstoffe** (bspw. Holz) wird zwar auch CO₂ freigesetzt. Weil aber dieses CO₂ zuvor durch das Wachstum der Bäume der Atmosphäre entzogen wurde, trägt es nicht zur langfristigen Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bei, wenn angenommen wird, dass auf der Erde stets konstant gleich viel Holz vorhanden ist. Die Natur ist entsprechend seit langer Zeit in der Lage, Sonnenenergie mit Photosynthese zu absorbieren und auch zu speichern.

CO₂ wird jedoch nicht nur durch Verbrennungsprozesse von Treibstoffen und Heizmaterial freigesetzt. CO₂ entsteht auch aus sogenannten **geogenen Quellen**. Eine der bekannten, problematisch Quellen ist die Herstellung von Zement. Bei der Herstellung von Klinker werden ebenfalls, das im verwendeten Rohstoff (Kalkstein oder Mergel) gebundene CO₂ freigesetzt. Neben den fossilen und geogenen Quellen, existieren weitere, teils künstlich hergestellte Gase (beispielsweise Schwefelhexafluorid (SF₆)), mit einer sehr starken Auswirkung auf den Treibhauseffekt³. Solche Gase werden in der Regel in CO₂-Äquivalente umgerechnet und dargestellt (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 1

CO₂-Äquivalente der verschiedenen Treibhausgase



Quelle: IPCC AR5 (2014)

Um den Text in diesem Bericht so leserlich wie möglich zu halten, benutzen wir die Begriffe CO₂ und CO₂-Äquivalente als Synonyme, sofern nicht ausdrücklich anders dargestellt.

1.3 Klimaziele und internationale Vereinbarungen

Zur Stabilisierung des Klimas soll die globale Erwärmung auf maximal 2° C begrenzt werden.

Politik und Wissenschaft beschäftigen sich mit der anthropogenen (menschengemachten) Klimaveränderung spätestens seit den 1960er Jahren. Der amerikanische Präsident Richard Nixon startete 1969 erste Initiativen zur internationalen Koordination von umweltpolitischen Massnahmen. Die Weltgemeinschaft entwickelte über die Jahrzehnte und in mehreren bedeutenden Konferenzen Eckwerte für eine international abgestimmte Klimapolitik⁴:

- Stockholm, 1972
- Rio de Janeiro, 1992 [Klimarahmenkonvention]
- Kyoto, 1997 [Emissionsrechtehandel, Reduktionsziel -5% im 2010 ggü. 1990]

³ Nicht jedes Treibhausgas hat die gleiche Wirkung auf das Klima. Gewisse verbleiben länger als andere in der Atmosphäre oder können mehr Wärme zurückhalten als andere.

⁴ Wikipedia (2022): Klimapolitik besucht am 10.08.2022

- Bali, 2007 [Klimaschutzabkommen]
- Doha, 2010 [Begrenzung auf 2° C Temperaturanstieg]
- Paris, 2015 [neue Reduktionsziele, Nachfolgeabkommen zu Kyoto, Stabilisierung Temperatur auf +1.5° bis +2.0°]

Insbesondere mit dem Kyoto-Protokoll⁵ 1997 verpflichteten sich zahlreiche Staaten den CO₂-Ausstoss bis 2010 auf Basis des Ausstosses 1990 um 5 % zu reduzieren. Aktuell wird mit dem Pariser Abkommen⁶ anvisiert, den globalen Temperaturanstieg gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter auf +2° C, besser nur auf +1.5° C zu beschränken, wobei sich das Klima im 2020 im globalen Mittel bereits um 1.1° C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter erwärmt hat. In Davos, einem Ort mit den längsten Messreihen, beispielsweise hat sich die Jahresmittel-Temperatur im gleitenden 20jährigen Mittelwert zwischen 1864 und 2022 um 1.75° C erhöht. Anzunehmen ist, dass im globalen Mittel bereits 2035 +1.5° C und 2050 +2° C erreicht werden.

Das Ziel der maximalen Erwärmung um 2° C bemisst sich daher, weil vermutet wird, dass ab dieser Erwärmung Klimakippeffekte mit nicht absehbaren, allenfalls irreversiblen Folgen eintreten könnten. Zu berücksichtigen ist auch, dass heute davon ausgegangen werden muss, dass die Beschränkung der Klimaerwärmung auf unter +1.5° C nur mit negativen Emissionen, also der Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre und anschliessender Einlagerung erreicht werden kann. Das Pariser Abkommen bedeutet, dass auch künftig noch CO₂ ausgestossen werden darf, so lange in gleicher Menge CO₂ absorbiert wird. Deshalb spricht man vom Ziel 'Netto-Null'. Die Schweiz hat ein indikatives Reduktionsziel von 70-85% ggü. 1990 im Zusammenhang mit dem Klimaschutzabkommen genannt.⁷

1.4 Klimaauswirkungen in Graubünden

Schnee- &
Wasserknappheit sowie
Murgänge

Die globale Klimapolitik leitet sich aus der Befürchtung ab, dass globale Klimaveränderungen zu grossen natürlichen, wirtschaftlichen und sozialen Verwerfungen auf der Welt führen könnten. Bei den natürlichen Verwerfungen stehen Themen wie steigende Meeresspiegel, Wassermangel, der Biodiversitätsverlust und zunehmende Naturkatastrophen im Fokus. Mit Veränderungen des Klimas ist damit zu rechnen, dass die Besiedelung von Weltregionen angepasst werden muss und dies zu markanten klimatisch bedingten Migrationsbewegungen führen kann, welche sowohl Menschen wie Wirtschaft betreffen.

Auch lokal für den Kanton Graubünden sind bei einer weiteren Erwärmung des Klimas wesentliche Auswirkungen zu erwarten. Generell wird derzeit angenommen, dass im **Sommer**

- die Trockenheit zunimmt. Dabei ist in der Landwirtschaft und im Wald mit Herausforderungen zu rechnen (Bewässerung, Waldbrände).
- aufgrund des Abschmelzens des Permafrostes mit vermehrten Massenbewegungen wie Murgängen zu rechnen ist.
- vermehrt Hochwasserereignisse aufgrund von Starkniederschlägen eintreten.
- neue Schädlinge auftauchen werden.
- die Landwirtschaft bis in höhere Lagen möglich sein wird.
- der Sommertourismus stärker wird, weil die Temperaturen angenehmer sein werden als im Mittelland.

Im **Winter** dagegen ist mit zunehmendem Niederschlag und einer ansteigenden Schneefallgrenze zu rechnen. Dadurch könnte der Wintertourismus in Bedrängnis geraten. Aufgrund der Niederschlagszunahme ist weiter mit mehr Lawinen zu rechnen.

⁵ <https://unfccc.int/process-and-meetings#:2cf7f3b8-5c04-4d8a-95e2-f91ee4e4e85d>

⁶ <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

⁷ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/klima--internationales/das-uebereinkommen-von-paris.html>

Für viele der genannten Risiken bestehen Lösungen. Zu erwähnen sind beispielsweise...

- die Aufwertung des Sommertourismus.
- die Optimierung des Wassermanagements (Löschwasser, Bewässerung, Trinkwasser, Energieproduktion).
- die Erhöhung der Resilienz des Waldes mit entsprechenden Pflanzenarten.
- die laufende Aktualisierung der Gefahrenkarten.
- die Ergreifung von Schutzmassnahmen gegen Massenbewegungen und Hochwasser.
- die Höherlegung von Skigebieten.

Die grössten wirtschaftlichen Kosten dürften dabei die allfällig notwendige Anpassung des Wintertourismus sowie die Sicherung von Siedlungen und Infrastruktur vor Naturgefahren bilden.

In diesem Bericht beschäftigen wir uns jedoch nicht mit der Frage der Anpassung von Graubünden an geänderten Klimaverhältnissen. Wir fokussieren uns auf die Frage ob und wie Graubünden die eigenen CO₂-Emissionen auf Netto-Null reduzieren kann.

1.5 Territorialprinzip vs. Verursacherprinzip

Territorialprinzip als
Massstab verwenden

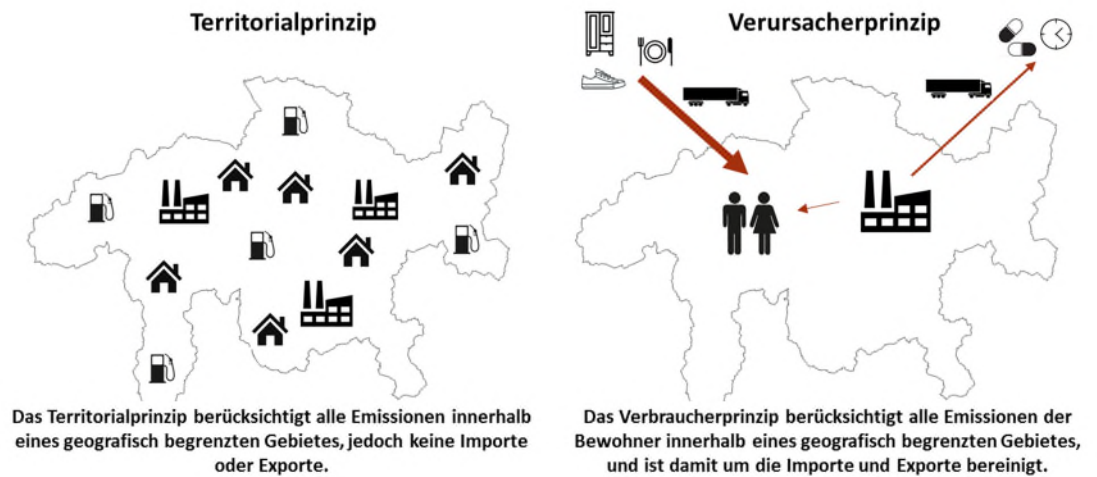
Wenn man das Ziel der Eliminierung des CO₂ vor Augen hat, stellt sich zunächst als Standort Graubünden die Frage, ob man

- a) den **innerhalb der geografischen Grenzen** von Graubünden ausgestossenen CO₂ (Territorialprinzip), oder ob
- b) man den durch die **Bündner Bevölkerung verursachten** weltweiten CO₂-Ausstoss (Verursacherprinzip) eliminieren will?

Wir diskutieren kurz den Unterschied: Beim Territorialprinzip werden in Graubünden auch die Emissionen aus den Zweitwohnungen, der Industrie und der Zementproduktion in Untervaz zugerechnet. Die Produkte der Industrie werden jedoch zu mehr als 90 % exportiert. Auch das Zement wird zu wesentlichen Anteilen exportiert und die Zweitwohnungen gehören zu 90 % ausserkantonalen Personen. Umgekehrt wird das bei der Herstellung von Produkten ausserhalb von Graubünden emittierte CO₂ nicht berücksichtigt (z.B. Herstellung von Autos, Waschmaschinen, Essen). Die in diesen importierten Gütern versteckte Herstellungsenergie wird als 'Graue Energie', die daraus entstehenden Emissionen werden als 'Graue Emissionen' bezeichnet.

Abbildung 2

Das Territorialprinzip links und das Verursacherprinzip rechts



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Tabelle 1

Vereinfachte Gegenüberstellung von Territorial- und Verursacherprinzip der CO₂-Emissionen in Graubünden

Vom Territorialprinzip zum Verursacherprinzip

CO₂-Emissionen aus den in Graubünden verkauften Treibstoffen für den Verkehr

- + CO₂-Emissionen der Gebäude in Graubünden
- + CO₂-Emissionen der Industrie inkl. Zementproduktion in Graubünden
- + CO₂-Emissionen der Landwirtschaft in Graubünden
- + CO₂-Emissionen aus der Abfallentsorgung
- ./ CO₂-Bindung im wachsenden Bündner Wald

= **CO₂ Ausstoss in Graubünden (⇒ Territorialprinzip)**

- ./ CO₂-Emissionen der Zweitwohnungen ausserkantonalen Personen in Graubünden
- ./ CO₂-Emissionen von ausserkantonalen, touristischer Gästen (z.B. Skifahren)
- ./ CO₂-Emissionen exportierter Güter der Industrie (inkl. Zementwerk) (graue Emissionen)
- ./ CO₂-Emissionen exportierter landwirtschaftlicher Produkte (z. B. Milch, Käse, Fleisch)
- ./ (je nach Sichtweise) International vermiedene CO₂-Emissionen des exportierten Stroms aus Wasserkraft
- + CO₂-Emissionen aus der Produktion der importierten Güter (graue Emissionen)
- + CO₂-Emissionen aus dem importierten Strom
- + CO₂-Emissionen aus Reisen von Einwohnern und Einwohnerinnen aus Graubünden (Flugreisen, Übernachtungen in Hotels usw.)

= **durch Bündner Bevölkerung verursachter weltweiter CO₂-Ausstoss (⇒ Verursacherprinzip)**

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Von einem ethischen Standpunkt aus gesehen, müssten grundsätzlich die Konsumenten, die durch sie verursachten weltweiten CO₂-Emissionen vermeiden oder kompensieren, also nach dem Verursacherprinzip handeln. Weil aber Staaten nur auf ihrem eigenen Territorialgebiet tätig werden können, können sie primär die selbst verursachten CO₂-Emissionen beeinflussen, also gemäss dem Territorialprinzip.

10 Tonnen CO₂ pro Kopf und Jahr

Insgesamt werden im Kanton Graubünden pro Jahr 2 Mio. Tonnen CO₂ aus nicht erneuerbaren Quellen ausgestossen. Dies sind umgerechnet 10 Tonnen pro Einwohnenden. Gemäss nationalen Erhebungen werden in der Schweiz (territorial) jedoch nur 5.4 Tonnen CO₂ pro

Einwohnenden emittiert.⁸ Das bedeutet, dass die Emissionen pro Einwohnenden in Graubünden deutlich höher liegen als im nationalen Durchschnitt. Dies ist primär auf das Zementwerk in Untervaz, der relativ hohen Dichte an Industrie, den Zweitwohnungen und den längeren Verkehrswegen in Graubünden zurückzuführen. Gemäss der nationalen Erhebung verursacht die Schweizer Bevölkerung durch ihr Konsumverhalten weltweit rund 13.3 Tonnen CO₂ pro Einwohnenden und Jahr. Diese Zahl darf man vereinfachend auch für die Bündner Bevölkerung annehmen, da sich das Konsumverhalten nicht wesentlich vom Rest des Landes unterscheiden dürfte. Dies führt zu folgenden Schlüssen:

Tabelle 2

Schätzung graue CO₂-Emissionen für Graubünden nach dem Verursacherprinzip

Tonnen CO ₂ pro Kopf / Jahr	Graubünden	Schweiz
Territorialprinzip	10.0	5.4
Verursacherprinzip	(Annahme CH = GR) 13.3	↔↔↔↔↔ 13.3
Unterschied Territorial zu Verursacherprinzip (⇒ Nettoausgleich graue Emissionen)	(Resultierend für GR) 3.3	7.9

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden basierend auf BAFU, ANU GR

Wenn das Territorialprinzip angewendet wird, müssen in Graubünden 10 Tonnen CO₂ pro Einwohnenden eliminiert werden. Wenn man das Verursacherprinzip anwenden würde, wären dies 13.3 Tonnen CO₂.

⁸ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/inkuerze.html>

2 Reduktionsziele in Graubünden

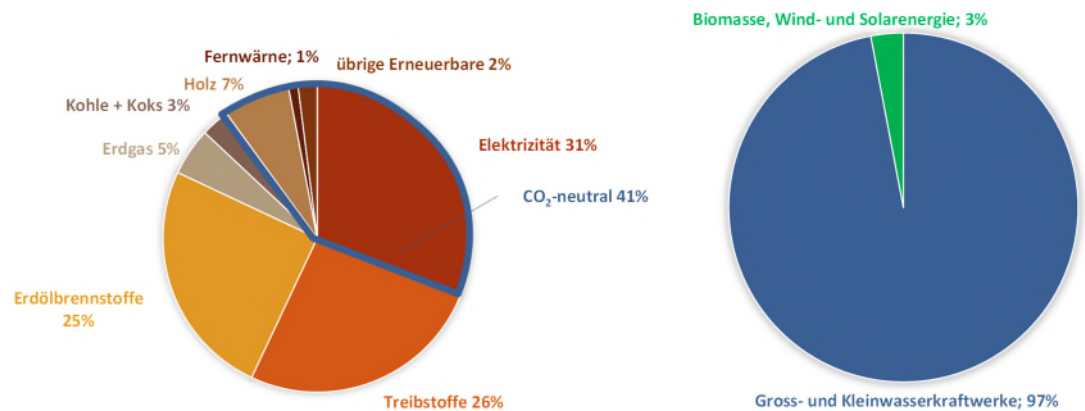
2.1 Aktueller CO₂-Ausstoss in Graubünden

GR emittiert 2 Mio. t CO₂ pro Jahr

Im Kanton Graubünden werden rund 6.4 TWh Energie pro Jahr verbraucht, wovon 31% oder rund 2 TWh in Form von Elektrizität. Weil Graubünden mit der Wasserkraft rund 8 TWh Strom aus erneuerbaren Quellen produziert, exportiert Graubünden pro Jahr rund 6 TWh weitgehend CO₂-freien Strom. Vom Gesamtenergieverbrauch in Graubünden stammen 59% bzw. 3.8 TWh Energie aus fossilen Energieträgern, die importiert werden (vgl. Abbildung 3).

Abbildung 3

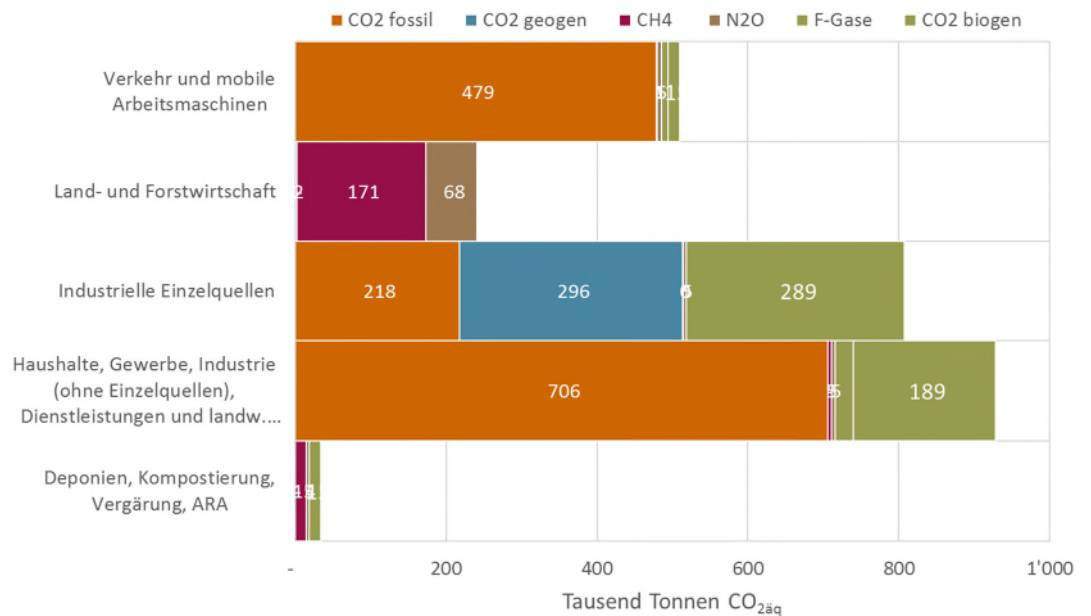
Der Gesamtenergieverbrauch (links) beträgt 6'435 Gigawattstunden (GWh), während die CO₂-neutrale Stromproduktion (rechts) 8'000 GWh beträgt.



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden auf Basis Aktionsplan Green Deal und AEV

Abbildung 4

Der CO_{2äq}-Ausstoss in Graubünden im 2020 nach Sektoren und Element⁹



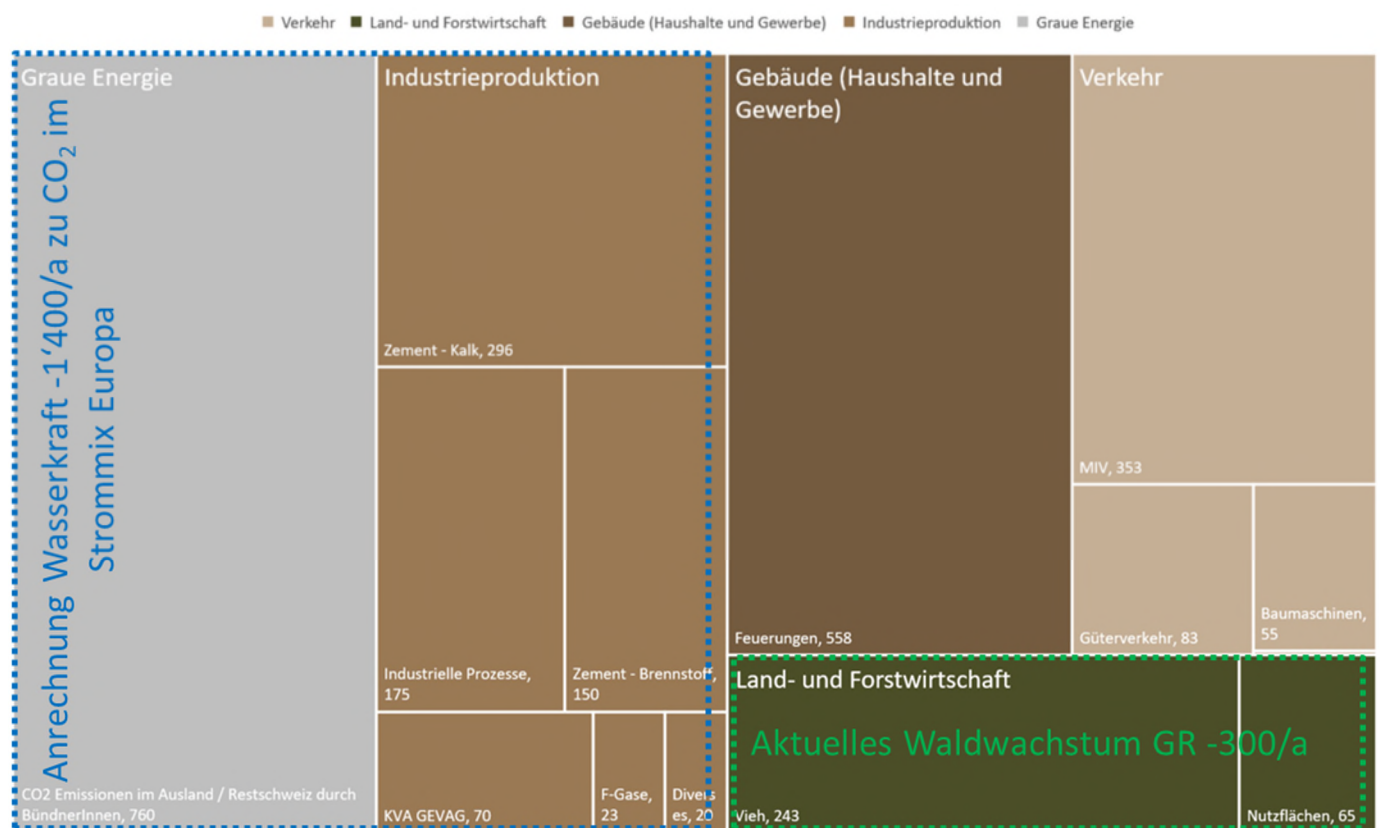
Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf Emissionskataster 2020 Kanton Graubünden

⁹ Im 'Diverses' sind Pistenfahrzeuge, Kiesabbau, industriellen Fahrzeuge, Lösemittel und Verluste durch die Verteilung von Brenn- und Treibstoffen enthalten.

Aufgrund des Energieverbrauchs und weiterer CO₂-Quellen werden aktuell in Graubünden jährlich rund 2.5 Mio. Tonnen CO₂ emittiert. Bei einem Teil davon, nämlich 0.5 Mio. Tonnen handelt es sich um Emissionen, die aus erneuerbaren Quellen entstehen und deshalb nicht zu den zu vermeidenden Emissionen gezählt werden. Diese Anteile sind in der Abbildung 4 grün eingefärbt. Eindrücklich sichtbar ist der hohe Anteil biogener Anteile im Industriesektor. Das Holzheizkraftwerk der Axpo Tegra in Domat/Ems trägt dazu einen erheblichen Teil bei und sorgt insbesondere bei der Ems Chemie für einen grossen Teil des Wärmebedarfs.¹⁰

Verbleiben 2 Mio. Tonnen CO_{2äq}, die eliminiert werden müssen (vgl. Abbildung 5).¹¹ Würde man die graue Energie aus den Importen und Exporten ohne Berücksichtigung der Stromproduktion aus Wasserkraft hinzurechnen, ergäben sich zusätzlich 0.7 Mio. Tonnen CO₂ jährlich, die nach dem Verursacherprinzip hinzuzurechnen wären. Dieser Anteil ist in Abbildung 5 grau eingefärbt.

Abbildung 5 Eckwerte der zur Diskussion stehenden CO₂-Emissionen und Anrechenbarkeiten je nach Gesichtspunkt



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden basierend auf Emissionskataster Graubünden 2020

Da Graubünden jährlich rund 6 TWh Strom aus Wasserkraft exportiert, kann man nach dem Verursacherprinzip diesen Anteil anrechnen, da dieser Strom aus Graubünden insbesondere der Schweiz und Europa hilft, eine tiefere CO₂-Bilanz auszuweisen. Umgerechnet zum heutigen CO₂-Gehalt des EU-Strommixes¹² könnte sich Graubünden knapp 1.4 Mio. Tonnen CO₂ aus diesem Stromexport gutschreiben lassen. Dieser Anteil ist durch den blauen Rahmen in Abbildung 5 kenntlich gemacht. Als letztes Element ist der wachsende Bündner Wald als CO₂-Senke zu berücksichtigen. Eine Hektare Wald speichert im Vergleich zu Wies-/Ackerland ungefähr 200 Tonnen zusätzliches CO₂. Der Bündner Wald ist zwischen 2004 und 2021 jährlich

¹⁰ <https://www.ems-group.com/de/ueber-ems/nachhaltigkeit/klimaneutralitaet/> abgerufen am 15. August 2022

¹¹ Je nach Quelle kann die Angabe der Emissionen in Mio. Tonnen in Graubünden variieren. Wir haben uns der Einfachheit auf eine Quelle (Emissionskataster 2020, ANU GR) festgelegt und ziehen alle Überlegungen an diesen Daten konsequent durch.

¹² Annahme, dass im EU Strommix 230 Gramm CO₂/kWh enthalten sind.

um 818 ha gewachsen. Dies bedeutet, dass der Bündner Wald in dieser Zeit pro Jahr zusätzlich zur normalen Absorptionskapazität 0.17 Mio. t CO₂ aufnehmen konnte.¹³ Auch die Berechnung über die jährlich verfügbaren aber nicht genutzten nachwachsenden Festmeter Holz im Bündner Wald führt zu einer jährlichen Nettoaufnahme von rund 0.3 Mio. t CO₂ im Bündner Wald in den letzten 20 Jahren. Netto gesehen, müsste Graubünden also nach dem so gerechneten Verursacherprinzip noch 1 Mio. Tonnen CO₂ eliminieren.

2.2 Diskussion der Reduktionsziele

Territorialprinzip ohne Gegenrechnung von Wasserkraft und Waldwachstum wird verwendet

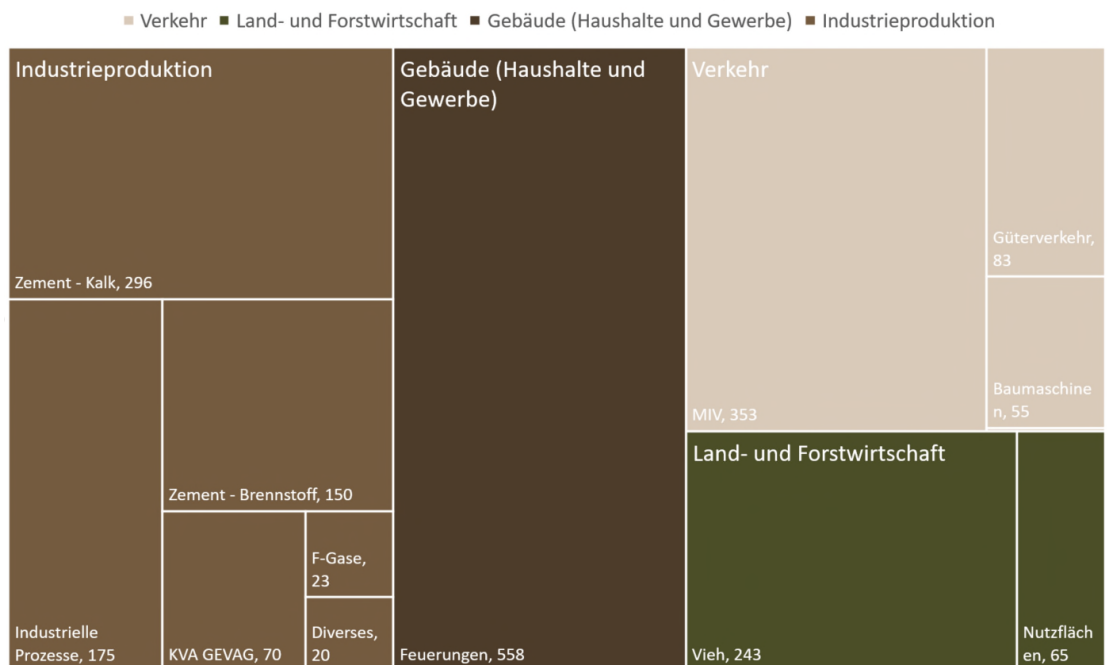
Je nach Betrachtung (Territorialprinzip oder Verursacherprinzip) ergeben sich also unterschiedliche Gesamtemissionen von CO₂, die in Graubünden eliminiert werden müssen. Würden wir das Verursacherprinzip unter Berücksichtigung des Wasserkraftstromes anwenden, würden wir uns die Aufgabe aus einem ethischen Standpunkt sehr einfach machen. Denn nur wenige Regionen auf der Welt verfügen über eine Ressource wie die Wasserkraft, die sie einsetzen können. Und weil Graubünden zu den wohlhabenderen Regionen der Welt gehört, kann auch erwartet werden, dass Graubünden einen überdurchschnittlichen Beitrag an die Reduktion der Emissionen leistet.

Weil aber Graubünden nach dem Territorialprinzip im Vergleich zur restlichen Schweiz bereits überdurchschnittlich viele CO₂-Emissionen schultert, wäre die Anwendung des Verursacherprinzips ohne Berücksichtigung der Wasserkraft auch nicht ganz fair.

Wir schlagen dennoch vor, dass sich Graubünden bezüglich der Elimination der CO₂-Emissionen das Territorialprinzip ohne Gegenrechnung von Wasserkraft und Waldwachstum als Ziel nimmt (vgl. Abbildung 6). Damit hält sich Graubünden an internationale Standards und leistet einen überdurchschnittlichen Beitrag pro Kopf, auch im Vergleich zur Schweiz.

Abbildung 6

Nach dem Territorialprinzip zu eliminierende CO₂-Emissionen (Äquivalente) in Graubünden um das Ziel von Netto-Null zu erreichen



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf Emissionskataster 2020 Kanton Graubünden

¹³ https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/diem/awn/wald/4_1_waldingraubuenden/faktenundzahlen4.2/Seiten/default.aspx

Aufgrund dieser Überlegungen muss Graubünden eine jährliche Nettoproduktion von 2 Mio. Tonnen CO₂ bzw. 10 Tonnen CO₂ pro Einwohnenden loswerden oder kompensieren, um eine Netto-Null-Bilanz aufzuweisen.

Die einfachste Lösung wäre nun, dass jeder Person aus Graubünden bei myclimate eine CO₂-Kompensation im Umfang von 10 Tonnen pro Jahr kaufen würde. Dies würde gemäss der Berechnung von myclimate CHF 286 pro Person und Jahr kosten. Auf den ganzen Kanton bezogen, entspräche dies CHF 57 Mio. jährlich.

Wenn man stattdessen CO₂-Zertifikate im europäischen Emissionshandelssystem beschaffen würde, die derzeit rund EUR 80 pro Tonne CO₂ kosten, würde die jährliche Kompensationszahlung für eine Person auf rund CHF 800 zu liegen kommen, bzw. den Kanton CHF 160 Mio. jährlich kosten.

Die kritische Leserinnen und Leser werden diesen Schlaumeiertrick jedoch rasch durchschauen und darauf bestehen, dass Graubünden die Emissionen vor Ort eliminiert. Kompensiert die ganze Welt nur mit Ablasszahlungen die CO₂-Emissionen, würde das System ad absurdum geführt. Diese kurze, humoristische Illustration gibt uns jedoch einen ersten Anhaltspunkt, wo die internationalen CO₂-Eliminationskosten liegen und ermöglichen uns später diese mit den tatsächlichen Eliminationskosten in Graubünden zu vergleichen (vgl. dazu Abbildung 32).

Vor diesem Hintergrund gehen wir von folgenden Prinzipien für die Eliminierung der Bündner CO₂-Emissionen aus:

- Die CO₂-Emissionen müssen vor Ort eliminiert werden.
- Jene Treibhausgase (aus nicht erneuerbaren Quellen), die nicht substituiert werden können, müssen abgeschieden werden.
- Der bisherige Stromexport wird sowohl aus der Energiebilanz wie auch für den zusätzlich benötigten Strom ausgeblendet.
- Das derzeit beobachtbare jährliche Wachstum des Bündner Waldes wird vernachlässigt, da das Wachstum nicht unendlich in die Zukunft projiziert werden kann.
- Wird im Kanton Graubünden fossile Energie durch Elektrizität substituiert (z.B. Elektroauto), muss die benötigte Stromproduktion mit im Kanton Graubünden zusätzlich installierten erneuerbaren Energiekapazitäten erhöht werden.

3 Lösungen für die Eliminierung des Bündner CO₂-Ausstosses

Für die Eliminierung des CO₂-Ausstosses besteht eine Vielzahl von Lösungsansätzen. Teilweise sind die entsprechenden Technologien ausgereift, teilweise braucht es noch Innovation und die Veränderung von politischen Rahmenbedingungen, damit sich neue Technologien am Markt durchsetzen können.

In diesem Kapitel werfen wir zuerst einen Blick zurück, was bisher erreicht wurde. Damit schärfen wir unser Sensorium für die Beurteilung, was in den nächsten 20 Jahren potenziell erreicht werden kann. Danach überprüfen wir grob und summarisch die Machbarkeit der heute in der Fachliteratur diskutierten Lösungsansätze bezogen auf Graubünden.

3.1 Überprüfung der bisherigen Erfolge in der Schweiz

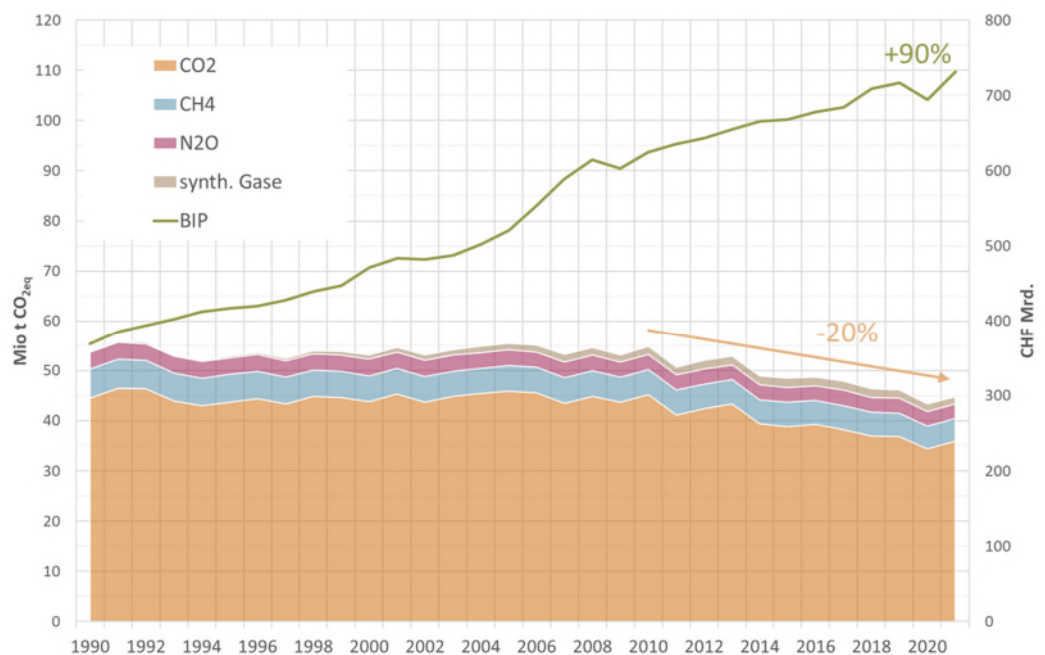
Fortschritte bei Haushalten und Industrie, Stillstand im Verkehr

Der Schweiz gelang es seit den 1990er Jahren den Ausstoss von klimaschädlichen Gasen nicht weiter ansteigen zu lassen, obwohl die Wirtschaft und die Bevölkerung weiter wuchsen. Damit gelang die Entkoppelung des Wirtschaftswachstums von den CO₂-Emissionen.

In der folgenden Grafik ist gut erkennbar, dass bis ins Jahr 2010 der CO₂-Ausstoss stagnierte und erst seit rund zehn Jahren eine deutliche Abnahme sichtbar ist. Werden also bisherige Entwicklungen extrapoliert, dürfen mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht die Bemühungen der letzten dreissig, sondern der letzten zehn Jahre fortgeschrieben werden.

Abbildung 7

Der Treibhausgasausstoss der Schweiz zwischen 1990 und 2020 aufgeteilt auf verschiedene Gase



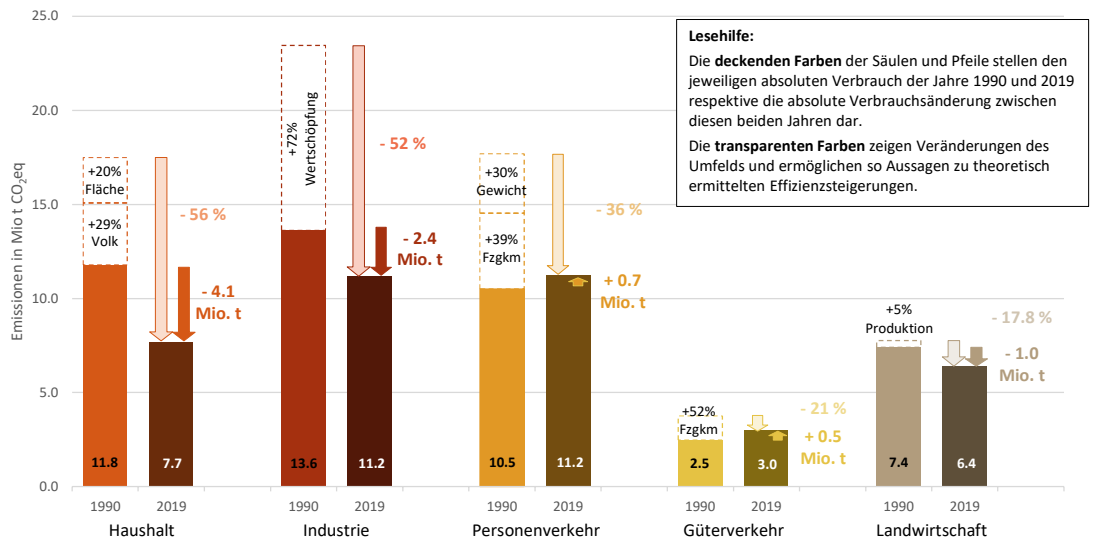
Quelle: Bundesamt für Umwelt, Kenngrössen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz und Bundesamt für Statistik (BIP)

Die Abbildung 8 zeigt die Entwicklung in den verschiedenen Sektoren. In Haushalten, Industrie und Landwirtschaft konnte trotz markantem Bevölkerungs-, Wirtschafts- und Wohlstandswachstum dank Effizienzsteigerungen deutlich CO₂ eingespart werden. Im Personen- sowie im Güterverkehr hat der CO₂-Ausstoss hingegen trotz massgeblicher Effizienzsteigerungen zugenommen. Im Personenverkehr ist die Zunahme auf die immer grösseren und damit schwereren Fahrzeuge zurückzuführen, während im Güterverkehr vermehrt voluminöse Lasten in kleineren Fahrzeugen transportiert werden, die jedoch über die Anzahl zu einem höheren Verbrauch führen. In Summe konnten, die CO₂-Emissionen auf nationaler Ebene in den letzten

dreissig Jahren gesenkt werden. Der Emissionskataster Graubünden zeigt ähnliche Trends wie die Schweizer Auswertungen (vgl. Abbildung 9).

Abbildung 8

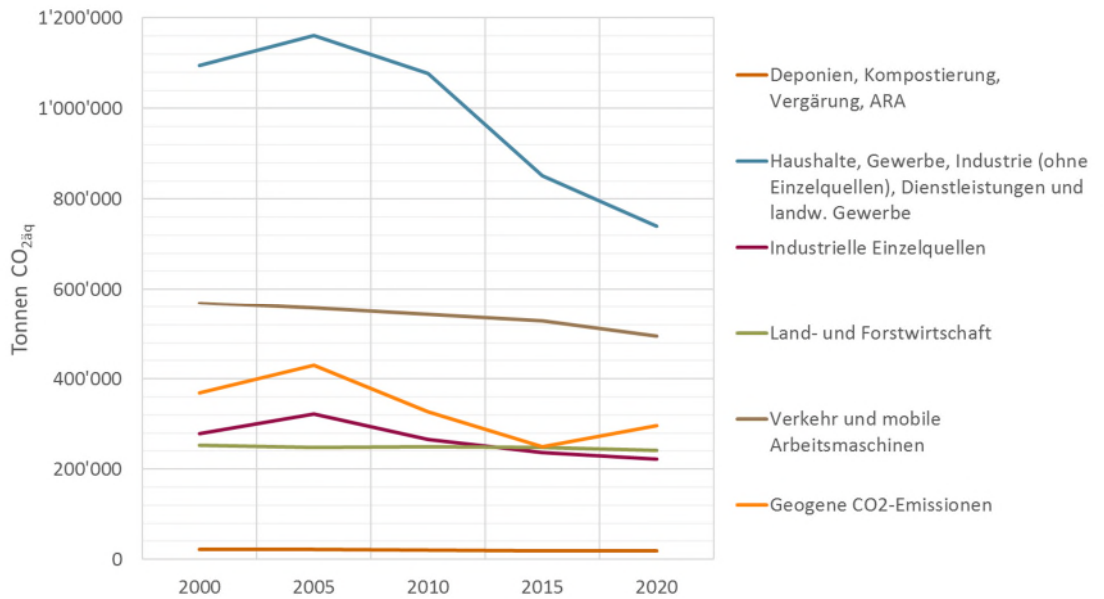
Der CO₂-Ausstoss der Schweiz zwischen 1990 und 2019¹⁴ aufgeteilt auf fünf Sektoren



Quelle: Bundesamt für Umwelt, Kenngrößen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz

Abbildung 9

CO_{2äq}-Emissionen in Graubünden (ohne biogene Emissionen, geogene separat ausgewiesen)



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf Emissionskataster Graubünden¹⁵

¹⁴ Es wurde trotz neueren Daten das Jahr 2019 gewählt, weil das Jahr 2020 COVID-19-bedingt einen tieferen CO₂-Ausstoss hatte.

¹⁵ Infrac (2022)

3.2 Handlungsmöglichkeiten in der Übersicht

Vermeiden, reduzieren, abscheiden

Am effizientesten ist es grundsätzlich, CO₂ zu vermeiden, beispielsweise indem man auf eine Autofahrt verzichtet. Ist das nicht möglich, steht an zweiter Stelle die Reduktion: Ist die Autofahrt zwingend notwendig, ist der Verbrauch möglichst tief zu halten, sei es durch eine höhere Effizienz oder alternative Technologien. **Es werden jedoch weiterhin Bereiche existieren, in denen eine Reduktion auf Null in absehbarer Zeit nicht möglich ist. Dort ist das CO₂ abzuscheiden und damit aus der Atmosphäre zu entfernen.** Dabei ist zu berücksichtigen, dass dieser Prozess wiederum Energie konsumiert, die aus erneuerbaren Quellen stammen muss, damit die Abscheidung CO₂-neutral bleibt.

Eine Veränderung des bestehenden Zustandes geschieht aus verschiedenen Gründen wie beispielsweise technologischem Fortschritt oder juristischen Massnahmen, wobei in einer liberalen Gesellschaft eine strenge regulatorische Massnahme (bspw. ein Verbot einer Technologie) schwierig umsetzbar ist. Entsprechend müssen Anreize gesetzt werden, damit eine Veränderung dennoch provoziert werden kann.

Jede Anpassung setzt jedoch die technische Machbarkeit voraus, die zu allererst gegeben sein muss. Oft ist mit der technischen Machbarkeit jedoch die ökonomische Machbarkeit noch nicht gegeben. In diesem Fall kann der Staat entweder in Marktregeln eingreifen (z.B. Lenkungsabgaben, Quotenvorgaben) oder mit finanziellen Förderungsmechanismen das Verhalten der Akteure in Bezug auf den CO₂-Ausstoss beeinflussen. Wenn die finanziellen Anreize nicht genügen, kann der Staat als letztes Mittel, wenn der politische Wille dazu vorhanden ist, Ge- und Verbote aussprechen. Aus all diesen Gründen sind nicht alle grundsätzlich denkbaren Lösungsansätze beeinflussbar. Wir gehen in unseren Überlegungen davon aus, dass die Technologie im Zentrum steht. Die vorhandenen Lösungsansätze zur CO₂-Reduktion sind zahlreich, wie die Abbildung 10 zeigt.

Abbildung 10

Ansätze zur CO₂-Reduktion

	Verkehr	Landwirtschaft	Gebäude	Industrie
Vermeiden	<ul style="list-style-type: none"> – Weniger Fahrten – Carpooling 	<ul style="list-style-type: none"> – Weniger Produktion von Fleisch und Milch – Weniger Düngemittel 	<ul style="list-style-type: none"> – Tiefere Heiztemperaturen – Reduktion Fläche pro Bewohner – Bessere Isolation – Reduktion Warmwasserverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> – Weniger Beton verbauen – ?
Reduzieren	<ul style="list-style-type: none"> – Effizientere Verbrennungsmotoren – Hybride Antriebe – Alternative Antriebe (Elektro, Wasserstoff, synthetische Treibstoffe) – ÖV statt MIV – Bahn statt LKW für Güter 	<ul style="list-style-type: none"> – Anderes Futter mit weniger Methanausstoss – Andere Flächenbewirtschaftung 	<ul style="list-style-type: none"> – Fernwärme – Holz / Biomasse – Wärme-Tauscher (Luft, Erde, Wasser) – Geothermie 	<ul style="list-style-type: none"> – Effizientere Prozesse – Alternative erneuerbare Treib- und Brennstoffe – Elektrifizierung
Kompensieren	<ul style="list-style-type: none"> – CO₂-Abscheidung und Speicherung 			<ul style="list-style-type: none"> – CO₂-Bindung in Zement

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

In den folgenden vier Kapiteln werden die Ansätze der einzelnen Sektoren skizziert. Die aktuelle Wahrscheinlichkeit, dass der Lösungsansatz umgesetzt wird, wird mit einem Ampelsystem gekennzeichnet. Dabei ist wichtig, dass auch die Summe verschiedener Massnahmen zum Ziel führen kann und heute noch nicht klar ist, welches mittel- und langfristig die beste Option bilden wird. Wir blicken bei der Beurteilung der Ansätze auf die nächsten 20 – 30 Jahre. Es ist durchaus denkbar und auch wahrscheinlich, dass in einer

längeren Betrachtungsperiode Technologien zur Verfügung stehen werden, die heute noch nicht absehbar bzw. noch nicht ausgereift sind.







3.3 Elektrifizierung des Verkehrs


Elektroautos und Wasserstoff/synth. Treibstoffe sind die Lösungen

Verkehr lässt sich in die drei Sparten motorisierter Individualverkehr (MIV), Güterverkehr und öffentlicher Verkehr unterteilen, wovon die Erste mit Abstand am meisten CO₂ emittiert. Die offensichtlichen Lösungen reichen von Fahrleistungsverzicht, über eine Veränderung des Modalsplits zwischen öffentlichem Verkehr und Individualverkehr bis hin zur Verwendung von alternativen Antriebstechnologien. Am vielversprechendsten scheint heute die Elektrifizierung der Personenwagen, da hier die Technologie und auch die Markttauglichkeit erreicht zu sein scheint. Beim Güterverkehr sind mit Wasserstoff und synthetischen Treibstoffen Lösungen zwar in Sicht. Es dürfte jedoch noch einige Zeit brauchen, bis sich diese Treibstoffe am Markt vollends durchsetzen können.

Abbildung 11

Offensichtliche Lösungsansätze zur CO₂-Reduktion im Verkehr in Graubünden

Lösungsansatz	Beschreibung und Kommentar	
Weniger Fahrten im MIV und Güterverkehr	Die Mobilität nimmt eher zu und andere Möglichkeiten, bspw. für Carpooling sind in GR aufgrund der Geografie nur eingeschränkt möglich. Der Güterverkehr nimmt aufgrund leichteren, aber voluminöseren Sendungen und mehr online-Shopping eher zu.	
Synthetischer Treibstoff einsetzen	Synthetischer Treibstoff wird vermutlich im Zusammenhang mit der Luftfahrt entwickelt und industrialisiert. Die Technologie steht am Anfang und muss noch die Marktreife erreichen. Durch GR kaum beeinflussbar.	
Verbrauch senken	In den letzten Jahren konnten in der Effizienz der Verbrennungsmotoren grosse Fortschritte erzielt werden. Es ist fraglich, ob hier noch grosse Sprünge möglich sind, wenn die ganze Forschung in Richtung Elektromotoren / Batterien ausgerichtet wird. Durch GR kaum beeinflussbar.	
MIV elektrifizieren	Die Elektrifizierung des MIV schreitet voran, bedingt aber den Bau von Ladestationen. Zudem obliegt die Wahl der Antriebsart dem Kunden.	
LKW und Busse mit Wasserstoff oder Strom betreiben	Strom ist im Gebirge aufgrund der schweren Batterien nicht zwingend die beste Lösung. Wasserstoff könnte eine Alternative bieten, muss aber zuerst die Marktreife erreichen.	
Verkehrsverlagerung vom MIV auf den öV	Die Wahl des Verkehrsmittels obliegt meist dem Nutzer und kann nur sehr beschränkt beeinflusst werden. Insbesondere in GR dürfte es schwierig werden, im Personenverkehr den Modalsplit auf absehbare Zeit wesentlich zu verändern, da dies hohe Infrastrukturinvestitionen bedingen würde und durch die Elektrifizierung des MIV das 'schlechte Gewissen' wegfallen dürfte. Allenfalls punktuelle Verbesserungen möglich.	

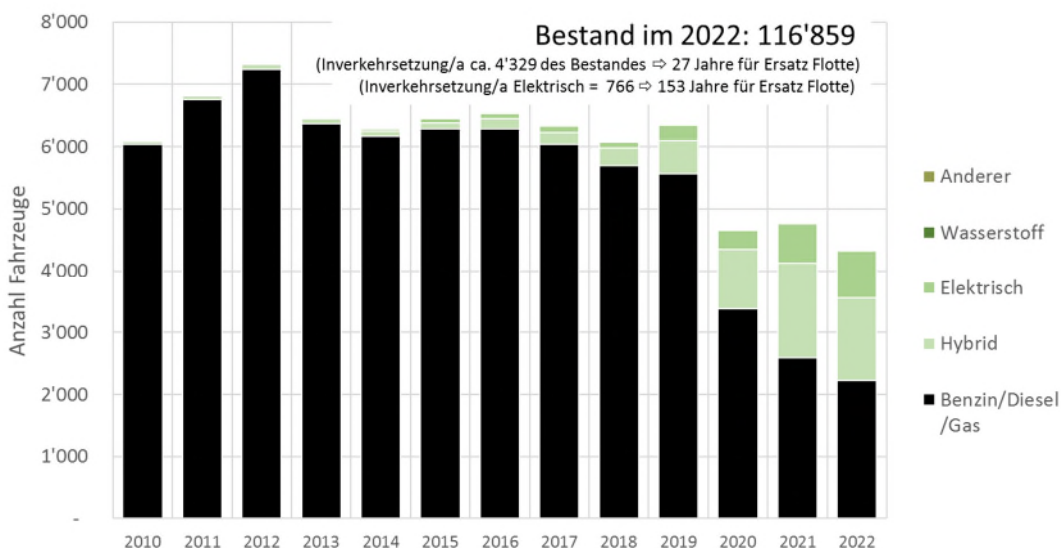
Verkehrsverlagerung Güter auf die Bahn	Ein Bahnnetz ist bei weitem nicht überall vorhanden und entsprechend ist das Potenzial auf absehbare Zeit sehr überschaubar.	
Legende: ● Lösung marktreif und Entwicklung beeinflussbar durch Kanton Graubünden; ● Lösungen vermutlich innerhalb absehbarem Zeithorizont marktreif, derzeit wenig Einflussmöglichkeit durch Kanton Graubünden; ● Lösung aus heutiger Sicht eher unwahrscheinlich		

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Aus Sicht der Bündner Energiepolitik besteht eine naheliegende Möglichkeit darin, den Umstieg von Verbrennungsmotoren auf Elektrizität bei den **Personenwagen** zu beschleunigen. Die Fahrzeugflotte weist erfahrungsgemäss eine mittlere Lebensdauer von 15 Jahren auf. Das heisst, wenn ab sofort nur noch Personenfahrzeuge mit elektrischen Antrieb zugelassen würden, wäre die Fahrzeugflotte in Graubünden im 2037 vollständig elektrifiziert. In den letzten beiden Jahren hat bei der Inverkehrsetzung der Anteil von Elektrofahrzeugen und Hybridfahrzeugen stark zugenommen. Im ersten Halbjahr 2023 waren rund 25% der neuen Fahrzeuge rein elektrisch und 55% elektrisch oder elektrisch-hybrid angetrieben (vgl. Abbildung 12).

Abbildung 12

Inverkehrsetzung von Personenwagen in Graubünden nach Stückzahl (brutto)



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden basierend auf BFS

Instrumentell stehen dem Kanton für die Beschleunigung der Flottenerneuerung die Zulassungsvorschriften (Ver- und Gebote) oder finanzielle Anreize (Motorfahrzeugsteuern, Beiträge) zur Verfügung. Bei diesen Instrumenten wird jedoch nur die in Graubünden registrierte Fahrzeugflotte, nicht jedoch der Gesamtverkehr auf Bündner Strassen erfasst. Verschiedene Länder und Städte diskutieren solche Auflagen bereits oder haben bereits über Zeitnahe Verbote entschieden. Beispielsweise will Norwegen die Inverkehrsetzung von Verbrennermotoren ab 2025 verbieten. Die Ausrüstung mit den notwendigen Stromtankstellen scheint hingegen die Wirtschaft relativ rasch und gut umzusetzen, wenn die entsprechende Nachfrage besteht. Hier könnte notfalls die kantonale Politik mit Investitionsanreizen helfen.

Im Bereich des **Güterverkehrs** müssen die alternativen Treibstoffe noch zur Marktreife geführt werden. Der Kanton Graubünden dürfte hier nur beschränkt Einfluss haben. Wir gehen davon aus, dass synthetische Treibstoffe insbesondere durch die Flugindustrie nachgefragt werden und insbesondere die Autoindustrie, die notwendige alternativen

Treibsysteme für den Güterverkehr entwickeln wird. Allenfalls können einzelne Pilotprojekte und der Aufbau von entsprechender Logistik in Graubünden durch eine kantonale Politik unterstützt werden.

Werden alle Lösungsansätze ausgeschöpft, ist davon auszugehen, dass im Sektor Verkehr grundsätzlich auf langer Sicht jeglicher CO₂-Ausstoss vermieden werden kann. Die Elektrifizierung des MIV wird gemäss unseren Schätzungen in der Grössenordnung von rund 500 GWh mehr Stromnachfrage in Graubünden verursachen.

Info-Box: Die alternativen Energieträger im Verkehr

Beim **Wasserstoffantrieb wird mit einer Brennstoffzelle** aus Wasserstoff und Sauerstoff Elektrizität produziert und ein Fahrzeug damit betrieben. Entscheidend ist dabei, dass der verwendete Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen stammt. Vorteile von Wasserstoff sind die gute Speicherbarkeit, der schnelle Tankvorgang bei hoher Reichweite, sowie dass keine Batterien benötigt werden. Derzeit entstehen bei der Herstellung hohe Energieverluste. Zudem ist die Verfügbarkeit sehr eingeschränkt, da heute in der Schweiz erst rund ein Dutzend Wasserstofftankstellen betrieben werden.

Die Energieunternehmen Axpo und Rhienergie haben beim **Wasserkraftwerk Reichenau** in Domat/Ems mit dem Bau einer **Produktionsanlage für Wasserstoff** mit einer Kapazität von 2.5 MW bzw. 350 Tonnen Wasserstoff jährlich begonnen. Die jährliche Produktion entspricht 1.5 Millionen Liter Diesel. Damit können rund 5% des heutigen Dieselbedarfs in Graubünden für den Güterverkehr von ~31.4 Millionen Liter gedeckt werden. Es wird mit Investitionskosten von mehr als CHF 8 Mio. gerechnet. Die Unternehmen gehen von einem starken Wachstum der Nachfrage für Wasserstoff aus.¹⁶

Bild: Typische dezentrale Wasserstoffproduktionsanlage



Synthetische Treibstoffe funktionieren in bestehenden Verbrennungsmotoren. Neben der Weiternutzung bestehender Fahrzeuge, besteht auch ein Verteilnetz. Allerdings benötigt die Gewinnung synthetischer Treibstoffe zahlreiche Prozessschritte, die alle energieverlustbehaftet sind und sich im Wirkungsgrad nicht mehr weiter wesentlich optimieren lassen. Gleichzeitig hat ein Elektromotor einen Wirkungsgrad von über 90 %, während ein Verbrennungsmotor nur bei gut 30 % liegt. Der Elektromotor kann zudem Energie zurückgewinnen (rekuperieren), was beim Verbrennungsmotor nicht gelingt. Der bereits schlechte Wirkungsgrad des synthetischen Treibstoffs wird dadurch im Vergleich zu batteriegetriebenen Elektroautos noch schlechter.

Batterien werden heute im Autoverkehr bereits verbreitet eingesetzt, sind aber bei hohen Energien und Leistungen, wie beispielsweise LKW im Gebirge nach wie vor schwierig einsetzbar: Sie sind schwer und werden auf Steigungen schneller warm.

¹⁶ <https://www.axpo.com/ch/de/ueber-uns/medien-und-politik/medienmitteilungen.detail.html/medienmitteilungen/2023/wasserkraftwerk-reichenau-produziert-kuenftig-auch-wasserstoff.html>

Info-Box: CO₂-neutrales Kerosin aus dem Emsland¹⁷

Im niedersächsischen Werlte ist [im Herbst 2021] die nach Angaben des Betreibers Atmosfair weltweit erste Anlage zur Herstellung von CO₂-neutralem Kerosin eröffnet worden.

Die Produktionskapazität soll nach dem Erreichen des Regelbetriebs im Jahr 2022 bei einer Tonne oder acht Fässern zu 159 Litern (1'272 Liter) Rohkerosin pro Tag liegen. Erster Kunde ist die Lufthansa, beliefert wird der Flughafen Hamburg.

Anlage zur Produktion von täglich einer Tonne (1'272 Liter) Rohkerosin in Werlte (D)



(...) Die neuartige Anlage produziert Kerosin synthetisch mit Hilfe von Wasser und Strom, den Windräder aus dem Umland liefern. Zudem werden Abfall-CO₂ aus Lebensmittelresten einer Biogasanlage sowie CO₂ aus der Umgebungsluft verwendet. Den Regelbetrieb plant Atmosfair ab dem ersten Quartal 2022; dann soll die Anlage täglich acht Fässer mit Rohkerosin produzieren. Ab 2026 müssen in Deutschland mindestens 0.5 % des Flugkraftstoffes aus Power-to-Liquid-Kerosin bestehen. Dies entspricht jährlich rund 50'000 Tonnen und somit einem Vielfachen dessen, was die neue Anlage in Werlte produzieren kann. 2030 steigt die Beimischungsquote auf 2%. (...)

Aktuell liegen die Erzeugungskosten für E-Kerosin bei einem Energieeinsatz von 27 kWh pro Liter e-Kerosin weit über 5 Euro pro Liter – konventionelles Kerosin aus fossilem Rohöl kostet jedoch unter einem Euro pro Liter. "Bei Anlagen dieser Größe, die zudem nicht auf mehrere Jahrzehnte Betrieb ausgelegt sind, sind die Kosten noch sehr hoch", erklärt Dietrich Brockhagen von atmosfair. Die hohen Strompreise in Deutschland tragen demnach wohl den grössten Teil zu den noch überhöhten Kosten bei. In anderen Ländern, in denen mehr und günstigerer Sonnenstrom erzeugt wird sowie mit fortschreitender technologischer Entwicklung erwartet atmosfair jedoch Preise von weit weniger als 5 Euro für das E-Kerosin.¹⁸

¹⁷ <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/synthetisches-kerosin-emsland-atmosfair-lufthansa-101.html>

¹⁸ https://efahrer.chip.de/news/lufthansa-kauft-e-kerosin-aus-norddeutschland-doch-die-idee-hat-haken_106053

3.4 CO₂-Reduktion in der Landwirtschaft

Ein Teil der CO₂-Emissionen muss abgeschrieben werden

Die Landwirtschaft ist im Kanton Graubünden CO₂-intensiv, weil bedeutende Mengen an Milch und Fleisch produziert werden, was wiederum eine entsprechende Anzahl Vieh voraussetzt. Die Reduktion des CO₂ bzw. der CO₂-Äquivalente des Methangases kann nur erfolgen, wenn die Tiere weniger Methangas ausstossen, oder der Boden alternativ genutzt wird. Da Grasland doppelt soviel Kohlenstoff (bzw. CO₂) im Boden speichert als Ackerland und in Graubünden der Ackerbau nur teilweise effizient erfolgen kann, ergäbe sich höchstens die Alternative der Aufforstung der Gründlandflächen. Gleichzeitig würde aber auch auf die Produktion von Fleisch- und Milcherzeugnissen verzichtet.

Abbildung 13

Anteil an zu eliminierenden Emissionen in Graubünden und offensichtliche Lösungsansätze zur CO₂-Reduktion in der Landwirtschaft

Lösungsansatz	Kurzkommentar	
Weniger Tiere	Werden weniger Tiere gehalten, geht die Produktion von tierischen Lebensmitteln zurück, womit auch der Konsum zurückgehen muss, wenn nicht einfach der Ausstoss verlagert werden soll. Es benötigt also auch eine Anpassung des Konsumentenverhaltens.	●
Weniger Rinder	Rinder stossen viel Methan aus und entsprechend ist denkbar auf weniger Treibhausgasemittierende Tiere wie Schweine oder Hühner zu setzen. Allerdings eignen sich viele Graslandschaften besonders gut für die Rinderhaltung. Eine Bewirtschaftung mit Ziegen oder Schafen ist weiter ebenfalls denkbar. Eine rasche Umstellung der Landwirtschaft scheint wegen den damit zusammenhängenden Ernährungsgewohnheiten als kulturell sehr herausfordernd.	●
Weniger Düngemittel	Wird weniger Düngemittel ausgebracht, wird weniger CO ₂ emittiert. Allerdings ist auch mit einer Reduktion der produzierten Güter zu rechnen.	●
Kohlenstoff in den Boden einbringen	Je nach Bewirtschaftung des Landes kann der Boden mehr oder weniger Kohlenstoff aufnehmen. Derzeit sind Verfahren in Erprobung, die es ermöglichen, mehr Kohlenstoff vom Boden absorbieren zu lassen (z.B. Aktivkohle).	●
Anderes Futter	Aktuell wird intensiv an Futtermitteln geforscht, bei denen die Tiere weniger Methan ausstossen. Sollten sich die Ansätze als vielversprechend erweisen, sind sie jedoch noch auf die ganze Landwirtschaft auszudehnen.	●
Wasserstoff	Die landwirtschaftlichen Fahrzeuge werden heute primär mit Diesel betrieben. Auch hier dürfte sich wie beim Güterverkehr und bei Baumaschinen entweder Wasserstoff oder synthetische Treibstoffe durchsetzen.	● / ●

Legende: ● Lösung marktreif und Entwicklung beeinflussbar durch Kanton Graubünden; ● Lösungen vermutlich innerhalb absehbarem Zeithorizont marktreif, derzeit wenig Einflussmöglichkeit durch Kanton Graubünden; ● Lösung aus heutiger Sicht eher unwahrscheinlich

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Da dies politisch-gesellschaftlich aus heutiger Sicht nicht wahrscheinlich ist, müssen die Bemühungen auf die Reduktion des Methanausstosses sowie die Nutzung der Aufnahmefähigkeit des Graslandes für Kohlenstoff zur Absorbierung von zusätzlichem CO₂ genutzt werden. Letztlich bleibt noch die Abscheidung des CO₂.

Der Kanton Graubünden kann obenstehende Bemühungen (Fütterung, Düngung und Kohlenstoffaufnahme des Bodens) primär mit Forschung und Experimenten unterstützen. Wir gehen - unter Berücksichtigung der aktuellen Fachliteratur - davon aus, dass durch Optimierungen in den Prozessen der Landwirtschaft eine Reduktion der Treibhausgase um 20% und durch die Forschung an verbesserten Futtermitteln bzw. anderen Innovationen eine weitere Reduktion um 30% möglich ist, total also 50%.

Eine behördliche Vorgabe zur Veränderung der Tierzahlen zugunsten weniger CO₂-intensiven Tierarten, wie Hühnern oder Schweinen oder ein Verzicht auf die Produktion von Fleisch, Milch und Käse in Graubünden ist politisch zumindest aus heutiger Sicht nicht vorstellbar und aus gesamtheitlicher Sicht vermutlich auch wenig zweckmässig. Denn es würde dann höchstwahrscheinlich einfach mehr Fleisch oder Milch importiert werden. Auch wenn Fahrzeuge von Land- und Forstwirtschaft mit Batterien oder Wasserstoff betrieben würden, ist eine Landwirtschaft ohne CO₂-Ausstoss aktuell nicht vorstellbar, weshalb eine **Abscheidung in der Grössenordnung von 0.15 Mio. t CO₂ pro Jahr** (ungefähr der Hälfte des heutigen Ausstosses) notwendig sein wird.

3.5 Reduktion in den Gebäuden




Erneuerbare Energien sind wirtschaftlich.

Bei den Gebäuden fallen primär die Heizungen und die Warmwasseraufbereitung für die CO₂-Emissionen ins Gewicht. Hier haben Technologiewechsel die besten Chancen, weil die verschiedenen technischen Lösungen gemäss nachfolgender Tabelle ausgereift sind und sich in den meisten Fällen auch ökonomisch auszahlen.

Abbildung 14

Ansätze zur CO₂-Reduktion in den Gebäuden

Lösungsansatz	Kurzkommentar	
Weniger Heizen	Die Reduktion der Gebäudetemperatur ist wenig akzeptiert und zudem schwierig einzufordern, weil der Nutzer meistens selbst wählt, obwohl damit direkte Einsparungen (auch finanziell) möglich werden.	●
Reduktion der beheizten Fläche	Eine Reduktion der beheizten Fläche ist nicht in Aussicht, weil die Wohnungen grösser und die Haushalte eher kleiner werden.	●
Bessere Isolation der Gebäude	Eine verbesserte Isolation der Gebäude senkt den CO ₂ -Ausstoss. Neubauten sind bereits heute gut isoliert und bei Altbauten bestehen technische Möglichkeiten zur Nachisolierung (Fenster, Dach, Fassade). Aus Sicht des Immobilieneigentümers ist eine Nachisolierung derzeit aber oft nicht rentabel, weshalb sich die Investoren mit diesen Massnahmen zurückhalten.	●
Geothermie	Erdwärme ist teuer und nicht überall verfügbar (bspw. Grundwasserschutz) oder der Platz fehlt.	●

Fernwärme	Bei Fernwärme ist zu berücksichtigen, dass die Wärme auch CO ₂ -neutral erzeugt werden muss. In der Peripherie ist sie anspruchsvoll, wobei kleine Verbunde in dicht bebauten Gebieten interessant sein können.	
Wärme-Pumpen	Wärme-Pumpen werden trotz Investitionskosten verbreitet eingesetzt, auch weil sie in den meisten Fällen nahe an der Rentabilität liegen. In höher gelegenen Gebieten in Graubünden müssen Erdwärme- statt Luft-Wärmepumpen eingesetzt werden.	
Holz / Biomasse	Holz / Biomasse ist – solange nur ein Teil der Heizungen auf Holz / Biomasse umstellen - noch reichlich vorhanden, benötigt aufgrund der Energiedichte jedoch viel Platz. Moderne Feuerungen haben wenig Feinstaubemissionen.	

Legende: ● Lösung marktreif und Entwicklung beeinflussbar durch Kanton Graubünden; ● Lösungen vermutlich innerhalb absehbarem Zeithorizont marktreif, derzeit wenig Einflussmöglichkeit durch Kanton Graubünden; ● Lösung aus heutiger Sicht eher unwahrscheinlich

Quelle: Darstellung Wirtschaftsforum Graubünden

Für die Sanierung der Gebäude sind die Technologien vorhanden. Im Neubaubereich werden diese auch weitgehend genutzt. Im Altbestand muss zwischen dem Ersatz des Systems für Heizung/Warmwasser und der Isolation unterschieden werden. Die Systeme (Wärmepumpen, Holzfeuerungen) für Heizung und Warmwasser verursachen zwar etwas höhere Anfangsinvestitionen, sind aber im Betrieb sparsam. Die Investitionsrechnung geht in der Regel über den Investitionszyklus betrachtet auf. Die Nachisolierung von Gebäuden führt zwar zu einem tieferen Energieverbrauch. Dies ist volkswirtschaftlich wichtig, um den Bedarf an zusätzlichen erneuerbaren Stromproduktionen zu senken. Die Investition bleibt aber aus Sicht des Gebäudeeigentümers unattraktiv, da ihm in der Regel Mehrkosten entstehen. Es handelt sich hierbei also nicht um eine technologische, sondern ökonomische Hürde.

Eine weitere Hürde im Gebäudebereich stellen die zahlreichen Mehrfamilienhäuser im Stockwerkeigentum dar, insbesondere wegen schwerfälligen Entscheidungsprozessen und (zumindest zeitlich) heterogenen Interessen.

Die Reduktion des CO₂ in Gebäuden erscheint uns mit der heutigen Technik weitgehend möglich und die heute bestehenden Abreize könnten – wenn die Politik es will – beseitigt werden. Wir gehen davon aus, dass die Energievorschriften gepaart mit Finanzierungserleichterungen des Kantons die entscheidenden Hebel sind, um die Dekarbonisierung der Gebäude voranzutreiben.

Info-Box: Die Musterenergievorschriften der Kantone (MuKEN)

Die MuKEN geben seit Jahren den Takt für Verbesserungen am Gebäudepark vor: Erste Ansätze gab es bereits 1992, die ersten echten MuKEN seit dem Jahr 2000. Sie werden regelmässig aktualisiert und mit dem aktuellen Stand der Technik abgeglichen. Die aktualisierten MuKEN müssen jeweils von den kantonalen Parlamenten, teilweise auch von der Bevölkerung für verbindlich erklärt werden. Im Kanton Graubünden ist seit Jahresbeginn 2021 die MuKEN von 2014 in Kraft. Sie bietet Hauseigentümern elf Standardlösungen an. Dabei sind einige dieser Lösungen bereits heute CO₂-neutral, andere aber nicht. So ist beispielsweise bei einer Sanierung oder Neubau immer noch möglich 10 % erneuerbare Energie mit einer Solaranlage auf dem Dach zu produzieren und trotzdem eine Ölheizung für die Liegenschaft zu wählen. Es ist allerdings damit zu rechnen, dass in

den nächsten Jahren die MuKE n weiter verschärft werden. Sie bieten zudem einen grossen Hebel für den Umgang mit Sanierungen von Gebäuden.

In dicht besiedelten Gebieten steht zudem die Option Fernwärmenetze zur Verfügung. IBC Energie Wasser Chur rechnet damit, dass 60% des Wärmebedarfs der Stadt Chur über das künftige Fernwärmenetz abgedeckt werden können.¹⁹ Als Energieträger sind neben KVA, ARA sowie gewerblicher Abwärme (Anergiequellen) auch Wärmepumpen in Quartierzentralen und Wärme-Kraft-Koppelungsanlagen mit Holz, Biogas oder erneuerbarem Gas vorgesehen. Geht man auf Grundlage der Eckwerte der Planungen in der Stadt Chur aus und nimmt an, dass die nächstgrösseren 10 Gemeinden in Graubünden ebenfalls Fernwärmenetze umsetzen, die rund 50% der Bevölkerung erreichen, ergibt sich eine künftige Abdeckung von Wärme/Warmwasser über Netze im Ausmass von 675 GWh/a²⁰.

Durch die Elektrifizierung der Heizung / Warmwasseraufbereitung im Gebäudepark ist mit einem **zusätzlichen Verbrauch von rund 330 GWh** für Graubünden zu rechnen. Davon ist anzunehmen, dass ein Drittel im Sommer- und zwei Drittel im Winterhalbjahr anfallen.

3.6 CO₂-Emissionen der Industrie

Ökonomische Anreize für die Industrie setzen

Bei der Industrie ist der CO₂-Ausstoss auf sehr viele Untersektoren verteilt. Dadurch ist es nicht möglich, Lösungen für die ganze Industrie zusammenzufassen.

Abbildung 15

Ansätze zur CO₂-Reduktion in der Industrie

Lösungsansatz	Kurzkommentar	
Einsatz von mehr CO ₂ -neutralen Brennstoffen in der Zementproduktion	Zementwerke könnten grundsätzlich mehr CO ₂ -neutrale Brennstoffe wie Holz- und Biomasse verbrennen. Diese stehen allerdings nur beschränkt zur Verfügung. Zudem nehmen Zementwerke eine Entsorgungsfunktion für einen Teil des brennbaren Abfalls ein.	●
Energie einsparen	Viele industrielle Prozesse könnten energetisch optimiert werden. In der Regel handelt es sich um eine Frage der Abwägung zwischen den Kosten für die Energie und den Investitionskosten in energiesparende Massnahmen.	●
Elektrifizierung der Industriebetriebe	Bei den Industriebetrieben können verschiedene Prozesse mit entsprechender CO ₂ -Einsparung elektrifiziert werden.	●
CO ₂ -Bindung im Zement bei der Herstellung	Aktuell bestehen Absichten, in Zement CO ₂ zu binden, sogar dahin, dass Beton emissionsnegativ wird. Erste Versuche sind erfolgsversprechend, allerdings ist die Industrialisierung noch nicht vorhanden und die Kosten entsprechend hoch.	●

¹⁹ Unterlagen zur Volksabstimmung vom 12. März 2023 zur finanziellen Unterstützung der IBC Energie Wasser Chur in eine zukunftsgerichtete, nachhaltige und CO₂-neutrale Wärme- und Kälteversorgung.

²⁰ 300 GWh Fernwärme für 60% der Bevölkerung von Chur = 24'000 Personen hochgerechnet auf 50% Abdeckung der nächsten 10 grossen Gemeinden mit insgesamt 60'000 Einwohnern, ergo 30'000 durch Fernwärme zusätzlich versorgten Personen. Total 54'000 Personen, die durch Fernwärme versorgt werden (

Carbon Capture and Storage (CCS) (CO ₂ -Speicherung)	Die Abscheidung und Einlagerung von CO ₂ ist ebenfalls erst in kleinem Massstab möglich und entsprechend teuer. Weitere Forschung und Entwicklung ist notwendig.	●
Legende: ● Lösung marktreif und Entwicklung beeinflussbar durch Kanton Graubünden; ● Lösungen vermutlich innerhalb absehbarem Zeithorizont marktreif, derzeit wenig Einflussmöglichkeit durch Kanton Graubünden; ● Lösung aus heutiger Sicht eher unwahrscheinlich		

Quelle: Darstellung Wirtschaftsforum Graubünden

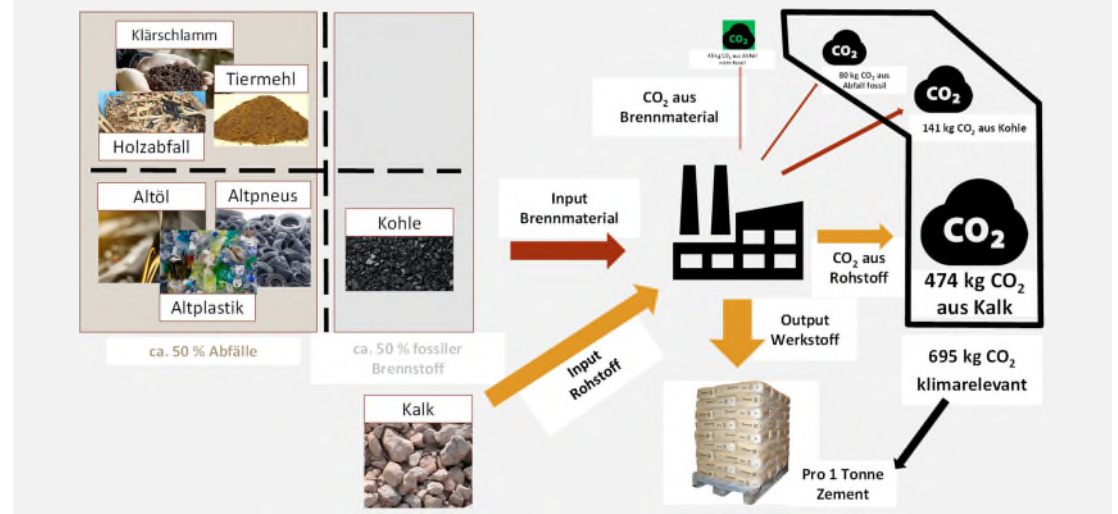
Zwei Grossverbraucher (das Zementwerk Untervaz, eines von sechs Zementwerken in der Schweiz, und die Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA) Trimmis) tragen allerdings mehr als die Hälfte zu den Industrieemissionen in Graubünden bei und entsprechend lohnt es sich, einen Fokus auf diese zu setzen.

Die KVA emittiert 0.07 Mio t klimarelevantem CO₂ pro Jahr²¹ und ist damit die zweitgrösste Emittentin der Industrie. KVA wie auch das Zementwerk setzen einen Teil des CO₂ durch die Verbrennung von Abfällen (z.B. Kunststoffe, Gummi) frei. Dieses CO₂ kann - solange die Abfälle entstehen - nicht verhindert werden. Es wird deshalb in der Industrie notwendig sein, nebst der Umstellung von Kraft- und Wärmeprozesse auf erneuerbaren Energien auch einen Teil des CO₂ künftig abzuscheiden.

Info-Box: Das Zementwerk in Untervaz²²

Das Zementwerk in Untervaz ist mit 0.45 Mio. t pro Jahr²³ der grösste CO₂-Emittent im Kanton Graubünden. Es stellt jedoch einen bisher unverzichtbaren Baustoff her. Bei der Herstellung von Zement wird Kalk, ein im Tagbau abgebauter Stein, auf hohe Temperatur erwärmt (gebrannt) und dann gemahlen. Später dient der Zement zusammen mit Wasser dem Sand und Kies im Beton als Bindemittel. Beim Brennen des Kalks entstehen aus dem Stein und aus dem Brennmaterial CO₂-Emissionen, wobei die Emissionen aus dem Kalk deutlich überwiegen.

Entsprechende Verfügbarkeit vorausgesetzt, kann ein Zementwerk jedoch wie andere Verbraucher auch, mehr CO₂-neutrale Brennstoffe verfeuern. Zu berücksichtigen ist allerdings auch, dass gewisse Leistungen für die Allgemeinheit erbracht werden (bspw. Verwertung von Altpneus oder Altöl), für die zumindest heute kein Ersatz besteht.



²¹ <https://gevag-gb.ch/umweltbericht/>

²² Erstellt mit Angaben der Holcim und Cemsuisse

²³ Errechnet aus «Umweltdaten 2020» der Holcim (Schweiz) AG

Die roten Pfeile symbolisieren den CO₂-Verlauf aus dem Brennmateriale, derweil die gelben den eigentlichen Materialfluss zeigen. Es ist augenfällig, dass deutlich über die Hälfte des CO₂ aus dem Brennen des Kalksteins stammt (geogenes CO₂). Dieses CO₂ kann nur dann reduziert werden, wenn der Zement gar nicht erst verwendet wird, im Zement wieder eingebunden oder letztlich abgeschieden wird.

Info-Box: ETH-Spin-Off Neustark²⁴



Ein Beispiel für die Reduktion des CO₂ in der Zementherstellung bietet die Firma Neustark, ein Spin-Off der ETH. Die Vision von Neustark ist, Beton emissionsnegativ herzustellen und dadurch CO₂ aus der Umwelt zu entfernen, statt wie heute üblich mit der Zementherstellung CO₂ freizusetzen. Dazu wird CO₂, ähnlich wie bei der Firma Climeworks, aus der Luft abgesaugt, mineralisiert und damit in den Poren des Betongranulats gebunden, was aktuell eine Verbesserung der Klimabilanz des Betons von 10 % bedeutet.

Die weitergehende Technologie, damit negative Emissionen möglich sind, ist noch nicht vorhanden und befindet sich im Entwicklungsstadium und muss nach der Erforschung noch industrialisiert werden. Die Technik ist deshalb interessant, weil es sehr wenig andere Ansätze für echte negative Emissionen gibt. Im vorliegenden Fall ist vorstellbar, dass die negativen Emissionen nicht nur Kosten bringen, sondern auch einen wirtschaftlichen Mehrwert. Im Idealfall verringert zudem dank dem möglichen Recycling von Altbeton das Deponievolumen, was wiederum weitere ökologische Vorteile bringen würde.

Es gibt selbstredend noch zahlreiche weitere industrielle Prozesse mit Freisetzung von CO₂, die hier nicht weiter vertieft werden. Bei einem Teil dieser Prozesse kann der Energiebedarf mit der Optimierung von Prozessen und Anlagen reduziert werden. Oft spielen dabei auch Kostenüberlegungen (Energiekosten vs. Investitionskosten für die Prozessverbesserung) eine Rolle. Bei einem Teil der Prozesse kann der Energieträger (Strom oder Wärme aus erneuerbaren Quellen) gewechselt werden, was oft auch primär eine ökonomische Frage ist.

Ein Teil des CO₂ wird jedoch nicht eliminierbar sein (z.B. Kunststoffprodukte) und damit muss dieser Anteil des CO₂ abgeschieden werden. Um die Prozessoptimierung oder den Wechsel von Energieträgern zu beschleunigen, könnte der Staat den Industrieunternehmen vorschreiben, dass sie für die Energieerzeugung erneuerbare Energien einsetzen müssen. Damit würde ein direkter Druck auch auf die Optimierung des Energiebedarfs erzeugt werden.

Ein allfälliger Mehrbedarf an Strom für den Ersatz von fossilen Energien in Graubünden liegt vermutlich in den Rechengenauigkeiten des vorliegenden Papiers. Wir gehen jedoch davon aus, dass eine **Abscheidung von ungefähr 0.6 Mio. t CO₂ pro Jahr** in diesem Sektor notwendig sein wird.

3.7 Abscheidung des Restausstosses

CO₂-Abscheidung benötigt viel Energie

Wie in den vorigen Kapiteln beschrieben, wird es insbesondere im Kanton Graubünden Bereiche geben, in denen eine Abscheidung und Einlagerung von CO₂ notwendig werden wird. Es sind dies primär die

- Emissionen aus der Landwirtschaft
- Emissionen durch die Verbrennung von fossilen Stoffen im Abfall

²⁴ <https://de.neustark.com/>

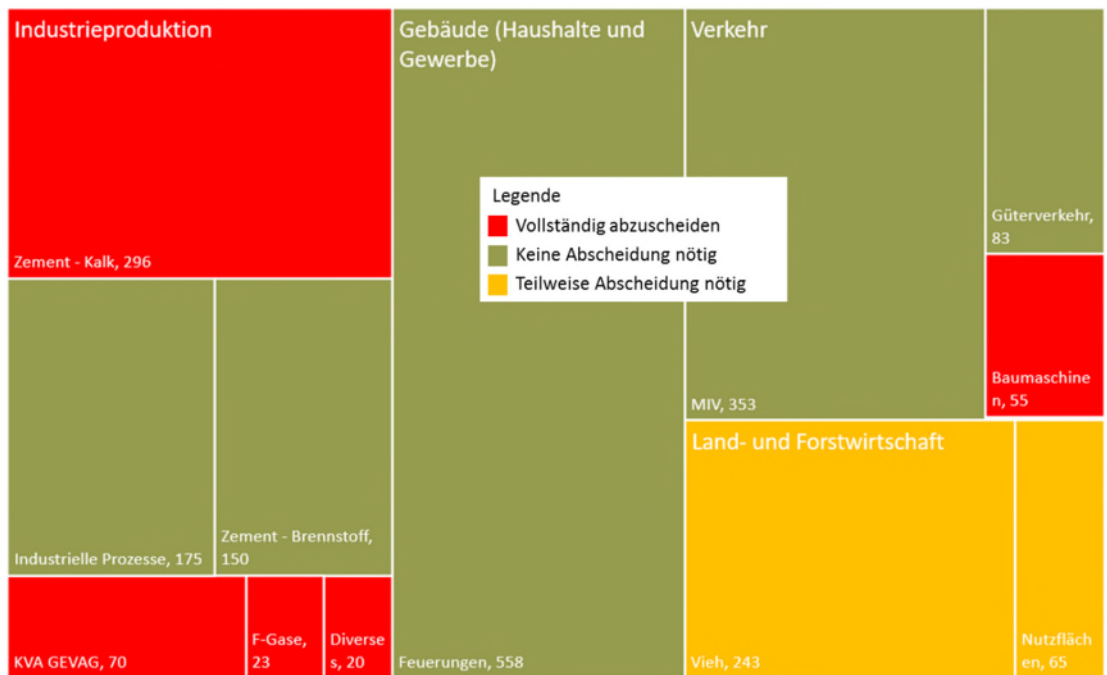
▪ Emissionen durch die Zementherstellung

Das abgeschiedene CO₂ muss entweder verfestigt («versteinert») und anschliessend im Boden eingelagert oder zur Herstellung synthetischer Treibstoffe verwendet werden. Bei der Einlagerung wird das CO₂ dauerhaft der Atmosphäre entzogen und sorgt nicht mehr für eine weitere Erwärmung des Klimas. Bei der Herstellung von synthetischen Flüssigtreibstoffen, wird das abgeschiedene CO₂ zwar wieder freigesetzt und danach wieder abgeschieden. Es bleibt so im Kreislauf und verhindert dass zusätzliches bereits im Erdöl/Erdgas gebundenes CO₂ zusätzlich freigesetzt wird. Die Technologien zur Abscheidung existieren bereits. Sie benötigen je nach Verfahren verhältnismässig viel thermische Energie oder Strom für die Abscheidung. Um eine CO₂-neutrale Abscheidung vorzunehmen, müssen diese Anlagen im grossen Massstab eingesetzt und die notwendige erneuerbare Energie zur Verfügung gestellt werden (vgl. dazu auch Info-Box: Climeworks).

Abbildung 16 zeigt die Übersicht des Restausstosses: Der Verkehr und die Feuerungen der Gebäude können komplett ohne fossile CO₂-Emissionen betrieben werden. Bei der Landwirtschaft gehen wir, analog den Grundlagen des Green Deal, davon aus, dass die Hälfte des Ausstosses reduziert werden kann. Bei der Industrie gehen wir davon aus, dass gewisse Teile vollumfänglich ohne CO₂-Emissionen betrieben werden können. Andere dagegen, wie die KVA und der Kalkanteil des Zementwerks können nach heutigem Stand der Technik nicht vermieden und müssen absorbiert werden.

Abbildung 16

Aufgrund des heutigen Standes der Technologie verbleibende CO₂-Emissionen (in Tsd. Tonnen) im Kanton Graubünden



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Für die Abscheidung der ungefähr 0.6 Mio. t CO₂ in Graubünden ist nach heutigem Stand der Technik **mit einem zusätzlichen Energieaufwand von ungefähr 680 GWh** pro Jahr zu rechnen. Bei der Abscheidung ist zu berücksichtigen, dass sie am Besten dort geschieht, wo eine hohe Konzentration von CO₂ mit hoher Temperatur existiert. Mit dem Zementwerk und der KVA in Untervaz existieren hierzu günstige Möglichkeiten, insbesondere auch weil beide Anlagen

über einen Bahnanschluss verfügen und so das gebundene CO₂ abtransportiert werden kann.²⁵

Als Übergangsmassnahme ist auch die Verwendung von abgeschiedenem CO₂ als synthetischer Treibstoff denkbar, wozu allerdings eine Weiterverarbeitung notwendig wäre, die ebenfalls wieder erneuerbaren Strom benötigt. Aktuell kann man davon ausgehen, dass der CO₂-Ausstoss bei KVA und Zementwerk vor Ort erfolgt. Für das CO₂ der Landwirtschaft wird es aber vermutlich zusätzliche Direct-air-capture-Anlagen (vergl. Climeworks) im Ausland brauchen. Denn diese Anlagen sind auf Wärmequellen angewiesen.

Info-Box: Holz als CO₂-Abscheidung

Im Wald des Kantons Graubünden sind heute ungefähr 80 Mio. t CO₂ gespeichert²⁶, was der Menge fossilen CO₂ entspricht, die der Kanton Graubünden aktuell in 40 Jahren ausstösst. Der Holzvorrat nimmt gemäss Angaben des Bundesamts für Statistik aufgrund der Unternutzung des Bündner Waldes jährlich um 250'000 m³ zu. Wenn die Holznutzung um diese 250'000 m³ erhöht würde und 40% davon als Bauholz genutzt würden, könnte über ca. 4 bis 7 Jahrzehnte (Nutzungsdauer der Gebäude, bis das Altholz wieder verbrennt wird) zusätzlich 0.1 Mio t CO₂ pro Jahr abgeschieden werden. Vermutlich könnte so auch der Einsatz von Zement reduziert werden, womit die Nutzung von Bündner Holz als Bauholz doppelt interessant wäre.

Die damit realisierbaren Einsparungen an Beton, respektive Zement und damit CO₂ sind anspruchsvoll zu beziffern, da Werte in der Literatur stark schwanken und von der Betrachtung des Lebenszyklusdauer abhängen. Zudem lässt sich weder aus Volumen noch aus Gewicht direkt ein Faktor errechnen, wie viel Material ersetzt wird, da sich die Bauweisen unterscheiden, Teile des Hauses dennoch mit Beton gebaut werden müssen, die statischen Möglichkeiten der Materialien sich deutlich unterscheiden und im Beton auch noch Kies und Sand sowie meist Stahl für die Armierung enthalten ist. Eine grobe Überschlagsrechnung zeigt dennoch die ungefähre Grössenordnung: Nimmt man an, dass Holz eine Dichte von 500 kg/m³ aufweist, ist mit 50'000 Tonnen Material zu rechnen. Nimmt man an, dass Holz halb so viel Material benötigt wie Beton (Berücksichtigung Dichteunterschiede), können 100'000 Tonnen Beton eingespart werden. Beton beinhaltet in der Grössenordnung von 15 Massenprozenten Zement. Entsprechend würden 15'000 Tonnen Zement eingespart. Diese wiederum verursachen einen CO₂-Ausstoss von ungefähr 0.01 Mio. t pro Jahr. Zu berücksichtigen wären weiter die eingesparten Emissionen aus der Produktion des Baustahls und dem Abbau von Kies und Sand.

Info-Box: Climeworks

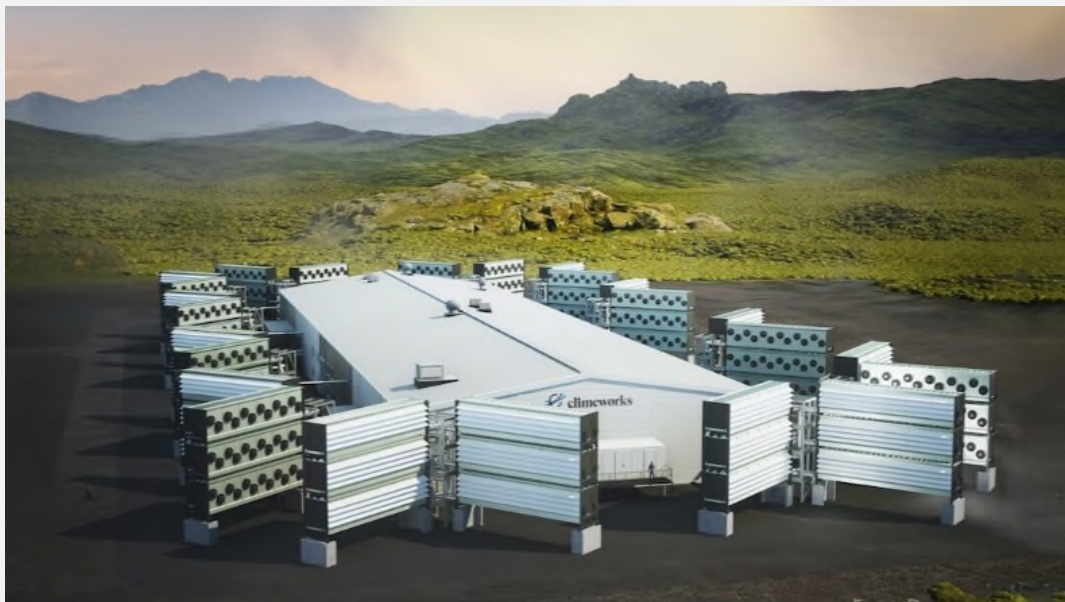
Climeworks ist ein 2009 als Spin-off der ETH Zürich gegründetes, Schweizer Unternehmen, das CO₂ aus der Umgebungsluft filtert. 2017 nahm das Unternehmen das weltweit erste, kommerzielle Projekt in Betrieb und konnte so 900 Tonnen CO₂ pro Jahr absaugen und einem Gewächshaus als Dünger verkaufen. Die Anlage stand in unmittelbarer Nähe der Kehrichtverbrennung Hinwil im Zürcher Oberland und nutzte entsprechend dessen Abwärme als Prozesswärme. Ebenfalls 2017 konnte in Island eine Demo-Anlage in Betrieb genommen werden, in welcher abgeschiedenes CO₂ zusammen mit Wasser mineralisiert und im Boden eingelagert (CO₂-to-stone) wird. 2021 konnte in Island mit dem Projekt ORCA eine Anlage in Betrieb genommen werden, die 4'000 Tonnen CO₂ pro Jahr absorbiert und rund CHF 15 Mio. kostete. Seit diesem Jahr befindet sich ein weiteres, deutlich grösseres

²⁵ Für ein erstes Projekt zur Abscheidung von CO₂ in einer KVA wurde die Anlage in Bilten (GL) ausserkoren.

²⁶ Es wird angenommen, dass das Holz in der Schweiz über die Fläche gleichverteilt ist. Aufgrund des hohen Anteils an Nadelwäldern wird jedoch ein Abzug von 10% vorgenommen.

Projekt 'Mammoth' im Bau, das ab 2024 36'000 Tonnen CO₂ (6% der jährlichen in GR abzuschneidenden CO₂-Emissionen) der Atmosphäre entziehen und einlagern soll. Aktuell kostet die Abscheidung einer Tonne CO₂ bei climeworks etwa CHF 1'000. Bis zum Ende des Jahrzehnts sind Kosten von CHF 250 zu erwarten. Dies würde für die Abscheidung aller CO₂-Emissionen in Graubünden einen Betrag von CHF 500 Mio. erfordern. Das Verfahren bleibt entsprechend teuer.²⁷

Neueste Anlage von Climeworks mit einer Kapazität von 36'000 t CO₂/a (GR bräuchte 16 solcher Anlagen)



3.8 Zusätzlicher Elektrizitätsbedarf für Dekarbonisierung

Bis zu 1.1 – 2.4 TWh/a
Strommehrbedarf

Selbstverständlich kann heute niemand den tatsächlichen Strombedarf der Zukunft voraussehen. Denn dieser ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, die heute nicht absehbar sind: Beispielsweise können technologische Durchbrüche bei Energieproduktion, Speicherung und Verbrauch den Bedarf komplett verändern. Diese Durchbrüche erachten wir als sehr wahrscheinlich, aber es kaum abschätzbar zu welchem Zeitpunkt sie sich ergeben. Weiter kommt es stark darauf an, wie die internationale Energielogistik nach der Dekarbonisierung aussieht. Beispielsweise könnte es sein, dass in der Wüste produzierter Solarstrom oder Wasserstoff in grossen Mengen und günstig nach Europa transportiert wird, weshalb sich eine entsprechende Produktion vor Ort erübrigt und eine Strategie des Energieimports sinnvoll wird.

Unsere Einschätzungen zum Strombedarf und zur notwendigen Stromproduktion gehen davon aus, dass wir - territorial gesehen - unseren Strommehrbedarf auch mit eigener Strommehrproduktion decken müssen. So gesehen handelt es sich eher um Maximalüberlegungen. Dies hilft uns, die Dimension der Herausforderung gut zu verstehen. Ausgehend von diesen Maximalüberlegungen können wir mit Szenarien arbeiten.

Für unsere Abschätzung des Strommehrbedarfs sind wir von folgenden groben Annahmen ausgegangen:

- Das **Verkehrsaufkommen** sowie der Energieaufwand für Kühlung und Heizung der Fahrzeuge wird stabil bleiben. Die Fahrzeugflotte (PKW, LKW) wird weitgehend auf Batteriebasis elektrifiziert. Den Mehrbedarf für Methanisierung und Wasserstoff für

²⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/Climeworks> und <https://www.cleantalking.de/climeworks-direct-air-capture-grundstein-mammoth-island/> und <https://www.basichthinking.de/blog/2022/07/04/co2-filteranlage-climeworks-island/>

LKW, Baumaschinen und Pistenfahrzeuge, die vermutlich nicht mit Batterie betrieben werden, haben wir vernachlässigt.

- **Heizwärme und Warmwasser im Gebäudepark** werden weitgehend über Wärmepumpen sichergestellt. Holzfeuerungen werden nur unwesentlich ausgebaut bzw. hauptsächlich für industrielle Prozesse eingesetzt. In dicht bebauten Gebieten wie die Stadt Chur werden Fernwärmesysteme umgesetzt. Rund 30% der Energie in den Gebäuden wird durch bessere Isolierung eingespart.
- Die **industrielle Prozesswärme** wird über erneuerbare Energieträger bereitgestellt. Hier spielen Holz und Fernwärme eine wesentliche Rolle. Wir haben angenommen, dass 30% der Energie künftig mit Biomasse/Fernwärme gedeckt, 30% eingespart werden und der Rest durch eine höhere Energieeffizienz als heute zur Verfügung gestellt werden kann.
- Der Energiemehrbedarf für die **Abscheidung von 1 Tonne CO₂** wird heute mit 0.1 MWh Strom und 1 MWh thermische Energie angegeben (Aminowäsche-Verfahren).²⁸ Es stellt sich insbesondere die Frage, ob die thermische Energie künftig bei der Abfallverbrennung konkurrenzlos genutzt werden oder ob sie bereits anderweitig genutzt wird. Wir haben vorsichtshalber mit 1.1 MWh Energieeinsatz gleichmässig während dem ganzen Jahr gerechnet.²⁹ Weil voraussichtlich die Abscheidung bei der KVA und dem Zementwerk Untervaz technisch am sinnvollsten wäre (hohe CO₂-Konzentration & Verfügbarkeit von Wärme), muss die Abscheidung zeitlich dann stattfinden, wenn die Anlagen in Betrieb sind.
- Auch der **geplante Ausstieg aus der Kernkraft** erfordert zusätzliche Elektrizität aus neuen erneuerbaren Quellen. Wir haben angenommen, dass Graubünden gemäss dem Bevölkerungsanteil in der Schweiz auch einen Anteil an den Ausstieg aus der Kernkraft beisteuern muss.
- Wir gehen davon aus, dass auch künftig die **bestehende Wasserkraft** in Graubünden in gleichem Ausmass und in mindestens gleicher Menge im Winter zur Verfügung steht wie heute. Klimatisch ist mit trockeneren Sommern und nasserem Wintern zu rechnen. Die Schneeschmelze dürfte saisonal früher einsetzen als heute, weshalb wir davon ausgehen, dass im Winter eher bessere Produktionsbedingungen herrschen werden als im Sommer. Umgekehrt stellt sich die Frage des Gesamtwasseraufkommens im Sommer und ob die Stauseen im Herbst genügend gefüllt werden können. Den Wegfall der Stromproduktion aus Wasserkraft infolge der Restwassersanierungen haben wir vernachlässigt. Dies insbesondere auch weil die exportierte Wasserkraft in unseren Überlegungen als Solidaritätsanteil an die Stromversorgung der Schweiz betrachtet wird.
- Auf ein **Wachstum von Bevölkerung und Wirtschaft** in Graubünden haben wir in unserer Schätzung verzichtet. Einerseits um die Komplexität und Verständlichkeit unseres Szenarios einfach zu halten. Andererseits haben wir jedoch auch Einspareffekte durch technologische Durchbrüche sehr zurückhaltend eingerechnet. Es ist durchaus denkbar, dass solche Einspareffekte das weitere Wachstum kompensieren könnten.

Wird der Strombedarf der vorangehenden Kapiteln unter obenstehenden Annahmen addiert, ergibt sich in der Summe ein **Mehrbedarf von bis zu 2.4 TWh elektrische Energie pro Jahr** (vgl. Abbildung 17). Damit könnte Graubünden komplett dekarbonisiert und gleichzeitig aus der Kernkraft ausgestiegen werden.

In unserer Schätzung ist der **Ausstieg aus der Kernenergie sowie die CO₂-Abscheidung** eingerechnet. Ohne diese beiden Elemente ergäbe sich ein Strommehrbedarf von 1.1 TWh. Bei der CO₂-Abscheidung haben wir den Gesamtenergiebedarf von Wärme und Strom als Strombedarf dargestellt. Mit Optimierungen und Wärmerückgewinnung, dürfte der Energieaufwand für die CO₂-Abscheidung bei KVA/Zementwerk nach der

²⁸ KVA Linth (2020): CO₂-Abscheidung und -Speicherung: Chance für den Klimaschutz

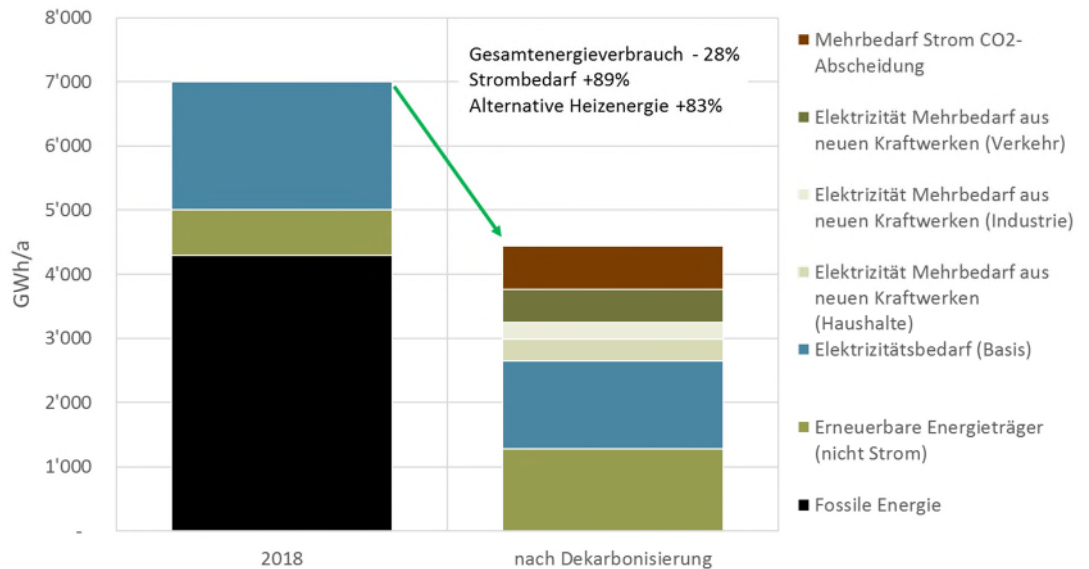
²⁹ Theoretisch denkbar wäre allenfalls, dass künftig das CO₂ nur im Sommer abgeschieden würde, wenn günstige Energie zur Verfügung steht. Dies hätte insbesondere einen Effekt auf die notwendige installierte Leistung im Winter.

Technologieausreifung tendenziell sinken. Unsere Berechnungen stellen damit einen sehr konservativen Maximalwert dar.

Abbildung 17

Grobe Schätzung des Gesamtenergiebedarfs Graubünden nach Dekarbonisierung (Staats Quo, ohne Wachstum)

		Sommer	Winter	Jahr
Elektrifizierung Verkehr Annahme: Heutiger Energiebedarf Treibstoffe, 35% Wirkungsgrad Benzin/Diesel, in GWh Strom bei Wirkungsgrad 90% Batterie, 20% Rekuperation.	GWh	257	257	513
Elektrifizierung Heizung & Warmwasser in Gebäude Annahme: Heutiger Energiebedarf HH / 80% Wirkungsgrad ersetzt mit Wärmepumpen mit 1:3 Wirkung (2/3 Winter) und 30% Reduktion Energieverbrauch	GWh	111	221	332
Elektrifizierung industrielle Prozesswärme Annahme: Heutiger Energiebedarf Industrie / 80% Wirkungsgrad ersetzt zu 30% mit Holz/Abfall und 30% Reduktion Energieverbrauch	GWh	131	131	263
Zusätzlicher Strombedarf in Graubünden (ohne Ausstieg KKW und CCS)	GWh	499	609	1'108
Ausstieg Kernkraft Annahme: Anteilsmässiger Konsum GR	GWh	187	443	630
Abscheidung CO ₂ Annahme: 0.1 MWh pro 1 T CO ₂ bei 618 T CO ₂ (0.1 MWh Strom+1 MWh thermisch)	GWh	340	340	680
Zusätzlicher Strombedarf in Graubünden	GWh	1'026	1'392	2'418



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Bei einem Elektrizitätsverbrauch von heute rund 2 TWh pro Jahr bedeutet dies einen Anstieg von 55-120%. Nicht einkalkuliert sind weitere Senkungen des heute benötigten Elektrizitätsbedarfs durch Effizienzinsparungen. Es ist davon auszugehen, dass diese nicht unerheblich sind. Der Anstieg des Elektrizitätsverbrauchs ist zudem in Relation zu sehen. Denn heute werden fossile Energieträger in der Grössenordnung von knapp 4.3 TWh pro Jahr verbraucht. Der Gesamtenergiebedarf von Graubünden liegt heute nach unserer Recherche bei rund 7 TWh.³⁰ Aufgrund des deutlich höheren Wirkungsgrads von Strom und elektrischen Motoren als Energieträger würde künftig der Gesamtenergiebedarf trotz Erhöhung des

³⁰ Je nach verwendeten Quellen kommt man auf einem unterschiedlichen Gesamtenergiebedarf für GR. Das ANU kommt im Bericht zu Aktionsplan Green Deal auf einen Gesamtbedarf von 6.5 TWh. Wenn man die Statistiken des AEV zu den importierten fossilen Energieträgern nutzt, scheint auch ein Gesamtenergiebedarf von 8 TWh denkbar. Wir verwenden unsere eigene Schätzung, da wir diese auch mit den für die Schweiz geltenden Werten verifiziert haben.

Strombedarfs insgesamt um grob geschätzt 3 TWh sinken. Das Dekarbonisieren von Graubünden ist entsprechend auch sehr energiesparend. Als attraktiver Nebeneffekt bleibt das Geld für die Energieproduktion nach der Dekarbonisierung im Kanton, statt dass es für die fossilen Energien zu grossen Teilen ins Ausland abfließt.

Zentrale Erkenntnisse für die Reduktion der CO₂-Emissionen

1. Fossile Energie durch Elektrizität ersetzen, spart generell Energie. Der Elektrizitätsverbrauch steigt jedoch entsprechend an.
2. Wir gehen davon aus, dass die Energie für Verkehr und Gebäude komplett elektrifiziert werden kann.
3. Landwirtschaft, Entsorgung und Industrie werden nicht vollständig dekarbonisieren können, weshalb ein CO₂-Ausstoss von 0.7 Mio. t CO₂ (35% der heutigen Emissionen) künftig abzuscheiden ist.

4 Deckung des Strommehrbedarfs

4.1 Winter- vs. Sommerstrom

Bedarf an Winterstrom ist grosse Herausforderung in GR

Das vorige Kapitel zeigt, dass die Vision von Netto-Null mehr Elektrizität aus neuen erneuerbaren Quellen (NEE) benötigt. Unter der Annahme, dass die zusätzlich benötigte Elektrizität nicht von der bereits heute exportierten Wasserkraft abgezogen und auch nicht importiert werden soll, muss dieser zusätzliche Strom aus zusätzlichen erneuerbaren Quellen hergestellt werden.

Weil Elektrizität nicht ein direkt lagerbares Gut ist, muss stets genau so viel Strom produziert werden, wie verbraucht wird. Damit spielt auch die Synchronisierung der Zeitpunkte der Herstellung und des Verbrauchs eine entscheidende Rolle.

Der Stromverbrauch wird zukünftig im Winter höher sein als im Sommer, weil mit zunehmender Elektrifizierung der Gebäudetechnik mehr Strom für die Warmwasseraufbereitung und die Heizung benötigt wird. Diese beiden Verbraucher sind im Winter selbstredend grösser als im Sommer, während beispielsweise in der Mobilität der Stromverbrauch über das Jahr mehr oder weniger gleichverteilt ist. Der Winter ist aber in der Produktion erneuerbarer Energien, insbesondere Solarkraft anspruchsvoller: Die Tage sind weniger lang und Sonnenlicht fällt in einem flacheren Winkel auf die Erde. Derweil fällt weniger Niederschlag als im Sommer an und dies oft als Schnee, der bis zur Schmelze nicht nutzbar ist.³¹ Wird über die Stromproduktion gesprochen, ist somit immer die Leistung (in MW) und die Energie (in GWh) gemeinsam zu bedenken: Eine hohe Produktion im Sommer wird wenig bringen, solange die Energie im Winter gebraucht wird.

Der unterschiedliche Zeitpunkt des Bedarfs und der Herstellung von Strom kann durch verschiedene Speicherlösungen überbrückt werden. Vorhandene Speicher werden unterteilt in Saisonspeicher (grosse Stauseen), Wochenspeicher (kleine Stauseen) und Tagesspeicher. Saisonspeicher wie beispielsweise der Stausee Zervreila oder die Seen Santa Maria, Curnera und Nalps sind dafür ausgelegt, dass sie das im Sommer anfallende Wasser speichern, damit es im Winter genutzt werden kann. Das Kleinwasserkraftwerk Taschinas im Prättigau als Gegenbeispiel, kann bei geringem Wasseranfall im Winter das Wasser während einigen Stunden speichern und dann verarbeiten, wenn der Leistungsbedarf hoch ist und dient in dieser Zeit als Tagesspeicher. Mit anderen Speichermedien als Wasser sind im grossen Stil aktuell bestenfalls Tagesspeicher möglich. Insgesamt verfügt Graubünden über eine Speicherkapazität in den Stauseen von knapp 2 TWh.³²

Mit verschiedenen Massnahmen wie der Erhöhung von Staumauern oder der Anpassung des Aufstellwinkels von Solarpanelen oder dem Zubau von Windkraft kann diesen Herausforderungen begegnet werden. Nicht zu vergessen ist zudem, dass Energiequellen mit stark schwankender Produktion die Netze mehr belasten können, denn oft wird Strom nicht am selben Ort hergestellt wie verbraucht.

Wir stellen die verschiedenen erneuerbaren Energien mit Vor- und Nachteilen vor und prüfen deren Ausbaumöglichkeiten in Graubünden und zeigen zum Schluss, wie ein möglicher Mix des Zubaus aussehen könnte.

4.2 Potenzial des Stromimports

In unserer Abschätzung des Mehrbedarfs an erneuerbarer Elektrizität in Graubünden sind wir davon ausgegangen, dass kein zusätzlicher Stromimport möglich ist. Wir gehen von dieser Annahme aus, weil auch die Schweiz die gleichen Herausforderungen hat wie Graubünden.

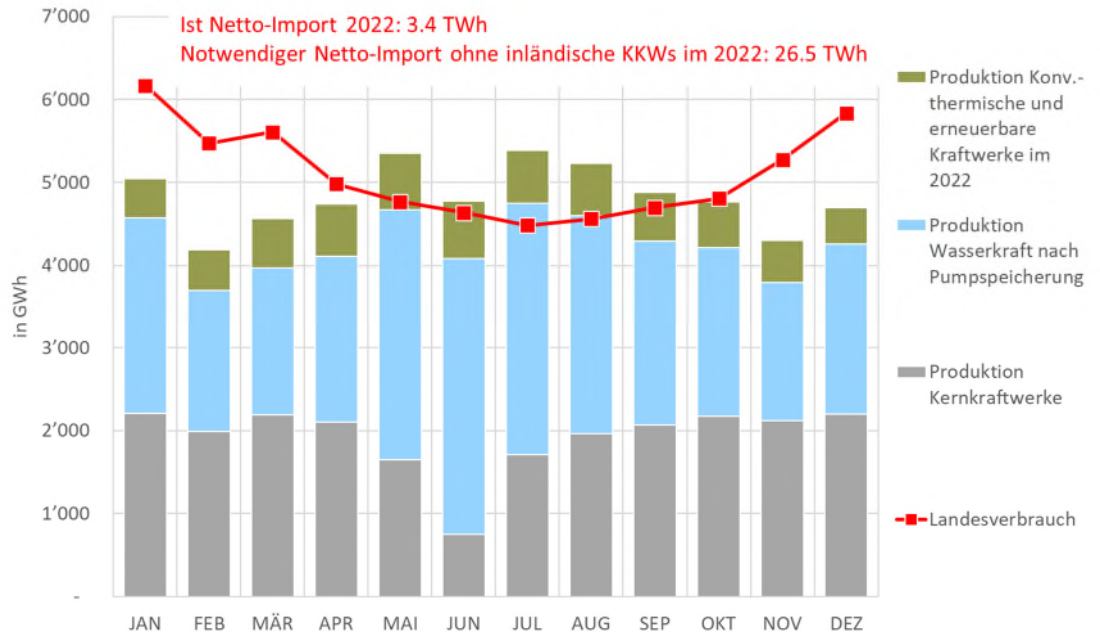
³¹ Das bringt auch gewisse Vorteile mit sich, weil damit ein Teil der Niederschläge ohne menschliche Hilfe gespeichert wird.

³² https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/storymaps/AP_FuellungsgradSpeicherseen/?lang=de

Wenn die Schweiz das Netto-Null-Ziel erreichen und gleichzeitig aus der Kernkraft aussteigen will, muss sie entweder Solar- und Windenergie im grossen Stil zubauen oder erneuerbaren Strom importieren. Ein einfacher Vergleich zeigt, dass wenn die Schweiz heute aus der Kernkraft aussteigen würde, rund 26 TWh Strom mehrheitlich im Winterhalbjahr importiert werden müssten.

Abbildung 18

Elektrizitätsstatistik Schweiz im Jahr 2022



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf Elektrizitätsstatistik des Bundes

Um den Ausstieg aus der Kernkraft mit erneuerbaren Energien in der Schweiz zu kompensieren, braucht es einen nationalen Effort. Der Bund geht im ZERO Basis Szenario von einem Landesverbrauch von rund 85 TWh (+ ca. 30%) im Jahre 2050 aus. Sofern der Flugverkehr ausgeklammert wird, scheint dies eine plausible Grösse zu sein.

In der Schweiz werden jedoch 1.8 Mio. Tonnen Kerosin derzeit jährlich im Luftverkehr abgefüllt (entspricht rund 5.7 Mio. t CO₂, knapp 3x CO₂-Ausstoss Kanton GR). Wenn man dieses Kerosin mit SAF (sustainable aviation fuel) ersetzen will, müsste man zusätzlich (1.8 Mio. t * 37 MWh³³) 66 TWh Strom einsetzen (in etwa gesamter heutiger Landesverbrauch der Schweiz).

Mit einem Solarenergiepotenzial auf den Schweizer Dächern von 50 TWh³⁴ und ein Potenzial von 9 TWh Windstrom³⁵ besteht im Inland ein erhebliches Produktionspotenzial. Wenn man davon ausgeht, dass die Schweiz das Solar- und Windpotenzial vollständig ausschöpft und die Wasserspeicherprojekte des 'Runden Tisches' realisiert, bräuchte es übers Jahr gesehen keine Strom-Nettoimporte bis 2050 mehr. Dennoch müsste in der Winterzeit ein Import von 9.8 TWh stattfinden. Es stellt sich deshalb die Frage, wie der zu erwartende Stromproduktionsüberschuss im Sommer von 17.3 TWh in den Winter verlagert werden könnte. Denkbar sind insbesondere Power-to-Gas-Lösungen.

³³ Aktuell sind zur Produktion eines Liters E-Diesel 27,3 Kilowattstunden (kWh) Strom notwendig, hat die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik errechnet.

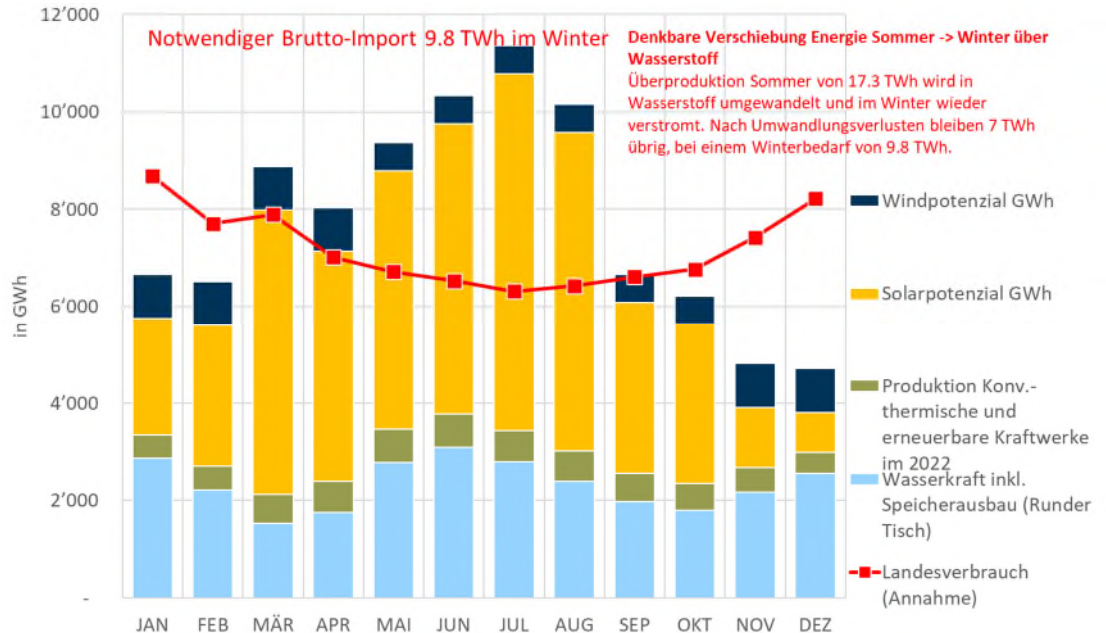
³⁴ <https://www.swissolar.ch/services/medien/news/detail/n-n/bfe-studie-schweizer-solarpotenzial-groesser-als-benoe-tigt/#:~:text=Das%20aussch%C3%B6pfbare%20Solarstrom%2DPotenzial%20auf,Prozent%20des%20Stromverbrauchs%20der%20Schweiz.>

³⁵ <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-90116.html>

In den Energieperspektiven kommt der Bund zu ähnlichen Grössenordnungen. Er geht davon aus, dass der Stromimport im Winter primär mit Windkraft erfolgt und ‘gewährleistet’ sein wird.³⁶ Dies gilt unserer Meinung nach jedoch nur, wenn das Flugbenzin künftig weiterhin – wenn auch als SAF – importiert wird.

Abbildung 19

Mögliche Elektrizitätsstatistik im 2050 aufgrund heute diskutierter Szenarien



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf verschiedenen Grundlagenstudien

Eine vollständige Dekarbonisierung der Schweiz mit gleichzeitigem Ausstieg aus der Kernkraft setzt voraus, dass das inländische Potenzial von Solar- und Windstrom vollständig ausgeschöpft wird und in Europa genügend importierbare Energie aus erneuerbaren Quellen verfügbar ist bzw. sich das inländische Solarproduktionspotenzial durch technische Entwicklungen wesentlich ausgedehnt werden kann.

4.3 Potenzial Kernkraft

Situation in der Schweiz

Gesamtschweizerisch trug die Kernkraft 2021 29 % der elektrischen Energieproduktion bei³⁷. Dazu sind heute vier Kernkraftwerke (KKW) an drei Standorten im Einsatz:

- Leibstadt (Leistung 1.2 GW, Energie ca. 9 TWh pro Jahr),
- Gösgen (Leistung 1 GW, Energie ca. 8 TWh pro Jahr),
- Beznau I und II (Leistung je 0.4 GW, Energie ca. 6 TWh pro Jahr).
- Das KKW Mühleberg wurde im 2019 vom Netz genommen und das Areal wird nach dem Rückbau ab 2034 für neue Nutzungen zur Verfügung stehen.

Die verbliebenen vier Anlagen wurden zwischen 1969 und 1984 in Betrieb gesetzt. Mit Ausnahme von Leibstadt, einem Siedewasserreaktor, handelt es sich bei den anderen um Druckwasserreaktoren. Beznau I ist eines der ältesten noch in Betrieb stehenden KKW der Welt. In allen Fällen handelt es sich um Anlagen der 2. Generation, die ursprünglich für 30 – 40 Jahre Nutzungsdauer konzipiert wurden. In der Schweiz bestehen derzeit keine fixen Abschaltzeiten für die bestehenden KKW und Laufzeiten von 50 – 60 Jahre sind denkbar. Das BFE geht davon

³⁶ Bundesamt für Energie (2020): Energieperspektiven 2050+, Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.

³⁷ Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2021

aus, dass nach sechzig Jahren keine Möglichkeit mehr besteht, ein KKW weiter zu betreiben, zumal weltweit keine Erfahrungen dazu bestehen. Zwischen 2029 und 2044 würden somit alle Anlagen vom Netz gehen. Gesetzlich ist allerdings im Energiegesetz seit 2018 geregelt, dass keine neuen KKW mehr gebaut werden dürfen.

Situation weltweit

Die KKW haben sich weltweit dennoch weiterentwickelt: Die 3. Generation brachte einige Sicherheits- und Effizienzsteigerungen. Heute forscht die 'Organisation Generation IV International Forum',³⁸ bei welcher die Schweiz Mitglied ist, an Kraftwerken der 4. Generation. Vor 2030 ist weltweit nicht mit einem Einsatz dieser neuartigen Anlagen zu rechnen.

Kernenergie trägt rund zehn Prozent zur weltweiten Stromproduktion bei. Ende 2022 umfasste der Kernkraftwerkpark 438 Reaktoren in 33 Ländern. In der Europäischen Union beträgt der nukleare Anteil 25 Prozent. Anders als in der Schweiz und in Deutschland, investieren die meisten Kernenergieländer weiterhin in diese Technologie. So standen Ende 2022 weltweit 57 Kernkraftwerke in Bau und gut 100 weitere sind geplant.³⁹

Situation in Europa

In Europa ist Ende 2021 im finnischen Olkiluoto das fünfte Kernkraftwerk (EPR 3. Generation) des Landes in Betrieb gegangen und ein weiteres ist geplant. Das Land will damit seine Abhängigkeit von russischen Stromlieferungen verkleinern. Ein weiterer EPR der 3. Generation steht in Europa seit Ende 2007 in Frankreich am Standort Flamanville in der Normandie in Bau und soll 2023 die Stromproduktion aufnehmen.

Grossbritannien plant gegenwärtig den Bau von gut 16 GW neuer nuklearer Kapazität an acht bereits definierten Standorten. Damit würde das Königreich den Atomstromanteil von heute rund 20 Prozent auf über 40 Prozent verdoppeln. Dies ausdrücklich, um die Abhängigkeit von fossilen Energien und deren klimaschädigenden Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Am weitesten fortgeschritten ist das Bauprojekt vom Hinkley Point im Süden Englands, wo zwei Reaktoren vom Typ EPR gebaut werden sollen.

Auch mehrere mittel- und osteuropäische Länder setzen auf Kernenergie. Sie wollen ihre Abhängigkeit von Kohle und Erdgasimporten verringern oder ihre bestehenden Kernkraftwerke durch neue, moderne Anlagen ersetzen. So sind in der Slowakei gegenwärtig zwei Reaktorblöcke fertiggestellt worden, deren Bau anfangs der 1990er Jahre begonnen hatte. Rumänien nahm im Jahr 2007 sein jüngstes Kernkraftwerk in Betrieb (Cernavoda-2, ein kanadischer Candu-Schwerwasserreaktor). Das Land plant, zwei Einheiten desselben Typs mit chinesischer Unterstützung in den nächsten Jahren zu bauen. Polen will mit dem amerikanischen Partner Westinghouse sechs Blöcke bauen. Ernsthaft geprüft wird der Neubau von Kernkraftwerken in Bulgarien, Tschechien, Litauen, aber auch in Schweden und den Niederlanden, wo zwei neue Reaktoren am bestehenden Standort in Borssele vorgesehen sind. Auch Ungarn will neue Kernkraftwerke bauen. Es hat deshalb mit Russland 2014 ein Abkommen zum Bau von zwei Blöcken abgeschlossen.

Schlussfolgerungen für die Schweiz und Graubünden

Aufgrund der aktuellen Annahmen wird es für die Schweiz sehr herausfordernd, den künftigen Strombedarf nur aus erneuerbaren nicht fossilen Quellen zu decken. Insbesondere die Winterstromnachfrage wird zur Herausforderung.

Aufgrund von technologischen Entwicklungen bei den Solarzellen und bei Speichermöglichkeiten ist aber nicht ausgeschlossen, dass die Herausforderungen gelöst werden. Besonders

³⁸ <https://www.gen-4.org/gif/>

³⁹ https://www.kernenergie.ch/de/kernenergie-weltweit_content---1--1071.html

schwierig wird sein, auch den Strom für die CO₂-Abscheidung und für die Herstellung des benötigten Flugbenzins im Inland zu erzeugen. Hier bestehen aber allenfalls auch internationale Kooperationsmöglichkeiten. Eine andere Strategie kann sein, dass die Schweiz künftig teilweise auf eigenen oder importierten Kernkraftstrom setzt.

Aus Sicht Graubündens spielen diese Überlegungen insofern eine Rolle als, je mehr internationale Kooperation zur Verfügung steht, desto weniger Landschaft müsste für Solar- und Windpärke eingesetzt werden.

4.4 Potenzial der Wasserkraft

Wasserkraft bietet grosse Leistungen und hat Speicherpotenzial.

Im Kanton Graubünden sind bereits viele technisch und wirtschaftlich günstige Potenziale der Wasserkraft ausgenutzt. Gemäss Richtplan des Kantons Graubünden wird der weitere Ausbau der Wasserkraftproduktion von 880 GWh (inkl. Ausleitwerke Rothenbrunnen, Mastrils und Bonaduz) pro Jahr angestrebt. Wenn man die dazu notwendigen Projekte betrachtet, erscheint dieses Ziel sehr ambitioniert und vermutlich nicht in den nächsten Jahrzehnten realistisch. Aktuell sind drei grössere Projekte aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht denkbar, die zusätzlichen Strom generieren:

- das Kraftwerk Chlus (220 GWh/Jahr) und
- das Kraftwerk Pradapunt (81 GWh/Jahr).
- die Überleitung Lugnez (80 GWh/Jahr),

Da es sich im Wesentlichen um Laufkraftwerke handelt,⁴⁰ ist davon auszugehen, dass ungefähr 60% des Stroms im Sommer (April bis September) und 40% im Winter (Oktober bis März) produziert werden. Das Projekt Chlus will die Repower nun umsetzen und bis 2032 fertigstellen. Diesem Ausbau steht jedoch die erwartete Produktionssenkung infolge der Neukonzessionierungen und damit geltenden höheren Restwasseranforderungen von geschätzt 480 GWh bezogen auf den ganzen Kanton Graubünden gegenüber.

Zusätzlich zum Ausbau der Stromproduktion bestehen Projekte zur Transferierung von Sommer- in Winterstrom durch die Erhöhung der Staumauern. Am runden Tisch Wasserkraft⁴¹ wurden zwei Projekte im Kanton Graubünden aufgenommen und im Richtplan soll das Projekt Zervreila festgesetzt werden. Damit ergäbe sich eine Verlagerung von insgesamt ca. 200 GWh vom Sommer in den Winter.

- Nalps / Curnera (Verlagerung von 99 GWh)
- Marmorera (Verlagerung von 55 GWh)
- Zervreila (Verlagerung von 42 GWh)

Weiter besteht ein gesellschaftlicher Konsens, dass das Pumpspeicherwerk Lago Bianco mit einer Leistung von rund 1 GW gebaut werden kann. Dass dieses Projekt bisher nicht gestartet wurde, liegt nicht an Bewilligungsfragen, sondern an der derzeit mangelnden Rentabilitätserwartung aufgrund der heute geltenden Marktordnung und -gegebenheiten.

⁴⁰ Im Fall der Überleitung Lugnez ist mit dem Stausee Zervreila wohl eine Speichermöglichkeit vorhanden. Dieser See wird jedoch bereits heute mehr als einmal pro Jahr gefüllt, womit ohne zusätzliche Speicherkapazität (bspw. durch Staumauererhöhung) keine grössere zusätzliche Umlagerung in den Winter möglich ist.

⁴¹ Gemeinsame Erklärung des Runden Tisches Wasserkraft, Bern, 13.12.2021

Info-Box: Das Projekt Lago Bianco

Heute besteht dank zwei Staumauern am Berninapass der Lago Bianco mit einem Volumen von 18 Mio. m³ Wasser. Das Wasser wird in drei Stufen (Palü, Cavaglia und Robbia) turbiniert, wobei die oberste Stufe Palü auch als kleines Pumpspeicherwerk funktioniert.

Durch eine Erhöhung der Mauern um gut vier Meter, kann das Seevolumen des Lago Bianco um fast 50% auf 26 Mio. m³ vergrössert werden. Weiter soll eine neue Zentrale mit sechs Maschinengruppen am Lago di Poschiavo mit einer Gesamtleistung von 1'050 MW (~5% der gesamten in der Schweiz installierten Leistung in Wasser- und Atomkraft) entstehen, damit der bisherige Saison- neu als Wochenspeicher genutzt werden kann.



Heute kann bei Volllast ohne Zufluss der See etwa eineinhalb Monate ununterbrochen genutzt werden bis er leer ist, während das zukünftig etwa in einer halben Woche möglich wäre. Würde das Projekt realisiert, entstünde so eine grosse kurzzeitige Batterie, aber keine zusätzliche Speicherung von Winterenergie. Würde nur die Staumauer erhöht, würden mit den zusätzlichen 8 Mio. m³ Wasser ungefähr 26 GWh Energie in den Winter umgelagert.⁴²

Die Bedeutung des Winterstroms und die vielschichtigen Hürden beim Ausbau der Energieproduktion werden hingegen an einem anderen Projekt gut ersichtlich. Die Elektrizitätswerke Davos verfügten über eine Konzession für die Wasserkraftprojekte Flüelabach (inkl. bewilligtem Baugesuch), Glaris und Frauenkirch mit einem Potenzial von rund 22 GWh (nur Sommerstrom) und Investitionskosten von CHF 63 Mio. Die EWD gaben im 2021 dennoch den Verzicht auf dieses Projekt bekannt, da die reduzierten Subventionen für die Kleinwasserkraft und die schlechten Aussichten für den Wert des Sommerstroms ein zu hohes Risiko für die langfristige Rentabilität des Projekts darstellten. Sie wollen im Gegenzug die vorhandenen Mittel in klimawirksame Wärmeprojekte und in eine alpine PV-Anlage investieren, welche einen höheren Anteil an Winterstrom ermöglicht als die Wasserkraftprojekte.^{43 44}

⁴² <https://www.repower.com/gruppe/%C3%BCber-uns/unsere-anlagen/projekte/pumpspeicherwerk-lagobianco/#Projektidee>

⁴³ <https://www.suedostschweiz.ch/ereignisse/wasserkraft-nein-aber>

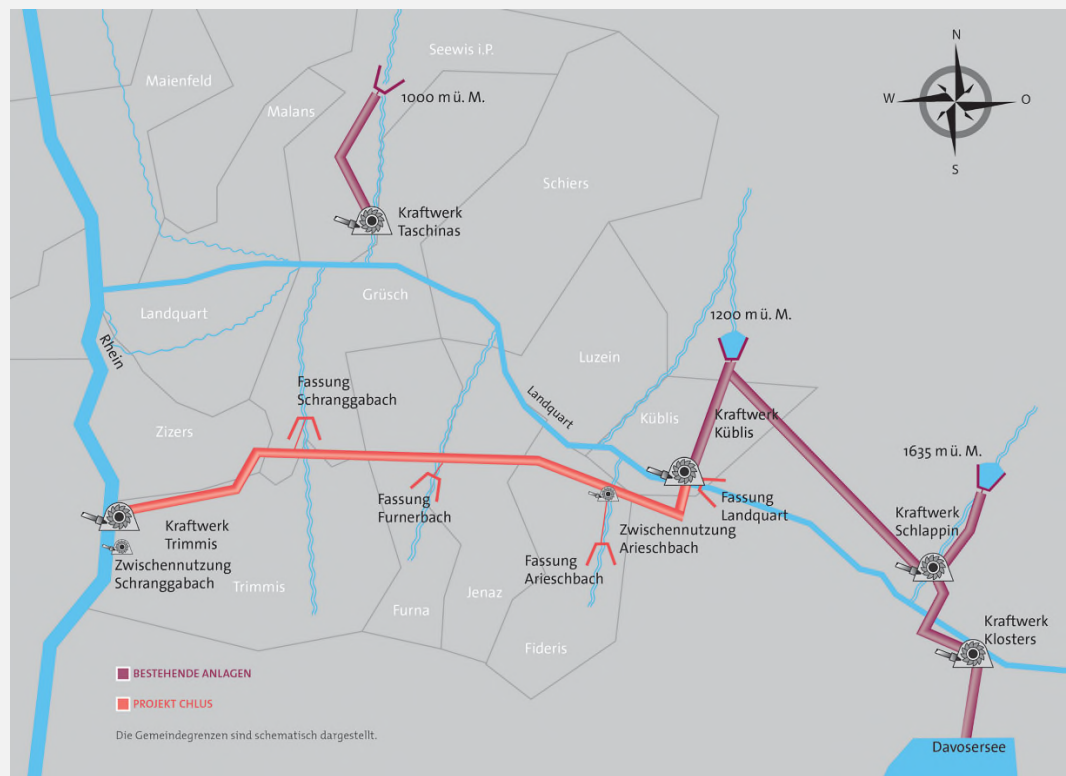
⁴⁴ https://www.suedostschweiz.ch/wirtschaft/davos-schubladisiert-vorerst-den-ausbau-der-wasserkraft?check_logged_in=1

Info-Box: Kraftwerk Chlus

Im erweiterten Einzugsgebiet der Landquart wird heute bereits an verschiedenen Orten elektrische Energie produziert: In Klosters aus dem Davosersee, in Schlappin, in Küblis und in Grüşch.

Zwischen Küblis und Landquart legt der Fluss eine relativ weite Strecke zurück, die mit einem Stollen direkt nach Trimmis abgekürzt werden kann. Das Kraftwerk ist seit vielen Jahren als Idee vorhanden und auch schon zu grossen Teilen geplant: Neben der Wasserfassung in Küblis sollen verschiedene Seitenbäche gefasst werden und mit einer Gesamtleistung von 62 Megawatt pro Jahr ca. 237 GWh Wasserstrom produziert werden. Es handelt sich um das grösste Vorhaben im Bereich der Wasserkraft von nationalem Interesse und verdoppelt die bisherige Wasserstromproduktion im Prättigau nahezu. Es ist mit Kosten von knapp CHF 400 Mio., teilweise subventioniert mit einem mittleren zweistelligen Millionenbetrag, zu rechnen und einer Bauzeit von vier bis fünf Jahren.

Aus ökologischer Sicht verbessert sich die Situation in der Landquart unterhalb Küblis, weil der bisherige Schwall-Sunk-Betrieb wegfällt. Aktuell ist mit einer Inbetriebnahme des Projektes im Jahr 2032 zu rechnen.



Quelle: Repower

4.5 Potenzial der Windkraft

Windkraft scheint im Vergleich zu PV (noch) auf wenig Akzeptanz zu stossen

Für die Nutzung des Windes zur Produktion von Elektrizität werden grosse Windräder aufgestellt, die über einen Generator elektrischen Strom produzieren. Der Wirkungsgrad liegt bei ungefähr 50% und ist weitgehend ausgereizt. Die Vorteile der Windkraft liegen im geringen Flächenverbrauch gegenüber Photovoltaik. Nachteilig wirkt die Abhängigkeit der meteorologischen Bedingungen, der Gefährdung von Vögeln und Fledermäusen und der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes.

Derzeit existiert im Kanton Graubünden eine einzige grössere Windkraftanlage im Rheintal bei Haldenstein, die 4.5 GWh Strom pro Jahr liefert und nachts jeweils in Rücksicht auf Fledermäuse abgestellt wird. Weitere Anlagen sind derzeit nicht in Planung. Eine 2022 vom Bund erschienene Studie kommt zum Schluss, dass im Kanton Graubünden ein technisch realisierbares Windkraftpotenzial von über 1'300 GWh pro Jahr vorhanden wäre.⁴⁵ Dazu wären gemäss deren Rechnungen zwischen 100 und 150 Anlagen mit einer Nabenhöhe zwischen 100 und 150 Metern notwendig. Es ist jedoch sehr fraglich, ob die gesellschaftliche Akzeptanz für solche Anlagen vorhanden ist. Mit der Verabschiedung des Dringlichen Gesetzes zur Beschleunigung von fortgeschrittenen Windparkprojekten und von grossen Vorhaben der Speicherwasserkraft hat das Parlament eine Möglichkeit geschaffen, die Bewilligungsverfahren und bestimmten Bedingungen zu beschleunigen.⁴⁶

Abbildung 20

Übersicht über Windkraftprioritäten A + B, C nur summarisch gemäss Richtplanvorschlag des Kantons Graubünden

Priorität	Standort	Energie in GWh/a	Anteile je Priorität
A	Dreibündenstein	70	9.5%
	Piz Sezner - Mundaun	68	9.2%
	Crap Sogn Gion	59	8.0%
	Rheintal Untervaz - Igis	58	7.8%
	Churer Alpen Arosa	56	7.6%
	Piz Martegnas	42	5.7%
	Reichenau	41	5.5%
	Alp Selva Vals	40	5.4%
	Oldis Ost & Oldis West	39	5.3%
	Piz Champatsch Scuol	38	5.1%
	Crap Ner	33	4.5%
	Landquart Ost	28	3.8%
	Jakobshorn	28	3.8%
	Wannaspitz Furna	28	3.8%
	Rheintal Maienfeld - Malans	26	3.5%
	Luzisteig	24	3.2%
	Camaner Alp Safiental	23	3.1%
	Bernina	23	3.1%
Salaas & Alp Bella	16	2.2%	
	Summe	740	
B	Heinzenberg	50	23.9%
	Munt da Lü	35	16.7%
	Fideriser Heuberge	34	16.3%
	Fil da Rueun	32	15.3%
	Calanda	29	13.9%
	Alp Lavoz	29	13.9%
		Summe	209

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden auf Basis der Steckbriefe Windkraft zum KRIP-E⁴⁷

⁴⁵ Windpotenzial Schweiz 2022, Schlussbericht vom 24. August 2022

⁴⁶ <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefte?AffairId=20220461>

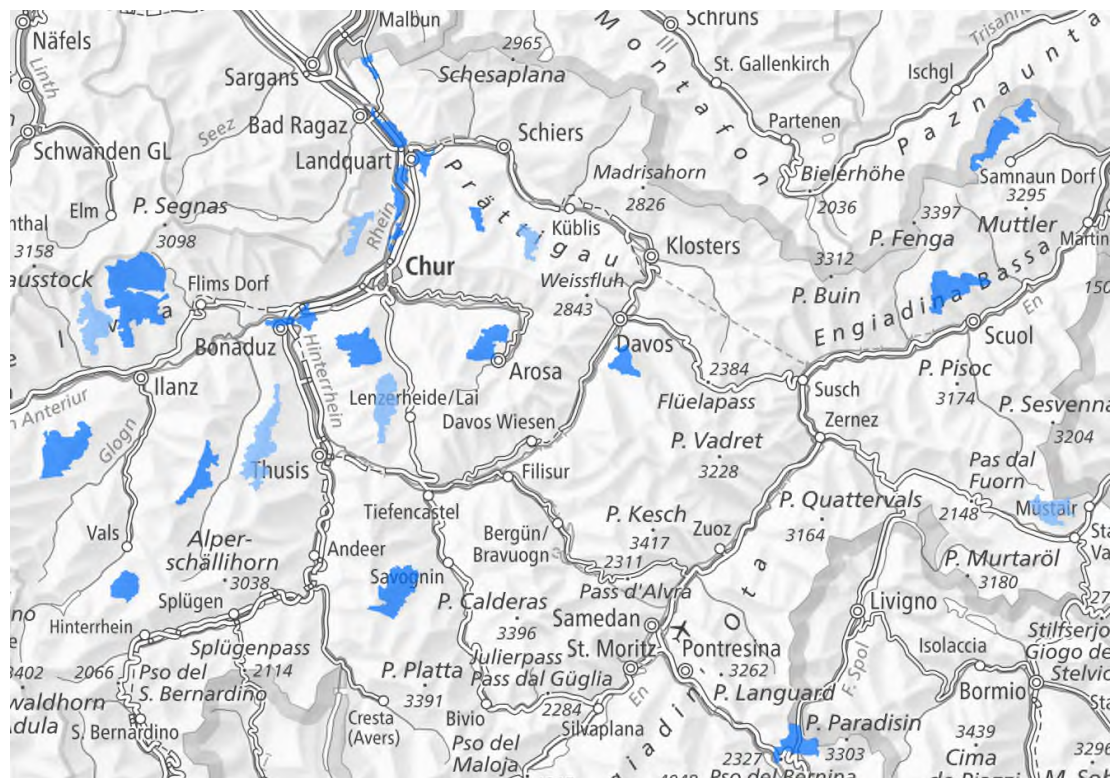
⁴⁷ Kantonaler Richtplan Graubünden, Anpassung Kapitel Energie (KRIP-E), Unterlagen der öffentlichen Auflage vom 12.04.2023

Der Kanton Graubünden stützt sich in seinem Richtplan zu grossen Teilen auf Werte des Bundes ab und zieht das «Konzept Windenergie» bei.⁴⁸ Dieser sieht für den Kanton Graubünden zwischen 260 und 640 GWh/a zusätzliche elektrische Energie aus Windkraft vor. Die letztjährige Potenzialstudie des Bundesamts für Energie sowie die kantonalen Grundlagen sehen einen realistischen Ausbau von **400 GWh/a**. Basierend auf diese Zielsetzung hat der Kanton Graubünden im Richtplan einen Vorschlag für die Festlegung von **25 Eignungsgebiete für Windparks in zwei Prioritäten** unterbreitet. Die Prioritäten A und B werden in den Richtplan aufgenommen. Standorte der Priorität B dürfen erst genutzt werden, wenn sich zeigt, dass die Standorte der Priorität A nicht genügen, um das gesetzte Ziel zu erreichen.

Grundsätzlich besteht mit diesen Eignungsgebieten ein interessantes Windkraftpotenzial. Die Erfahrungen in der Schweiz zeigen jedoch, dass Windpärke bisher politisch einen schweren Stand haben. Es dürfte auch in Graubünden nicht einfach sein, einen Teil dieser Windpärke zu realisieren. Beispielsweise wurde ein Projekt im zweitgrössten Eignungsgebiet (Piz Sezner – Mundaun) in der Priorität A der obigen Liste bereits an einer Volksabstimmung verworfen.

Abbildung 21

Eignungsgebiete für Windkraftanlagen gemäss Richtplanvorschlag des Kantons Graubünden



Quelle: Kantonaler Richtplan Graubünden Anpassung Kapitel Energie (KRIP-E)⁴⁹

⁴⁸ <https://www.are.admin.ch/are/de/home/raumentwicklung-und-raumplanung/strategie-und-planung/konzepte-und-sachplaene/konzepte/konzept-windenergie.html>

⁴⁹ Kantonaler Richtplan Graubünden, Anpassung Kapitel Energie (KRIP-E), Unterlagen der öffentlichen Auflage vom 12.04.2023

Info-Box: Windpark Lumnezia

Im Val Lumnezia liefen seit dem Jahr 2010 Planungsarbeiten für eine grosse Windkraftanlage im Bereich des Piz Seznar und des Um Su. Zum Schluss lag ein Projekt der altaventa ag in Zusammenarbeit mit der ewz vor, mit 18 Turbinen à gut 120 Metern Höhe und einer gesamten Energiemenge von 75 GWh pro Jahr. Das Projekt wird aktuell nicht weiterverfolgt, weil es von der Stimmbevölkerung 2019 abgelehnt wurde. Die folgende Visulaisierung zeigt, wie das Projekt hätte aussehen können.



Quelle: altaventa ag und ewz⁵⁰

4.6 Potenzial der Solarkraft

Hohes Potenzial der Solarkraft

Für die Nutzung der Sonne für die Stromproduktion wird Strahlungsenergie direkt in Solarzellen (meist aus Silicium) in Elektrizität umgewandelt. Solarzellen produzieren im Gegensatz zu Wind- und Wasserkraft Gleichspannung, die zuerst mit einem Wechselrichter in Wechselspannung gewandelt werden muss. Der Wirkungsgrad einer Solaranlage ist stark vom Anlagentyp abhängig und beläuft sich heute kommerziell auf gut 20%-25%.

Aktuelle Forschungsergebnisse mit Tandem- und Mehrfachzellen lassen eine Steigerung des Wirkungsgrades bei PV-Anlagen auf 35%-40% in den nächsten 5 – 10 Jahren erwarten. Dies würde die Effizienz von PV-Anlagen markant steigern.⁵¹ Die Nutzung der Solarenergie (PV) bringt tiefe Wartungskosten. Nachteilig wirken die hohen Investitionskosten, die eingeschränkte Planbarkeit der Energielieferung aufgrund des Wetters, die Inflexibilität der Anlage (keine Produktion in der Nacht) und der grosse Platzverbrauch. Letzteres fällt nicht ins Gewicht, wenn Flächen genutzt werden, die sowieso bereits anderweitig benötigt werden, wie beispielsweise Parkplätze, Autobahnen, Staumauern, Abwasserreinigungsanlagen (ARA) oder Dächer von Gebäuden.

Je höher eine Anlage über Meer liegt, desto besser ist aufgrund der stärkeren Strahlung der Sonne im Winter ihre Stromausbeutung: Mit gleichen Investitionskosten lässt sich entsprechend im Kanton Graubünden mehr Energie produzieren als beispielsweise im Mittelland. Aufgrund der meteorologischen Bedingungen scheint zudem die Sonne im Kanton Graubünden tendenziell länger als im Mittelland. Die kälteren Temperaturen wirken auch produktionsmehrend, da die Effizienz einer Solaranlage bei tieferen Temperaturen grösser ist. Ohne spezielle Ausrichtung der Panele wird aufgrund der Sonnenscheindauer etwa ein Drittel der Energie im Winter produziert und im Sommer die restlichen zwei Drittel. Problematisch

⁵⁰ <https://www.raonline.ch/pages/edu/nw2/windenergie0103.html>

⁵¹ <https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/solar/fast-50-prozent-wirkungsgrad/#::~:~:text=Aktuell%20auf%20dem%20Markt%20erh%C3%A4ltliche,mit%20einem%20weitaus%20h%C3%B6heren%20Wirkungsgrad.>

ist ab einer gewissen Meereshöhe bei Anlagen auf horizontalen oder schwach geneigten Flächen, dass der Schnee im Winter liegen bleibt und die Anlage somit keine Elektrizität mehr produziert.

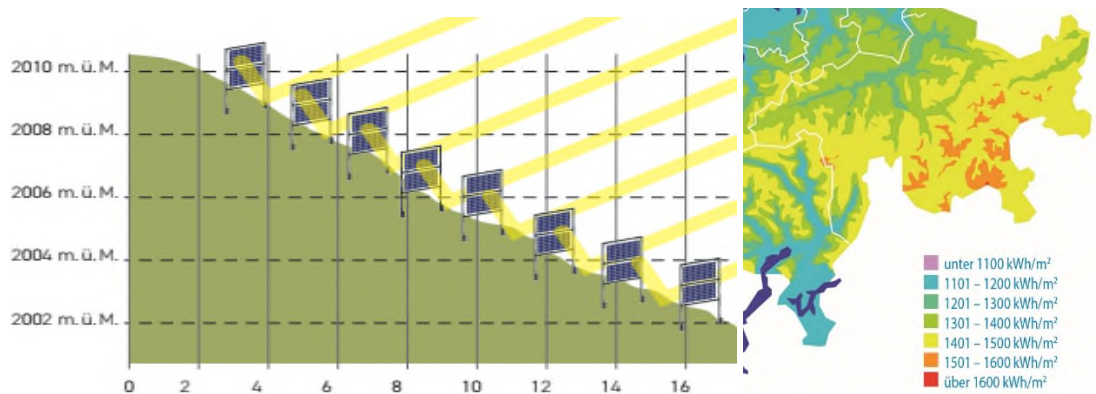
Im Kanton Graubünden ist mit einem Potenzial von 1'400 GWh pro Jahr alleine auf Dächern zu rechnen.⁵² Dabei sind Kernzonen I aus denkmalpflegerischen Gründen bereits abgezogen. Alle ARA, Parkflächen und Autobahnen haben nach unseren Einschätzungen weiteres Potenzial in der Grössenordnung von 100 GWh pro Jahr.

Denkbar ist PV auch auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Entsprechende Versuche laufen an mehreren Orten in der Schweiz. Alternativ zu den bereits genutzten Flächen sind auch Grossanlagen mit so genannten bifazialen Solarmodulen im Berggebiet denkbar, die allerdings das Landschaftsbild deutlich stärker beeinträchtigen würden. Bifaziale Solarmodule haben einen höheren Wirkungsgrad als normale, weil sie auch die zurückgeworfene Strahlung auf der Rückseite der Module nutzen können. Besonders interessant ist das an Berghängen. Sie erhöhen zudem die Produktion im Winter, sodass ein Sommer-Winter-Verhältnis von 50/50 bei um 40% höheren Volllaststunden als im Mittelland erzielt werden kann.

Derzeit werden solche alpinen Solaranlagen und deren Sinn intensiv diskutiert. Aus Sicht von Graubünden bzw. der Bündner Gemeinden ist besonders interessant, dass in diesem Zusammenhang auch ein Solarrappen für die Entschädigung des Standortes diskutiert wird.

Abbildung 22

Wirkungsweise bifaziale Solaranlagen (links) und Strahlungsintensität im Kanton Graubünden (rechts)



Quelle: Bild links: Rote Anneliese; Bild rechts: swissolar

Gut erkennbar auf der rechten Seite der Abbildung 22 ist zudem die gute Eignung des Kantons Graubünden aufgrund der hohen Einstrahlung. So strahlt die Sonne beispielsweise im Engadiner Talboden über 15 % mehr als im Churer Rheintal.

Das Potenzial von alpinen Solaranlagen wird in Kapitel 4.8 vertieft beleuchtet.

⁵² Potenzialabschätzung Solarstrom Graubünden, Amt für Raumentwicklung des Kantons Graubünden, Oktober 2014

Info-Box: Beispiel für einen alpinen Solarpark (NalpSolar)

Der Vorteil von alpinen Solarparks liegt darin, dass mehr Sonnenstunden im Winter geerntet werden können und dadurch wertvoller Winterstrom zur Verfügung steht.

Im Projekt NalpSolar in der Gemeinde Tujetsch wird bei einer installierten Leistung von 10 MW mit einer Jahresproduktion von 13 GWh gerechnet. Dies würde bei einem Solarzins von 1 Rp./kWh rund CHF 130'000 Solarzinsen für die Gemeinde Tujetsch ergeben. Die Investitionskosten sind noch nicht bekannt. Fachleute gehen aber derzeit von Gesteuerungskosten von über CHF 4'000 – 6'000 / kWp für grosse alpine Solaranlagen aus, während Anlagen auf Hausdächern in der Regel CHF 2'000/kWp kosten.



Quelle: axpo⁵³

4.7 Zusammenfassende Erkenntnisse

Wasserkraftprojekte mit 0.4 TWh/a wahrscheinlich, Rest muss aus Wind- und Solarkraft kommen

Zusammenfassend können wir festhalten, dass ein Teil des Strommehrbedarfs für die Dekarbonisierung Graubündens durch den Ausbau von Wasserkraftwerkprojekten gedeckt werden kann, insbesondere durch die Projekte Chlus, Lugnez und Pradapunt. Mit der Erhöhung der Staumauern in Marmorera, Nalps und Zervreila lässt sich ein Teil des Sommerstroms in Winterstrom umwandeln. Dennoch müssen - wenn der Strommehrbedarf durch den Ausbau von Stromproduktion in Graubünden gedeckt werden soll - rund 2 TWh aus zusätzlichen Wind- oder Solarkraftanlagen erfolgen (vgl. Abbildung 23).

⁵³ <https://www.axpo.com/ch/de/energiewissen/solarenergie.html>

Abbildung 23

Stromproduktionsoptionen für die vollständige Dekarbonisierung der Volkswirtschaft GR

		Sommer	Winter	Jahr
Zusätzlicher Strombedarf in Graubünden für Netto-Null	GWh	-1'026	-1'392	-2'418
Ausbau Wasserkraft (Projekte Chlus, Lugnez, Pradapunt)	GWh	230	150	380
Verschiebung Wasserkraft in den Winter (Projekte Nalps / Marmorera)	GWh	-200	200	-
Zusätzlicher Strombedarf in Graubünden aus Wind- und Solarkraft	GWh	-996	-1'042	-2'038
Solarkraft auf Dächer in GR	GWh	1'061	339	1'400
Annahme: Vollständige Nutzung Potenzial gemäss Moro (2021)				
Solarkraft auf Strassen	GWh	155	49	204
Annahme: Autobahnstrecke Maienfeld / Ems und Rothenbrunnen - Thusis überdacht (34 km x 6 MW * 1'000 h)				
Solarkraft auf ARAs	GWh	5	1	6
Annahme: Vollständige Potenzialnutzung nach Schätznng WIFO GR basierend auf Projekte ARA Chur Davos				
Solarkraft (do it yourself an Balkone)	GWh	32	10	42
Annahme: 70'000 Balkone à 600 W				
Solarkraft auf Parkplätze in GR	GWh	31	10	41
Annahme: Faltdach wie Jakobsbad auf 10% der PP gemäss Arealstatistik				
Zusätzlicher Strombedarf in Graubünden aus Windkraft und alpinen Solarparks	GWh	288	-633	-345

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Naheliegender wäre es, den Solarstrom auf Dächern und bestehenden Infrastrukturen zu erzeugen. Unsere groben Schätzungen zeigen, dass wenn man alle geeigneten Dachflächen in Graubünden nutzen würde, im Winter noch 633 GWh aus Anlagen auf Infrastruktur oder alpinen Solar- bzw. Windparks benötigen würde.

Sofern die Stromproduktion aus Wind- und Solarkraft im benötigten Massstab ausgebaut würde, müssten wesentliche kurzfristige Speichermöglichkeiten geschaffen werden. Diese müssten in unserer Darstellung insbesondere die Energie zwischen Tag und Nacht (wegen Solarkraft) sowie über mehrere Tage (Witterung, bei Solar- und Windkraft) ausgleichen können. Denn die saisonalen Schwankungen sind bereits bei der Bedarfsrechnung berücksichtigt worden. Ausgehend von einer installierten Leistung in der Grössenordnung von 1.4 GW (Solar- gemischt mit Windkraft) erscheint ein Ausbau des Lago Bianco mit einer Pumpleistung von rund 1 GW als sehr prüfungswerte Option.

Zentrale Erkenntnisse für die Erhöhung der Elektrizitätsproduktion

1. Für die vollständige Dekarbonisierung Graubündens und dem gleichzeitigen Ausstieg aus der Kernkraft braucht es je nach Annahmen bis zu 2.4 TWh/a zusätzlichen Strom aus erneuerbaren Energien.
2. Um einen echten Beitrag an die globale Dekarbonisierung zu leisten, müsste der zusätzliche Bedarf in GR durch eine zusätzliche Produktion in der gleichen Grössenordnung und mit einigermaßen zeitgleichem Verbrauch/Produktion geschaffen werden.
3. Mit Wasserkraft kann ein Teil der benötigten Elektrizität in drei grösseren Anlagen (Lugnez, Pradapunt, Chlus) erzeugt werden, der grosse Rest muss aus Wind- und Solarkraft kommen.

4. Auch wenn alle Dächer und ein wesentlicher Teil der Infrastruktur mit PV-Anlagen ausgerüstet werden, dürfte ein Bedarf für Windparks und / oder alpine Solarparks bestehen.
5. Wenn Graubünden oder die Schweiz die Solarkraftkapazität markant ausbauen, braucht es Speichermöglichkeiten, um die Solarstromproduktion kurzfristig zu speichern. In diesem Licht dürfte das Pumpspeicherwerk Lago Bianco von strategischer Bedeutung sein.

4.8 Rolle der alpinen Solar- und Windparks

Ausgangslage

Alpine Solar- und Windparks als politische Herausforderung für Graubünden

Der Bau von alpinen Solarparks ist derzeit in aller Munde. Dies weil im Winter 2022 die Idee von solchen Anlagen von Peter Bodenmann mit dem Beispiel Grengiols angestossen wurde und das Parlament vor dem Hintergrund des Ukraine-Kriegs und der befürchteten Strommangellage im Winter entsprechende dringliche Massnahmen ‘Solarexpress’ beschlossen hat.⁵⁴

Der Beschluss legt fest, dass der Bedarf für Photovoltaik-Grossanlagen (>10 GWh/a, Winteranteil von 500h) bis zum Erreichen einer Produktion von 2 TWh/a in der Schweiz ausgewiesen ist und der Bau solcher Grossanlagen von nationalem Interesse ist und keine Planungspflicht besteht. Mit dieser Festlegung wird die Projektierung von alpinen Solarparks wesentlich vereinfacht. Für Graubünden ist diese Diskussion aus den folgenden Gründen von Bedeutung:

- Graubünden verfügt über grosse Flächen, die für alpine Solaranlagen geeignet wären.
- Der Ausbau von alpinen Solaranlagen ermöglicht Graubünden den zusätzlich benötigten Strom im Winter zu produzieren.
- Die zusätzliche Stromproduktion ermöglicht auch zusätzliche Einnahmen für die Gemeinden als Entgelt für die Erteilung von Konzessionen bzw. Baurechte oder gleichwertige Bewilligungen.⁵⁵

Eine ähnliche Diskussion findet nun aber auch für Windparks statt. Der Nationalrat hat kürzlich dem ‘Dringlichen Gesetz zur Beschleunigung von fortgeschrittenen Windparkprojekten und von grossen Vorhaben der Speicherwasserkraft’ zugestimmt. Bis die Schweiz über eine installierte Windkraft von 600 MW verfügt, sollen entsprechende Projekte im nationalen Interesse mit erleichterten Planungsvorgaben umgesetzt werden können.

Beide Beschlüsse haben eine hohe Tragweite für den Kanton Graubünden. Denn damit werden Grundlagen geschaffen, um alpine Solar- und Windparks beschleunigt umzusetzen. Es ist dabei gar nicht so entscheidend, was die genauen Bedingungen dieser dringlichen Gesetze sind. Denn es ist davon auszugehen, dass die aktuellen gesetzlichen Grundlagen ohnehin noch weiterentwickelt werden müssen. Die politische Diskussion zeigt vielmehr auf, dass nun eine gewisse Bereitschaft oder auch ein gewisser Handlungsdruck besteht, entsprechende Projekte ernsthaft voranzutreiben.

Der Ausbau von alpinen Solar- und Windparks wird selbstverständlich den Kanton Graubünden hinsichtlich dem Landschaftsschutz herausfordern. Deshalb dürfte die Planung solcher Anlagen in den nächsten Jahren ein zentrales politisches Thema im Kanton werden.

⁵⁴ Energiegesetz (2022): Dringliche Massnahmen zur kurzfristigen Bereitstellung einer sicheren Stromversorgung im Winter

⁵⁵ Kanton Graubünden (2023): Leitfaden Bewilligungsverfahren für Photovoltaik-Grossanlagen nach Art. 71a EnG

Alpine Solar- und Windparks produzieren Winterstrom

Rolle der alpinen Solarparks

Es ist unbestritten, dass für den Umstieg von fossilen Energieträgern auf nachhaltige Energieträger die Solar- und Windkraft in der Schweiz eine wesentliche Rolle spielt. Sofern der Mehrbedarf an Strom für Elektromobilität, Wärmeproduktion und CO₂-Abscheidung künftig in der Schweiz und Graubünden aus Solar- und Windenergie kommen und diese auch die heutige Kernkraft ersetzen soll, braucht die Schweiz je nach Schätzung eine installierte Leistung von 40 – 50 GW Solarkraft.⁵⁶ Das Wirtschaftsforum Graubünden schätzt den zusätzlichen Strombedarf für Graubünden aus Wind- und Solarkraft auf bis zu 2 TWh.

Dieser Mehrbedarf kann entweder durch Solaranlagen auf bestehenden Dächern, auf bestehenden Infrastrukturen oder alpinen Solar-/Windparks sichergestellt werden. Wir gehen davon aus, dass höchstwahrscheinlich in alpinen Wind- und Solarparks 1 GW Leistung zu installieren sein wird.

Im Vergleich zu Solaranlagen auf Dächern und Infrastruktur weisen **alpine Solarparks** insbesondere die folgenden beiden Vorteile auf:

- **Grössere Winterproduktion:** Sie können knapp 900 h im Winter produzieren, während Anlagen im Mittelland im Winter lediglich gut 200 h erreichen. Über das ganze Jahr können bis zu 1'600 h statt knapp 900 h Produktion erwartet werden. In den höhergelegenen Siedlungen in Graubünden kommt hinzu, dass während dem Winter Schnee auf den Dächern / oder Infrastrukturen liegt und deshalb nur Anlagen mit einem Anstellungswinkel von 60° und mehr für Winterstrom in Frage kommen. Bifaziale alpine Solaranlagen sind aus diesen Überlegungen insgesamt deutlich effizienter als die durchschnittliche Anlage auf Dächern.
- **Effizientere Realisierung:** Die Realisierung des Potenzials auf den Dächern ist ineffizient und langwierig, weil viele Kleinanlagen realisiert werden müssen und die Initiative von den Eigentümern ausgehen muss. Die alpinen Solaranlagen könnten in einem viel grösseren Massstab und deshalb wesentlich rascher umgesetzt werden. Die Initiative kann von den Elektrizitätsunternehmen ausgehen, welche auch in der Lage sind, die entsprechenden finanziellen Mittel bereitzustellen.

Abbildung 24

Energieertrag von bifazialen alpinen Solaranlagen im Vergleich zu herkömmlichen Solaranlagen auf Dächern im Mittelland



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf Anderegg (2021)

⁵⁶ Nordmann, R. (2017): Sonne für den Klimaschutz

Rolle der alpinen Windparks

Alpine Windparks wiederum produzieren rund 55-70% der Energie im Winter wobei ein Jahresertrag von 1.4-1.7 GWh pro installiertem MW-Leistung in den Alpen gemäss Erfahrungen des Windparks Gotthard erwartet werden kann.⁵⁷

Notwendigkeit von alpinen Solar- und Windparks

Rund 1 GW an Wind- und alpinen Solarparks nötig

Stellt sich nun die Frage, ob und wenn ja, wieviele alpine Wind- und Solarparks in Graubünden benötigt werden. Bei der Antwort muss man unterscheiden wieviel Leistung aus Wind- und Solarparks wir für den Bedarf aus Graubünden und wieviel für den schweizerischen Bedarf brauchen. Wir haben uns auf den Bündner Bedarf konzentriert: Unsere Berechnungen in Abbildung 23 zeigen folgenden Bedarf an alpinen Solar- und Windparks:

Abbildung 25

Notwendige Installation von alpinen Solar- oder Windparks wenn der Strommehrbedarf in Graubünden vollständig durch Wasser-, Solar- und Windkraft gedeckt werden soll, Graubünden Netto-Null erreichen will, die Schweiz aus der Kernkraft aussteigt und das nicht eliminierbare CO₂ durch Abscheidung entfernt wird.

Alpine Solarparks				
Angenommene Vollproduktionsstunden	h	700	700	1'400
Notwendige installierte Leistung, wenn Dächer und Infrastrukturnutzung für PV auf Niveau 2022 verbleiben	MW	1'422	1'489	1'489
Notwendige installierte Leistung, wenn Dächer und Infrastrukturpotenzial weitgehend für PV genutzt wurden	MW	-	904	904
Windkraftwerke				
Anzahl Vollproduktionsstunden	h	800	1'200	2'000
Notwendige installierte Leistung, wenn Dächer und Infrastrukturnutzung für PV auf Niveau 2022 verbleiben	MW	1'244	869	1'244
Notwendige installierte Leistung, wenn Dächer und Infrastrukturpotenzial weitgehend für PV genutzt wurden	MW	-	527	527

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Das bedeutet, je nachdem wie stark man das Solarpotenzial auf Dächern und Infrastrukturen ausschöpft, braucht es entweder alpine Windparks mit einer Leistung von 527-1'244 MW oder alpine Solarparks mit einer Leistung von 791-1'422 MW bzw. eine Mischung aus diesen beiden Anlagentypen.

Es scheint uns derzeit eher unwahrscheinlich, dass das theoretische Potenzial auf Dächern und Infrastrukturen vollständig ausgeschöpft wird. Denn die Überdachung von Autobahnen dürfte einige technische Herausforderungen mit sich bringen. Zudem stellt sich auch dort die Frage des Landschaftsschutzes. Gleiches gilt für die Installation grösserer Anlagen entlang von Kantonsstrassen. Es ist denkbar, dass aus Sicht des Landschaftsschutzes der Bau von alpinen Solaranlagen die Landschaft weniger beeinträchtigt als die Nutzung der Strasseninfrastruktur. Dies ist jedoch eine Frage, welche politisch und im Einzelfall zu klären ist.

Wir gehen aufgrund dieser Überlegungen davon aus, dass für die Dekarbonisierung Graubündens alpine Solar- und Windparks im Umfang von mind. 1 GW Leistung notwendig sein werden. Dies immer unter der Prämisse, dass der Strommehrbedarf in Graubünden mit Solar- und Windstrom zur Verfügung gestellt wird und die Alternativen wie Nuklearstrom oder Import nicht zur Diskussion stehen. Wenn die alpinen Solar- und Windparks jedoch auch einen wesentlichen Anteil des zusätzlichen Winterstrombedarfs der Mittellandkantone liefern sollen, so erhöht sich die benötigte installierte Leistung in Graubünden wesentlich.

⁵⁷ Eckwerte Windpark Gotthard: 11.75 MW installierte Leistung, 16-20 GWh Ertragsersparung, 25 Jahre Nutzungsdauer, CHF 32 Mio. Investition; <https://www.aet.ch/DE/Gotthard-Windpark-fa0c5600>

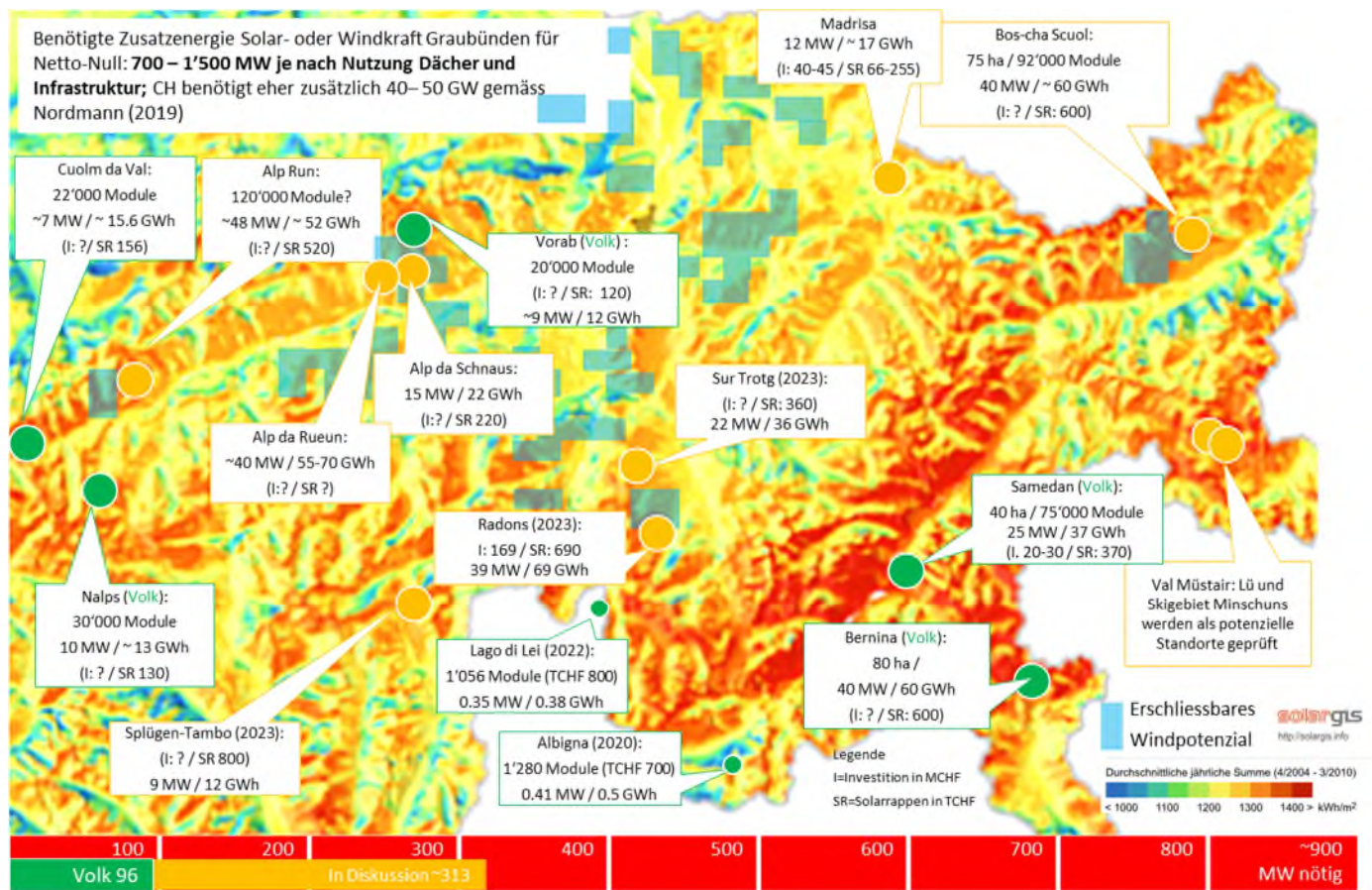
Vor diesem Hintergrund muss die Politik in Graubünden explizit oder implizit folgende Fragen beantworten:

- Welche Landschaft und wieviel Landschaft soll für alpine Solarparks eingesetzt werden?
- Wie soll die Priorisierung oder die Gewichtung des Baus von Solaranlagen auf Dächern, auf Infrastrukturanlagen und von alpinen Solarparks gestaltet werden?
- Soll Graubünden eine Solarproduktion nur für die eigenen Bedürfnisse oder für die schweizerischen Bedürfnisse aufbauen und wie würde eine solche Solidaritätsleistung an die Restschweiz entschädigt?

Bisher sind einige in Graubünden geplante alpine Solarparks bekannt (Alp Run, Berninapass, Bos-cha Scuol, Cuolm da Vi, Madrisa, Nalps, Samedan, Surses, Alp Schnaus, Alp da Rueun und Vorab), die gemeinsam auf eine Leistung von Grössenordnung 313 MW kommen, was ungefähr 35% der für die Dekarbonisierung Graubündens gemäss unserer Einschätzung zusätzlich benötigten Leistung entspricht (falls die Dachflächen vollständig genutzt werden). Wir erwarten, dass in den nächsten Monaten weitere alpine Solarparkprojekte bekannt gegeben werden. Die Gemeinden werden sich mit diesen Projekten befassen und entscheiden müssen, ob die Projekte umgesetzt werden sollen. Es ist zu erwarten, dass in diesem Zusammenhang aber auch eine Diskussion mit den einspracheberechtigten Umweltschutzorganisationen unumgänglich ist und allenfalls ebenfalls eine Art runder Tisch (nach Vorbild der Wasserkraft) organisiert werden muss, um eine Gesamtplanung der Anlagen und der schützenswerten Gebiete vorzunehmen.

Abbildung 26

Karte mit der jährlichen Sonneneinstrahlung und der bisher bekannten alpinen Solarparkprojekten



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf solargis und diversen Quellen

Die Abbildung 26 zeigt die bisher bekannten Projekte, die Sonneneinstrahlung und die Windpotenzialstandorte auf. Auffallend ist, dass die Wind- und Sonnenstandorte sich nicht decken sondern ergänzen. Windparks eignen sich eher für Mittel- und Nordbünden, während Solarparks eher im Engadin und den Südhängen interessant wären. Einzelne Standorte eignen sich allenfalls für beide Arten und könnten sogar kombiniert werden.

Vereinfachend zusammengefasst:

1. Alpine Solar- und Windparks werden derzeit politisch intensiv diskutiert und bieten für die Dekarbonisierung Graubündens und der Schweiz interessante Potenziale / Vorteile.
2. Randregionen in Graubünden könnten ökonomisch von alpinen Solar- und Windparks profitieren, weshalb es nicht nur um Klima- sondern auch um periphere Wirtschaftspolitik geht.
3. Unsere Abschätzungen lassen erwarten, dass Windkraftwerke und alpine Solaranlagen für eine vollständige Dekarbonisierung als Ergänzung zur Nutzung von Dächern und Infrastruktur in Graubünden notwendig sein werden, insbesondere wenn aus der Kernkraft ausgestiegen, auf einen zusätzlichen Stromimport verzichtet wird und die CO₂-Abscheidung vor Ort erfolgen soll.
4. Graubünden braucht deshalb – aufgrund der Landschaftsbeeinträchtigung – eine politische Diskussion zur Frage, wie viele und welche alpinen Wind- und Solarparks bewilligt werden sollen.

5 Plan für die Dekarbonisierung Graubündens

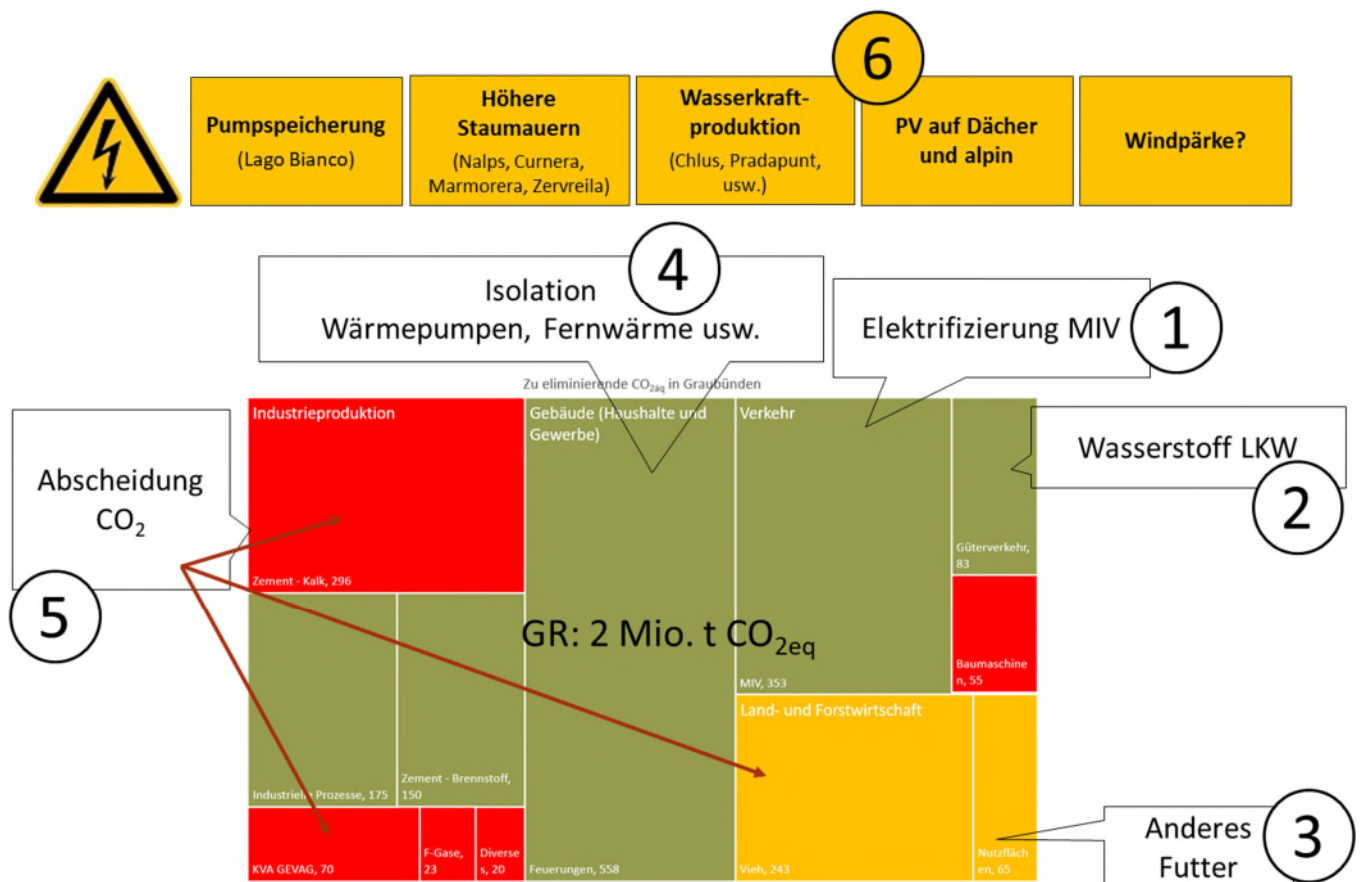
Umstieg rasch vorantreiben

Aufgrund der bisher geführten Diskussion lässt sich ein einfacher Plan für die Eliminierung des CO₂ in Graubünden aufstellen:

In einem ersten Schritt (1,2) ist der gesamte motorisierte Verkehr zu elektrifizieren, sei dies mit batteriebetriebenen Personenfahrzeugen oder mit Fahrzeugen, die mit Wasserstoff oder erneuerbar hergestellten synthetischen Treibstoffen betrieben werden. Die Fahrzeuge werden höchstwahrscheinlich in den nächsten Jahren durch die Industrie zu vernünftigen Kosten zur Verfügung gestellt. Man kann sogar davon ausgehen, dass die Elektrofahrzeuge künftig im Vergleich günstiger sein werden als die heutigen fossil betriebenen Fahrzeuge. Der Kanton Graubünden könnte diesen Flottenerneuerungsprozess mit Anreizen und Vorgaben bei der Zulassung beeinflussen.

In der Landwirtschaft (3) lässt sich vermutlich künftig mit anderen Futtermischungen ein Teil des CO₂-Ausstosses eliminieren. Ein Teil wird bestehen bleiben und muss abgeschieden werden.

Abbildung 27 Der Plan zu Netto-Null in Graubünden



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Parallel dazu sind in den Gebäuden in Graubünden (4) die fossilen Brennstoffe durch erneuerbare Energieträger (Pellets, Holz, (Fernwärme), Wärmepumpen) zu ersetzen und gleichzeitig den Energiebedarf durch Dämmung/Wärmerückgewinnung zu senken. Die Technologien sind vorhanden und über die Energievorschriften kann der Kanton wesentlich Einfluss auf das Tempo des Umbaus der Gebäudeenergieanlagen nehmen.

In den Industriebetrieben kann ein Teil der Prozesse und insbesondere der Wärme ebenfalls künftig über erneuerbare Energien geleistet werden. In diesem Bereich kann der Kanton Graubünden jedoch weniger autonom handeln, da einerseits die Industrie die notwendigen individuellen Lösungen entwickeln muss und andererseits die einseitige Verteuerung der Energie allenfalls die Attraktivität des Produktionsstandorts Graubünden schwächt. Es braucht deshalb zumindest eine nationale Koordination der Massnahmen.

Schliesslich bleibt vermutlich ein Teil des CO₂, welches mit der heute absehbaren technologischen Entwicklung über längere Zeit nicht eliminiert werden kann. Hier bietet sich die Abscheidung des CO₂ an. Denkbar ist, dass ein wesentlicher Teil dieses CO₂ direkt an den stark emittierenden Quellen der KVA und des Zementwerks Untervaz abgeschieden wird. Der Restliche Teil muss entweder durch direct-air-capture vor Ort oder an einem besser geeigneten Standort mit erneuerbarer Wärmequelle im Ausland erfolgen. Der Kanton Graubünden kann hier mithelfen, indem diese Quellen für Forschungsprojekte und Pilotanlagen genutzt werden und eine eigene CO₂-Abscheidung aufgebaut wird.

Schliesslich muss Graubünden den zusätzlichen Bedarf an elektrischer Energie bereitstellen (6). Dazu dienen die in diesem Bericht erwähnten Wasserkraftprojekte sowie eine eigentliche Offensive zum Ausbau der Solar- und Windkraft im Kanton.

Vereinfachend zusammengefasst:

1. Die Dekarbonisierung Graubündens erscheint uns machbar. Sie setzt die Elektrifizierung von Verkehr, Heizungen und Industrie voraus.
2. Die Dekarbonisierung setzt den markanten Ausbau von Solar- und Windkraft voraus, und zwar unabhängig davon, welche anderen Technologien noch genutzt werden.
3. Die Abscheidung von CO₂, primär in den Bereichen Landwirtschaft und Industrie, wird notwendig sein. Das abgeschiedene CO₂ kann eingelagert oder beispielsweise für synthetische Treibstoffe verwendet werden und erfordert wiederum den Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion.

6 Zur Wirtschaftlichkeit

Kostenschätzung
erfolgte mit zwei
Methoden

Es ist unmöglich heute abzuschätzen, was die Dekarbonisierung der Bündner Wirtschaft kosten wird. Denn die Dekarbonisierung wird sich über mind. 30 Jahre erstrecken und die technologischen Möglichkeiten und damit auch die Umstiegskosten werden sich mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit noch stark entwickeln.

Dennoch braucht es eine annähernde, stark vereinfachte Prüfung der Umstiegskosten aus volkswirtschaftlicher Sicht, um ein Gefühl für die Dimension des Projekts «Dekarbonisierung Graubündens» zu erhalten.

Wir haben die Schätzung deshalb mit zwei unterschiedlichen, voneinander unabhängigen Methoden vorgenommen:

- Methode 1: **Schätzung der Investitionskosten in Graubünden** für die Dekarbonisierung und Ableitung der jährlichen Folgebelastung durch die Investition.
- Methode 2: Schätzung der **jährlichen Energiekosten in Graubünden** vor und nach Dekarbonisierung und Ableitung des maximal sinnvollen Investitionsrahmens.

Wir zeigen nachfolgend unsere Annahmen und Ergebnisse aus diesen zwei Methoden auf.

6.1 Schätzung der volkswirtschaftlichen Kosten anhand der Investitionen (Methode 1)

Investitionen von CHF
6.5 – 8 Mrd. nötig

Für die Abschätzung der volkswirtschaftlichen Kosten der Dekarbonisierung anhand der Investitionen haben wir folgende vereinfachende, grobe Annahmen getroffen:

- Im **Gebäudebestand** werden Gas- und Ölheizungen mit Wärmepumpen ersetzt. Die Mehrkosten für den Ersatz durch Wärmepumpen im Vergleich zu fossilen Systemen gelten als Kosten des Umstiegs. Die Mehrkosten für Wärmepumpen sind gut dokumentiert. Bei den Unterhaltskosten gehen wir von gleichen oder leicht tieferen Kosten aus als bei fossilen Systemen.
- Wir gehen davon aus, dass in den grossen Gemeinden in Graubünden **Fernwärmenetze** entstehen. Die entsprechenden Investitionen haben wir vollständig berücksichtigt. Beim Unterhalt der Fernwärmenetze gehen wir davon aus, dass keine Mehrkosten gegenüber den heutigen Systemen (z.B. Gasnetz) entstehen.
- Die **Fahrzeugflotte** wird in den nächsten Jahrzehnten laufend ersetzt. Weil der Anteil der Elektrofahrzeuge laufend zunimmt und zum Hauptprodukt wird, werden Elektrofahrzeuge künftig günstiger sein als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Das bedeutet, dass der Umstieg für den Endkonsument keine zusätzlichen Kosten verursacht. Unklar ist, wie die Batteriekosten sich entwickeln werden, da hier einerseits mit Rohstoffknappheiten und andererseits mit technologischen Sprüngen und Recyclingvorteilen zu rechnen ist.
- Die **Umstiegskosten in der Industrie** sind schwierig abzuschätzen, da es je nach Unternehmen sehr spezifische Umstiegsprojekte brauchen wird. Der Einfachheit halber haben wir angenommen, dass die Gesamtkosten rund CHF 300 Mio. betragen. Damit könnte man mehr als drei grosse Holzkraftwerke im Stil der Tegra in Domat/Ems bauen, welche Prozessenergie für die Industrie zur Verfügung stellen könnten.
- Der **zusätzliche Strombedarf** muss mit zusätzlicher einheimischer Stromproduktion aus Wasser-, Wind- und Solarkraft zur Verfügung gestellt werden. Die Investitionen in diese zusätzliche Produktion und Speichermöglichkeiten werden als Umstiegskosten betrachtet und gerechnet. Die Investitionskosten sind weitgehend aufgrund von entsprechenden Projekten bekannt. Wir gehen von Unterhaltskosten von 1% der Investition aus. Wir gehen davon aus, dass in Graubünden nebst einem breiten Ausbau der Solarkraft, punktuellen Windpärken insbesondere die Wasserkraftprojekte Chlus, Pradapunt und Lugnez umgesetzt sowie die Stauseen in Marmorera, Curnera, Nalps und

Zervreila erhöht werden. Weiter nehmen wir an, dass das Projekt Lago Bianco zur Glättung der Solarproduktion umgesetzt wird. Für die Solarkraft haben wir Investitionskosten von CHF 3'000/kWp (mix aus Dachanlagen und alpinen Solaranlagen) und Unterhaltskosten von 1% der Investition angenommen.⁵⁸

- Ein Teil des **CO₂ wird abgeschieden** werden müssen. Dies erfordert entsprechende Investitionen in Anlagen und einen zusätzlichen Strombedarf. Beide Elemente werden als Umstiegskosten betrachtet. Wir basieren unsere Schätzungen auf die Anlagen von climeworks und nehmen Unterhaltskosten von 1% der Investitionskosten an.
- Unklar ist heute, ob das **Stromnetz** wesentlich umgebaut / verstärkt werden muss. Wir gehen von den Mehrkosten des Szenario ZERO Basis gegenüber dem Szenario 'Weiter wie bisher' des BFE für die gesamte Schweiz aus und rechnen diese anteilmässig auf Graubünden.⁵⁹ Diese Annahme gilt auch für die Methode 2.
- Den allfällig notwendigen **Ausbau der Stromspeicherung** haben wir vernachlässigt. Denn wir haben angenommen, dass das Projekt Lago Bianco für die kurzzeitige Tag-Nacht-Speicherung im Winter eingesetzt werden kann. Dadurch sollte im Verbund mit den vorhandenen Wasserspeicherwerken genügend Speicherungspotenzial für Graubünden vorhanden sein. Allfällig zusätzliche Speicherungen wären eher für die Bedürfnisse der Restschweiz zu prüfen. Diese Annahme gilt auch für die Methode 2.

Abbildung 28

Grobe Schätzung der Investitionskosten und –folgekosten für die Dekarbonisierung der Volkswirtschaft Graubünden

	Mehr-Investition (MCHF)	Amortisationsdauer in Jahren	Amortisation p.a. (MCHF)	Mittlere Verzinsung über Nutzungsdauer p.a. bei 3% (MCHF)	Mehr-Unterhalt 1% der Investition (MCHF)	Summe der Mehrkosten pro Jahr (MCHF)	Kurzherleitung
Wärmepumpen	800	20	40	12	-	52	Mehrkosten ggü. fossile Systeme
Solarkraft (PV)	4'200	30	140	63	42	245	CHF 3000/kWp (gemäss geschätztem Bedarf, Annahme alpine Solarparks werden vom Bund querfinanziert)
Windkraft	-	-	-	-	-	-	durch Solarkraft gedeckt
Wasserkraftproduktion	565	80	7	8	6	21	Chlus, Pradapunt, Lugnez
Fernwärmenetze	675	40	17	10	-	27	basierend auf Botschaft Stadt Chur
Neue Autos / LKW	-	15	-	-	-	-	Festlegung durch WIFO
Industrie	300	40	8	5	3	15	Grosszügige Annahme für Umrüstung (Bau von 3 Tegra Kraftwerke)
Netzausbau	354	50	7	5	-	12	zero Basis + 30 Mrd. für die gesamte CH (gewichtet Kantonsstrassenlänge und Einwohner)(30/ 8.5 *0.2 + 30/17772*1362km)
Summe 66% Dekarbonisierung ohne Staumauererhöhung und Lago Bianco	6'894		219	103	51	373	
Staumauererhöhungen	680	150	5	10	7	22	Marmorera, Nalps, Curnera, Zervreila
Lago Bianco	2'500	100	25	38	25	88	gemäss öffentlichen Angaben zum Projekt
Summe 66% Dekarbonisierung (mit Staumauererhöhung und Lago Bianco)	10'074		248	151	82	482	
Abscheidung CO ₂						122	Annahme CHF 200 Kosten pro t CO ₂
Summe 100% Dekarbonisierung (inkl. Lago Bianco und Staumauererhöhungen)	10'074		248	151	82	604	

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Unsere Kostenberechnungen haben wir in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Der erste Teil der Tabelle zeigt die Mehrkosten für die Eliminierung der fossilen Heiz- und Treibstoffe auf. Wenn es Graubünden gelingt, diese fossilen Energieträger zu ersetzen, werden rund zwei Drittel des CO₂ eliminiert sein, was in etwa jährliche Folgekosten (Abschreibung, Verzinsung und Mehrunterhalt) von CHF 482 Mio. nach sich ziehen würde. Im zweiten Teil der Tabelle haben wir zusätzlich die Investitionskosten für die Abscheidung von CO₂ und damit einer vollständigen Elimination des CO₂ mitberücksichtigt. In diesem Fall kommt man auf jährliche Folgekosten von CHF 604 Mio. Fraglich ist, ob die Kosten für Lago Bianco einzig auf Graubünden zuzurechnen sind. Denn diese Anlage dürfte eher im

⁵⁸ https://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaik#Anschaffungskosten_und_Amortisationszeit

⁵⁹ BFE (2022): Auswirkungen einer starken Elektrifizierung und eines massiven Ausbaus der Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien auf die Schweizer Stromverteilnetze.

gesamtschweizerischen Kontext eine Rolle spielen. So gesehen ist mit Folgekosten von CHF 482-604 Mio. zu rechnen.

6.2 Schätzung der volkswirtschaftlichen Kosten anhand der jährlichen Energiekosten (Methode 2)

Aktuelle Energiebeschaffungskosten der Volkswirtschaft Graubünden

Künftige Energiekosten von CHF 554 Mio.

Wir gehen davon aus, dass die Volkswirtschaft Graubünden heute rund CHF 628 Mio. für die Beschaffung von Energie aufwenden muss. Darin sind nur die Grosshandelskosten für die Energieträger ohne Verteillogistik und zusätzliche Steuern/Abgaben berücksichtigt. Auch der Import von Erdölprodukten, die nicht für energetische, sondern für stoffliche Zwecke genutzt werden (Petrochemie), wurden hier nicht berücksichtigt. Bei den fossilen Energien kommen die Kosten für Transport und Lagerung hinzu, wenn man die Endkosten der Energieträger rechnen möchte. Bei der Elektrizität sind die Kosten für die Netzinfrastruktur und Feinverteilung dazuzurechnen.

Total importiert Graubünden nach unserer Schätzung fossile Energieträger für CHF 448 Mio. pro Jahr. Dies bei einem Preisniveau wie er im 2018 galt, als noch keine krisenbedingten Energiepreise zu bezahlen waren. Je nach Marktpreissituation kann dieser Betrag gemäss den Erfahrungen der letzten 20 Jahre gut zwischen CHF 350 und 700 Mio. schwanken.

Weitere CHF 180 Mio. fallen für Elektrizität, Fernwärme und Biomasse an. Total betragen die Kosten für die Energieträger geschätzt CHF 628 Mio.

Abbildung 29

Schätzung der aktuellen Energiebeschaffungskosten der Volkswirtschaft Graubünden

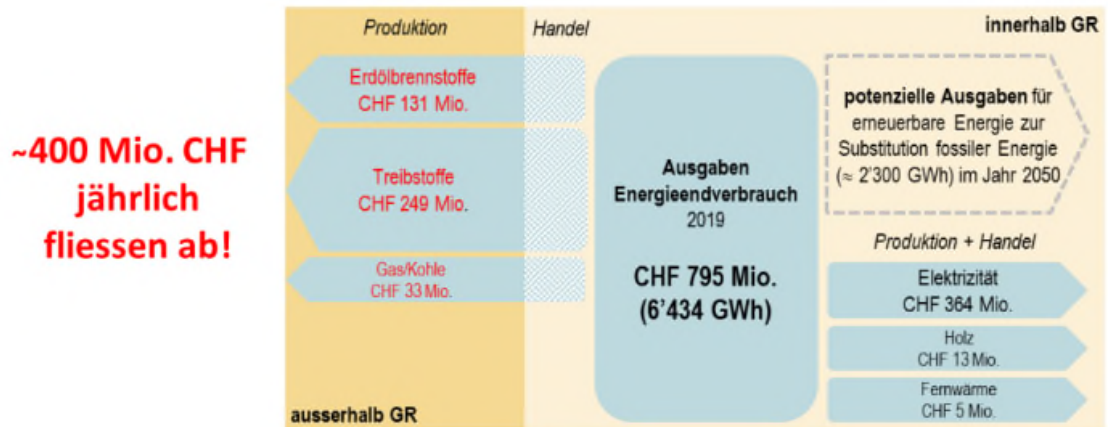
	GWh	CHF		KWh/Einheit	Rp./kWh	Total MCHF
Heizöl (Haushalte)	889	96.20	pro 100 Liter	980.0	9.8	87
Erdöltreibstoffe (Verkehr, Basis Diesel)	1'650	1.28	Liter Diesel	9.8	13.1	216
Erdölbrennstoffe (Industrie, Basis Heizöl)	1'250	96.20	pro 100 Liter	980.0	9.8	123
Kerosin	10	1.05	Liter	9.5	11.1	1
Kohle	250	75.00	1 Tonne	8'060.0	0.9	2
Haushalte (Erdgas)	250	0.08	kWh	1.0	7.7	19
Fossile Energie Graubünden	4'299					448
Elektrizität (Haushalte)	1'200	0.06	kWh	1.0	6.0	72
Elektrizität (Industrie)	700	0.06	kWh	1.0	6.0	42
Elektrizität (Verkehr)	100	0.06	kWh	1.0	6.0	6
Energieholz (Haushalte, Basis Pellets)	350	359.00	Tonne	4'900.0	7.3	26
Energieholz (Industrie Basis: Hackschnitzel)	100	0.07	kWh	1.0	7.0	7
Fernwärme	100	n/a	n/a	n/a	12.0	12
Übrige Erneuerbare Energie (Haushalte)	150	n/a	n/a	n/a	10.0	15
Energieverbrauch Graubünden	6'999					628

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Im Aktionsplan Green Deal kommen die Autoren zu leicht tieferen Beschaffungskosten für die fossilen Energieträger, wobei sie von einem etwas tieferen Energiebedarf ausgehen. Die Elektrizitätspreise fallen deutlich höher aus, dies aber weil die Preise inkl. Netzgebühren gerechnet sind. So gesehen, können wir davon ausgehen, dass unsere Ausgangsschätzung nach diesen Bereinigungen ähnlich ausfällt und damit belastbar sein sollte (vgl. Abbildung 30).

Abbildung 30

Kosten für Treib- und Brennstoffe, die derzeit ins Ausland abfliessen gemäss Aktionsplan Green Deal



Quelle: ANU GR (2021)

Künftige Energiekosten

Für die Schätzung der künftigen Energiekosten, haben wir folgende Annahmen getroffen:

- Der Import von fossilen Energieträgern kann komplett eingestellt werden.
- Graubünden deckt den zusätzlich notwendigen Strom (inkl. Ausstieg aus der Wasserkraft) zu Gestehungskosten von ~15 – 20 Rp./kWh. Damit soll das Preisniveau für den Bau der neuen Wasserkraftwerke, Solar- und Windanlagen abgebildet werden.
- Die übrigen Energieträger (Biomasse, Holz) stehen zu den Preisen von 2018 zur Verfügung.

Abbildung 31

Schätzung der Energiebeschaffungskosten der Volkswirtschaft Graubünden nach der Dekarbonisierung

	GWh	CHF		KWh/Einheit	Rp./kWh	Total MCHF
Heizöl (Haushalte)	-	96.20	pro 100 Liter	980.0	9.8	-
Erdöltreibstoffe (Verkehr, Basis Diesel)	-	1.28	Liter Diesel	9.8	13.1	-
Erdölbrennstoffe (Industrie, Basis Heizöl)	-	96.20	pro 100 Liter	980.0	9.8	-
Kerosin	10	5.00	Liter	9.5	52.6	5
Kohle	-	75.00	1 Tonne	8'060.0	0.9	-
Haushalte (Erdgas)	-	0.08	kWh	1.0	7.7	-
Fossile Energie Graubünden	10					5
Strombedarf im 2018 aus Altbestand an Kraftwerken	1'370	0.06	kWh	1.0	6.0	82
Ersatz KKW durch Wasserkraft und Solarkraft auf Dächern	630	0.15	kWh	1.0	15.0	95
Elektrizität Mehrbedarf aus Solarkraft auf Dächern (Haushalte)	332	0.15	kWh	1.0	15.0	50
Elektrizität Mehrbedarf aus Windparks (Industrie)	263	0.15	kWh	1.0	15.0	39
Elektrizität Mehrbedarf aus alpinen Solarparks (Verkehr)	513	0.20	kWh	1.0	20.0	103
Energieholz (Haushalte, Basis Pellets)	354	359.00	Tonne	4'900.0	7.3	26
Energieholz (Industrie Basis: Hackschnitzel)	101	0.07	kWh	1.0	7.0	7
Fernwärme (anergie, Holz, Biomasse, Grundwasser)	675	n/a	n/a	n/a	12.0	81
Übrige Erneuerbare Energie (Haushalte,)	150	n/a	n/a	n/a	10.0	15
Energieverbrauch Graubünden (bei Reduktion CO₂ um 66%)	4'398					503
Elektrizitätsmehrbedarf für CO ₂ -Abscheidung	680	0.15	kWh	1.0	15.0	102
Energieverbrauch Graubünden (bei Reduktion CO₂ um 100%)	5'077					605
Betrachtung ohne CO₂-Abscheidung						
Ersparnis zur Verwendung für Bau Lago Bianco, Netzausbau und Stauwehrrhöhung Nalps/Marmorera						-23
Investierbares Kapital wenn kapitalisiert mit 6% (3% Zins und 3% Abschreibung)						458

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Mit diesen Annahmen lassen sich die Kosten für fossile Energieträger komplett eliminieren. Die Gesamtenergiekosten betragen CHF 605 Mio. inklusiv der Abscheidung des verbleibenden CO₂. Im Unterschied zur Methode 1 muss bei den erhaltenen CHF 605 Mio. jährlichen Kosten noch die Kosten für den allfälligen Netzausbau sowie für das Projekt Lago Bianco hinzugerechnet werden.

6.3 Diskussion der Kosten und des Kostenvergleichs

Beim Vergleich der volkswirtschaftlichen Kosten für die Dekarbonisierung Graubündens können wir nun folgendes feststellen (vgl. Abbildung 32):

- Die Berechnung der volkswirtschaftlichen Kosten nach Methode 1 und Methode 2 führt zu ähnlichen Grössenordnungen.
- Das Szenario weiter wie bisher kostet Graubünden jährliche CHF 628 Mio. für die Energiebeschaffung und trägt MCHF 216 Mio. zur BWS in Graubünden bei.
- Wenn Graubünden sich entschliessen würde, das CO₂ ausserhalb Graubündens zu heutigen Preisen zu kompensieren, würden Zusatzkosten von CHF 57 – 161 Mio. bei heutigen Marktpreisen anfallen. In Graubünden würden aber immer noch gleich viel CO₂ ausgestossen.
- Eine teilweise Dekarbonisierung ohne Abscheidung von CO₂ (und Verzicht auf das Pumpspeicherwerk Lago Bianco und Staumauererhöhungen) würde es ermöglichen, 66% des CO₂ zu entfernen, die Energiekosten je nach Schätzmethode um 10-17% zu senken. und gleichzeitig die kantonale Bruttowertschöpfung um CHF 403-447 Mio. zu erhöhen.
- Die vollständige Dekarbonisierung inkl. Bau des Pumpspeicherwerks Lago Bianco und der Erhöhung verschiedener Staumauern würde rund 26-36% Mehrkosten gegenüber dem Szenario weiter wie bisher nach sich ziehen. Dafür aber auch die Bruttowertschöpfung in Graubünden um CHF 725-803 Mio. erhöhen und das CO₂-Problem lösen.

Aufgrund dieser Feststellungen gewinnen wir die **folgenden Erkenntnisse**:

1. Strategien die auf **Kompensationszahlungen für CO₂-Einsparungen** ausserhalb der eigenen Volkswirtschaft basieren, sind volkswirtschaftlich unattraktiv und sind (aus volkswirtschaftlicher Sicht) sowohl für Staat wie auch für Unternehmen zu **unterlassen**. Insbesondere wenn die Preise im EU-Emissionszertifikatehandel weiter zunehmen (was sein sollte), wird dies eine kostspielige Strategie.
2. Eine Strategie der **Teildekarbonisierung ist höchst interessant** und raschmöglichst voranzutreiben.
3. Die Umsetzung des **Pumpspeicherwerks Lago Bianco und die Erhöhung von Staumauern** würden den Energieumbau wesentlich verteuern. Weil diese Speicherprojekte jedoch nicht auf die Bedürfnisse Graubündens sondern der Gesamtschweiz abzielen, sollten sie auch bei der Kostenrechnung nur anteilmässig Graubünden zugerechnet werden.
4. Eine Strategie der **vollständigen Dekarbonisierung** (ohne Anrechnung PSW Lago Bianco und Erhöhung Staumauern) führt bei Preisen für fossile Energieträger von 2018 zu **gleichen Energiekosten wie heute**. Sollten sich die Preise für fossile Energieträger gegenüber 2018 um beispielsweise 20% erhöhen, führt die vollständige Dekarbonisierung (ohne PSW Lago Bianco und Staumauererhöhungen) zu Kosteneinsparungen im Ausmass von 5-13% gegenüber dem Szenario 'Weiter wie bisher'.

Abbildung 32 Vergleich der volkswirtschaftlichen Kosten für die Energieträger in GR bei verschiedenen Dekarbonisierungsstrategien und Preissituationen

Dekarbonisierungsstrategie bei Preisen von 2018 für fossile Energieträger		Eliminiertes CO ₂ in GR ggü. 2020	Kosten in MCHF/p.a.					Mehrkosten im Vergleich zu Status Quo			Beitrag BWS in GR	
			Energie-träger	Strom	Kompen-sation CO ₂	Energie-umbau	Total	MCHF	in %	pro Kopf in CHF	MCHF	Im Vergleich zu Ist
Weiter wie bisher (keine Dekarbonisierung)		0%	448	180	-	-	628				216	
Teildekarbonisierung ohne CCS, PSW und Staumauererhöhung)	Methode 1	-66%	5	180	-	373	557	-70	-11%	-351	663	447
	Methode 2	-66%	5	503	-	12	520	-107	-17%	-536	618	403
Teildekarbonisierung ohne CCS, mit PSW und Staumauererhöhung	Methode 1	-66%	5	180	-	482	667	39	6%	194	794	578
	Methode 2	-66%	5	503	-	121	630	2	0%	9	749	534
Vollständige Dekarbonisierung ohne PSW und Staumauererhöhung	Methode 1	-100%	5	180	-	495	680	52	8%	261	810	594
	Methode 2	-100%	5	605	-	12	622	-5	-1%	-26	741	525
Vollständige Dekarbonisierung mit PSW und Staumauererhöhung	Methode 1	-100%	5	180	-	604	789	161	26%	806	940	725
	Methode 2	-100%	5	605	-	244	854	226	36%	1'131	1'018	803
Kompensation statt Dekarbonisierung vor Ort	über MyClimate	0%	448	180	57	-	685	57	9%	287	216	-
	über europ. Emissionshandel	0%	448	180	161	-	789	161	26%	805	216	-
Dekarbonisierungsstrategie bei Preisen von 2018 für fossile Energieträger +20% und CO ₂ -Kompensation Europa CHF 100												
Weiter wie bisher (keine Dekarbonisierung)		0%	538	180	-	-	717				216	
Teildekarbonisierung ohne CCS, PSW und Staumauererhöhung)	Methode 1	-66%	6	180	-	373	559	-159	-22%	-794	663	447
	Methode 2	-66%	6	503	-	12	522	-196	-27%	-979	618	403
Teildekarbonisierung ohne CCS, mit PSW und Staumauererhöhung	Methode 1	-66%	6	180	-	482	668	-50	-7%	-249	794	578
	Methode 2	-66%	6	503	-	121	631	-87	-12%	-434	749	534
Vollständige Dekarbonisierung ohne PSW und Staumauererhöhung	Methode 1	-100%	6	180	-	495	681	-36	-5%	-182	810	594
	Methode 2	-100%	6	605	-	12	623	-94	-13%	-469	741	525
Vollständige Dekarbonisierung mit PSW und Staumauererhöhung	Methode 1	-100%	6	180	-	604	790	73	10%	363	940	725
	Methode 2	-100%	6	605	-	244	855	138	19%	688	1'018	803
Kompensation statt Dekarbonisierung vor Ort	über europ. Emissionshandel	0%	538	180	201	-	919	201	28%	1'006	216	-

Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

- Die Dekarbonisierung Graubündens erhöht die **Resilienz der Volkswirtschaft**. Denn durch die Eigenproduktion der Energie kann sich Graubünden von den internationalen Energiemärkten abkoppeln. Falls dies nicht gewünscht ist, wird die Volkswirtschaft dennoch resilienter gegenüber den schwankenden globalen Energiepreisen, da sie nun gleichzeitig Im- und Exporteur ist. Eine Kostensteigerung auf den Importen würde einer Ertragssteigerung auf den Exporten gegenüber stehen und so das Nettoergebnis stabil halten. Bei international sinkenden Preisen, bleiben jedoch die Gestehungskosten in Graubünden bestehen.
- 'Last but not least' führt die Dekarbonisierung der Volkswirtschaft Graubünden aus der **Abhängigkeit** von erdöl-/erdgasproduzierender Länder. Wenn man sich vor Augen führt,

dass viele dieser Länder – gerade wegen ihres Rohstoffreichtums (‘Resource curse’⁶⁰) – Mühe bekunden, die Korruption und diktatorische Systeme zu bekämpfen und funktionierende Rechtsstaaten aufzubauen, so trägt eine Dekarbonisierungsstrategie vermutlich auch zu einer gerechteren und friedfertigeren Welt bei. Dies nur so am Rande bemerkt, da die vertiefte Ausführung dieses Aspektes den Rahmen unserer Studie sprengen würde.

6.4 Entwicklung der Marktpreise für Strom

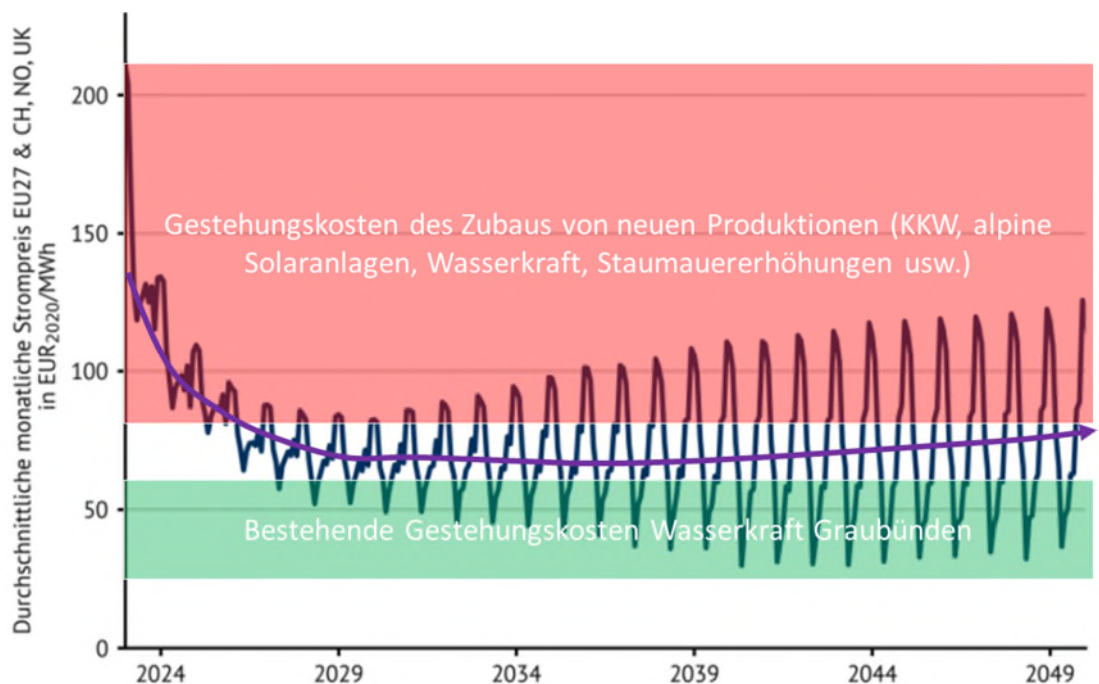
Tiefe Preise im Sommer, hohe im Winter als Referenzszenario

Im obigen Abschnitt haben wir rein aus Sicht der Gestehungskosten argumentiert. Denn volkswirtschaftlich sind die Vollkosten relevant. Ob eine Stromproduktion aber marktwirtschaftlich in Wert gesetzt und damit aus Sicht von einzelnen Investoren rentabel umgesetzt werden kann, hängt von den Marktpreisen ab. Diese wiederum sind abhängig von Angebot und Nachfrage einerseits und vom Marktdesign im relevanten Marktgebiet andererseits.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Staaten ihr Strommarktdesign so auslegen werden, dass sie in der Lage sind, ihre Versorgungseinrichtungen zu erstellen und zu betreiben. Wenn ein Staat jedoch das Strommarktdesign verändert, kann dies Rückkoppelungen auf die Märkte in Nachbarstaaten haben, die am gleichen Stromnetz hängen (siehe Deutschland in den letzten 20 Jahren).

Abbildung 33

Monatliche Grundlast-Preise im Durchschnitt gemäss Szenario EU Energy Outlook Central



Quelle: Energy Brainpool, 2021

Allgemein wird derzeit davon ausgegangen, dass die Strompreise im für die Schweiz relevanten Marktgebiet (Frankreich, Italien, Deutschland, Österreich, Schweiz) im Sommer sehr tief liegen werden, da viel Solarenergie verfügbar sein wird. Gleichzeitig geht man davon aus, dass das Stromangebot im Winter eher knapp bleibt und damit die Preise hoch sein werden. Die Energy Brainpool beispielsweise zeigt ein Grundszenario mit Sommerpreisen von rund 4

⁶⁰ In der politischen Literatur wird oft vom Fluch der Ressourcen (‘resource curse’ oder ‘paradox of plenty’) gesprochen. Gemeint sind Länder mit hohem Reichtum an natürlichen Ressourcen, die jedoch nicht in der Lage sind, Wohlstand für die Bevölkerung zu schaffen. Die Wissenschaft sucht nach Erklärungen für dieses Paradoxon. Vermutet werden das Konfliktpotenzial zur Ausbeutung der Ressourcen sowie die Möglichkeit von kleptomanischen Regimes, sich aufgrund der Ressourcenrente an der Macht zu halten auch ohne wirtschaftliches Wachstum.

Rp./kWh und Winterpreise von 11-13 Rp./kWh im Winter, welches diese grundsätzlichen Erwartungen in konkreten Zahlen wiedergibt.

Bei einem solchen Preisszenario müsste sichergestellt werden, dass die zugebaute Stromproduktion bei mittleren jährlichen Gestehungskosten von 6-9 Rp./kWh zu liegen kommt, um einigermaßen wettbewerbsfähig zu sein. Vermutlich braucht es für Pumpspeicherung und einen Teil der Winterproduktion auch die Abgeltung von Reservekapazitäten im Marktdesign.

6.5 Volkswirtschaftliche Logik vs. Logik der Einzelnen

Was für die gesamte Volkswirtschaft gut ist, muss nicht für jeden Einzelnen auch rentabel sein

Wir haben aufgezeigt, dass die Dekarbonisierung Graubündens nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch erstrebenswert ist, weil der Wegfall der Importkosten für fossile Energieträger die Mehrkosten für die Dekarbonisierung gesamthaft weitgehend kompensiert. Diese Schlussfolgerung gilt für die Volkswirtschaft Graubündens als Ganzes, jedoch leider nicht für jeden einzelnen Akteur. Zudem ist für die einzelnen Akteure auch nicht nur wichtig, ob die Dekarbonisierung sich rentabilisieren lässt, sondern auch, ob sie über die notwendige Liquidität verfügen, um rasch in den Umstieg investieren zu können.

Hier kommt die Politik ins Spiel, die mit Liquidität, Lenkungsabgaben und Zuschüssen versuchen muss, die individuelle Situation und Optik der Akteure mit der gesamten volkswirtschaftlichen Logik in Übereinstimmung zu bringen. Dazu zwei typische Beispiele:

- **Beispiel 1 Pumpspeicherkraftwerk Lago Bianco:** Das Pumpspeicherkraftwerk Lago Bianco wird vermutlich gebraucht, wenn in der Schweiz 40 TW Leistung an Solarkraft zugebaut werden, um einen Teil der Energie (sei es auch nur im Winter über die Mittagszeit) kurzfristig für die Randstunden oder für die Nacht zu speichern. Weil aber sehr unsicher ist, wie die tatsächlichen Marktbedingungen für ein Pumpspeicherkraftwerk in der Zukunft aussehen, handelt es sich um ein hohes Investitionsrisiko für eine einzelne Firma, weshalb die Investition allenfalls nicht getätigt wird. Der Staat kann dieses Dilemma auffangen, indem er ein solches Projekt beispielsweise mit bedingt rückzahlbaren Darlehen ermöglicht. Sofern das Pumpspeicherwerk künftig profitabel betrieben werden kann, müssen die Darlehen zurückbezahlt werden. Wenn dies nicht möglich ist, verzichtet der Staat auf die Rückzahlung. Zur Finanzierung der Darlehen, kann der Staat Lenkungsabgaben, Systemabgaben usw. erheben.
- **Beispiel 2 Photovoltaikanalage auf Eigenheim:** Wenn ein EFH-Besitzer bereits eine Wärmepumpe in Betrieb hat und nachträglich den Strom über eine PV-Anlage beziehen möchte, dann muss er damit rechnen, dass der Strom gleich teuer oder sogar teurer wird, als wenn er diesen am Markt beschafft. Die Rechnung hängt massgeblich davon ab, ob der EFH-Besitzer von den Netzkosten entlastet wird und zu welchem Preis er den nicht selbst verwendeten Strom einspeisen kann. Die Rechnung, welche gesamtvolkswirtschaftlich attraktiv ist, kann im Einzelfall negativ ausfallen, wenn nicht gleichzeitig die Ausgaben für fossile Energieträger bei der gleichen Person eingespart werden können. Wenn der gleiche EFH-Besitzer gleichzeitig mit der Montage der PV-Anlage die Gas-/Ölheizung ersetzen muss, weil sie am Lebensende ist oder sein Verbrenner-Auto gegen ein elektrisches Fahrzeug eintauscht, kann er von den Einsparungen beim Heizöl und Diesel/Benzin profitieren und seine Rechnung wird eher aufgehen. Auch hier kann der Staat die Anreize optimieren, indem er den nicht benötigten Strom zu Gestehungskosten einspeisen lässt und so die Kosten des Einzelnen auf die Gesamtheit der Stromkonsumierenden verteilt.

In der Energiepolitik kennen wir bereits heute eine Vielzahl staatlicher Hilfen und es ist anzunehmen, dass das Instrumentarium für die Dekarbonisierung Europas, der Schweiz und Graubündens noch weiterentwickelt werden wird. Dass aus Sicht der Volkswirtschaft Graubün-

dens die Dekarbonisierung gesamtwirtschaftlich (auch ohne Berechnung von externen Effekten) sinnvoll ist, **schaft die unmittelbare wirtschaftliche Legitimität für den Einsatz von politischen Steuerungs- und Umverteilungsinstrumenten.**

Vereinfachend zusammengefasst:

1. Die Kosten für die Energieproduktion werden je nach Annahmen nach einer Dekarbonisierung Graubündens ähnlich ausfallen oder etwas höher liegen als heute, aber ein wesentlicher Teil der Erträge bleibt in Graubünden, wodurch das BIP in jedem Szenario wesentlich gestärkt wird.
2. Im Unterschied zu den Ausgaben für den Import von fossilen Energieträgern begünstigen die Ausgaben für die Dekarbonisierung die einheimische Wirtschaft, womit ein volkswirtschaftliches Wachstum angetrieben wird.
3. Aus volkswirtschaftlicher Gesamtsicht ist die Dekarbonisierung nicht nur akzeptabel, sondern sogar wirtschaftlich rasch möglichst erstrebenswert.
4. Auch wenn die Dekarbonisierung gesamtwirtschaftlich vorteilhaft ist, kann es sein, dass die Rechnung für bestimmte Akteure im Einzelnen nicht aufgeht. Die Aufgabe der Energieförderpolitik ist deshalb, mit Lenkungsabgaben, Liquidität und Subventionen die Rentabilität, welche für die gesamte Volkswirtschaft gegeben ist, auch für die einzelnen Akteure und ihre Projekte sicherzustellen.

7 Wie schnell ist der Plan umsetzbar?

7.1 Zeitlicher Ablauf

Sofort die erneuerbare Stromproduktion ausbauen, fortlaufend Heizungen und Fahrzeuge ersetzen. Dann abscheiden.

Im zeitlichen Ablauf sollten zunächst diejenigen Massnahmen umgesetzt werden, wo reife Technologien bestehen und eine rasche Umsetzung machbar ist. Dazu gehören in erster Priorität der Zubau von erneuerbarer Stromproduktion (Wasser-, Wind- und Solarkraft). Denn alle Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen helfen nicht, dem Ziel 'Netto-Null' näherzukommen, wenn sie nicht mit erneuerbarem Strom betrieben werden. Die Technologien sind vorhanden, die Kosten und Machbarkeit klar. Der Zubau kann deshalb, wenn der politische Konsens besteht, sofort umgesetzt werden. Während die Dachflächen bereits heute rasch mit PV belegt werden könnten, braucht es eine Beschleunigung des Baus von Solaranlagen auf Infrastrukturen und eine politische Klärung bezüglich der Rolle von Windparks und alpinen Solarparks.

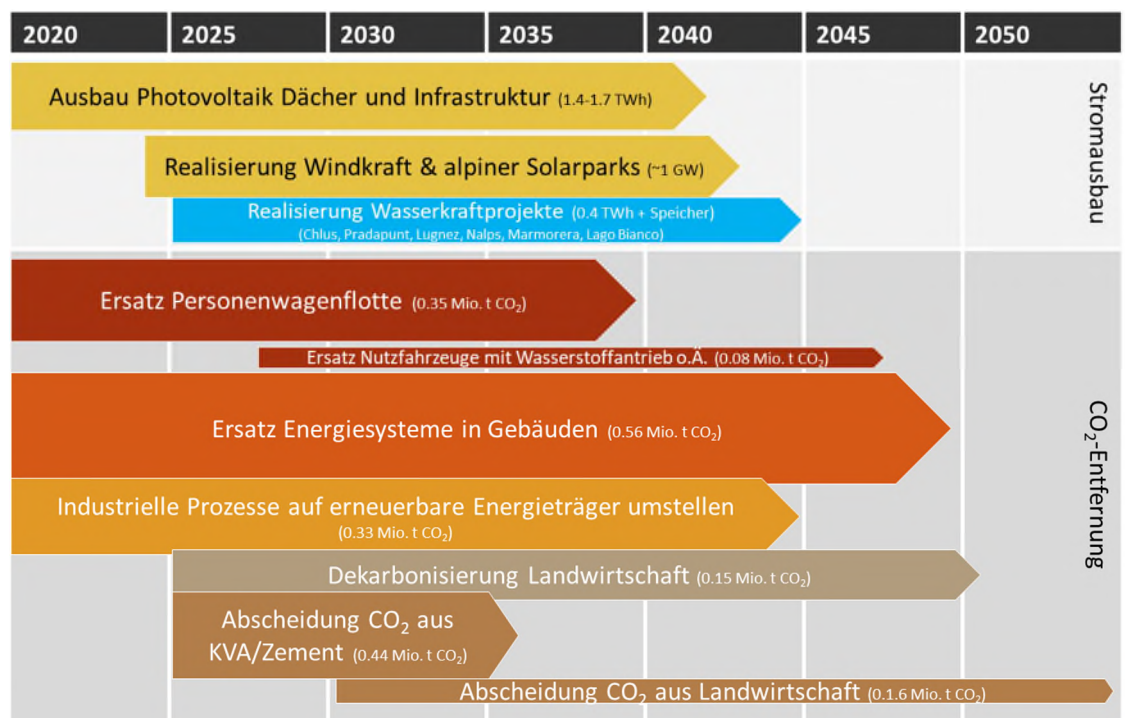
In zweiter Priorität sollte die Fahrzeugflotte umgestellt werden, da auch hier die Technologie vorhanden ist und innert 25 Jahren in der Schweiz ohnehin der gesamte Wagenpark umgesetzt wird. Die Hürden für die Inbetriebsetzung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren müssten deshalb rasch erhöht werden.

Als dritte Priorität sind die Heizungen und Warmwasseraufbereitung im Gebäudepark zu ersetzen sowie der Energiebedarf der Gebäude durch bessere Dämmung zu reduzieren. Weil hier Investitionszyklen über 30 – 40 Jahre gehen, wird die Umstellung langsamer voranschreiben als bei der Fahrzeugflotte.

Schliesslich sind die industriellen Prozesse umzustellen sowie die nicht eliminierbaren CO₂-Emissionen aus Landwirtschaft und Industrie abzuscheiden. Die Abscheidung des restlichen CO₂, die Reduktion des CO₂ in der Landwirtschaft und teilweise in der Industrie erfordern vermutlich noch weitere technologisch und prozessuale Innovation. Es ist jedoch absehbar, dass diese Technologien, insbesondere für KVA und Zementwerk in einigen wenigen Jahren zur Verfügung stehen werden.

Abbildung 34

Die zeitliche Abfolge der wesentlichen Massnahmen



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden

Unabhängig davon, welche Massnahmen zuerst und welche später getroffen werden, braucht es, um das Ziel der Dekarbonisierung bis im Jahr 2050 zu erreichen eine wesentliche Beschleunigung aller Efforts.

7.2 Umrüstung des Verkehrs

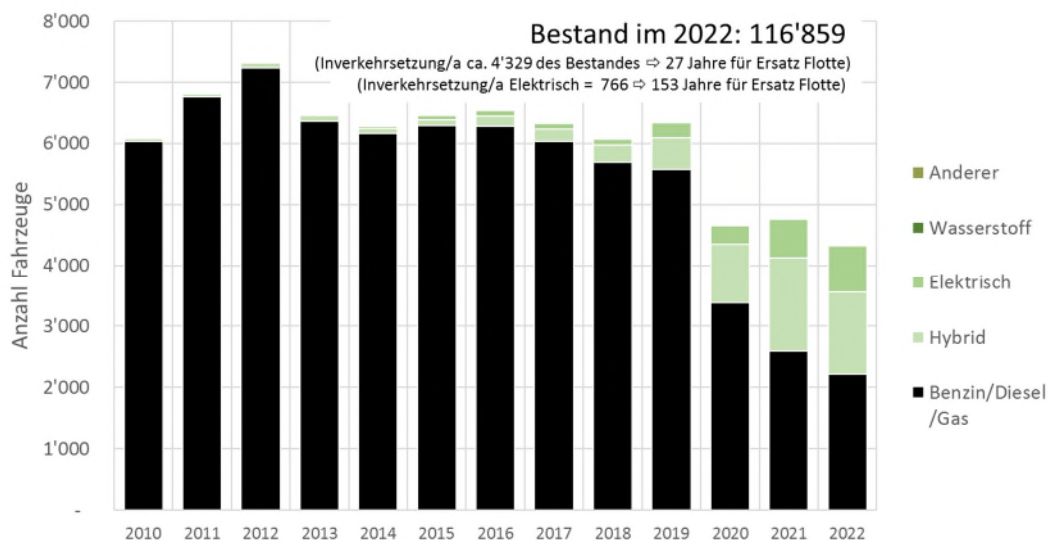
Deutliche Erhöhung des Tempos nötig

Ein Blick auf die Zulassung von Personen-Motorfahrzeugen in Graubünden zeigt, dass für den Ersatz sowohl von Personen- wie auch Nutzfahrzeugen noch ein langer Weg zu gehen ist. Erst in den letzten drei Jahren haben Hybrid- und Elektrofahrzeuge einen nennenswerten Anteil an den Neuzulassungen gewonnen. Das Tempo muss wesentlich erhöht werden, wenn der Verkehr in Graubünden bis 2050 dekarbonisiert werden soll.

Im Bereich der **Personenwagen** hat die Zulassung von Elektrofahrzeugen an Dynamik gewonnen. Nun ist eine breite Auswahl an Elektrofahrzeugen im Markt vorhanden und es ist sehr wahrscheinlich, dass die Anteile von hybriden und Elektrofahrzeugen rasch ansteigen werden. Aus Sicht des Staates dürfte es künftig insbesondere darum gehen, die Neuzulassung von Fahrzeugen mit Verbrennermotoren zu erschweren, beispielsweise indem die Motorfahrzeugsteuer mit einer Lenkungsabgabe ergänzt wird.

Abbildung 35

Inverkehrsetzung von Personenwagen in Graubünden

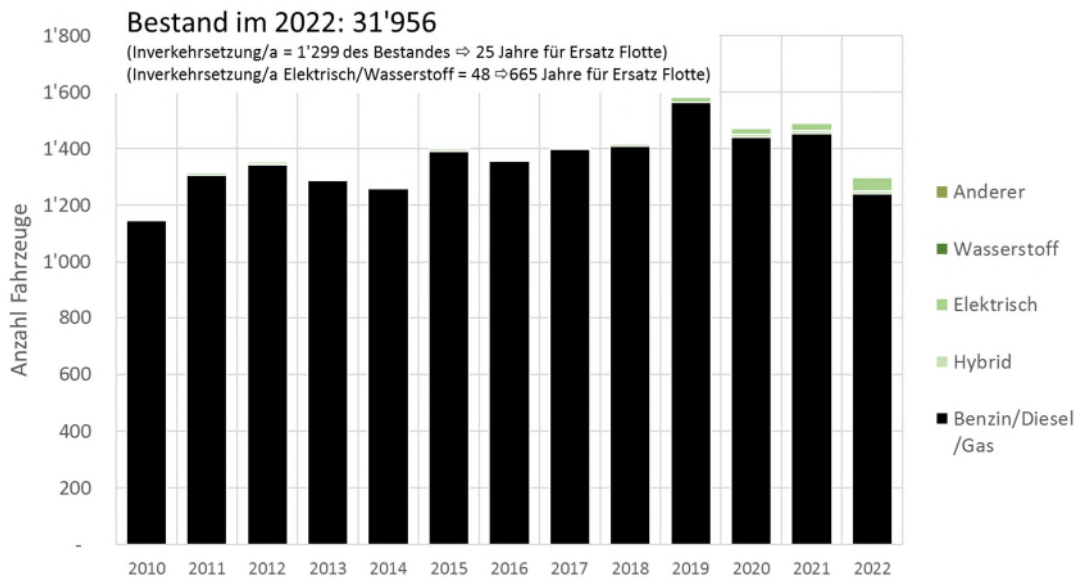


Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden basierend auf BFS

Im Bereich der **Nutzfahrzeuge** zeichnet sich bisher keine wesentlich Dynamik für den Umstieg von Verbrennermotoren auf erneuerbare Antriebe ab. Rein statistisch scheint die Entwicklung 10 Jahre im Rückstand gegenüber den Personenfahrzeuge zu liegen. Hier bilden vermutlich noch nicht breit verfügbare Fahrzeugalternativen die wesentliche Umstiegshürde. Weiter fehlt insbesondere im Bereich des Wasserstoffantriebs eine notwendige alternative Versorgungslogistik. So gesehen bietet sich an, den Umstieg bei den Personenwagen nun mit staatlichen An- und Abreizen zu forcieren und im Bereich der Nutzfahrzeuge zu klären, welche Bereiche der Logistik vor Ort gelöst werden müssen und wo der Staat dazu Lösungen und Hilfen beitragen kann.

Abbildung 36

Inverkehrsetzung von Nutzfahrzeugen in Graubünden



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden basierend auf BFS

7.3 Umrüstung der Wärmeerzeuger in Gebäuden

Deutliche Erhöhung des Tempos nötig

Im Bereich der Umrüstungen der Gebäudeheizungen und Aufbereitung des Warmwassers ist Graubünden ein Schritt weiter als im Verkehr. Die Neubauten seit 2006 werden bereits zu 70 – 85% mit erneuerbaren Energiesystemen ausgerüstet. In den letzten 20 Jahren wurden pro Jahr rund 300 Heizungen von Heizöl/Erdgas auf erneuerbare Energien umgerüstet. Wenn man bis 2050 den gesamten Immobilienbestand umrüsten will, muss man pro Jahr jedoch rund 1'000 Gebäude umrüsten sowie im Neubau eine Quote von 100% erreichen.

Wenn man von einem Investitionszyklus von 25 – 35 Jahren für die Heizung ausgeht, bestünde im Gebäudealtbestand von Graubünden ein Potenzial für den jährlichen Zubau und Ersatz von erneuerbaren Heizsystemen von rund 2'000 – 2'800 Heizsystemen pro Jahr. Das bedeutet, auch ohne Forcierung des Investitionszyklus könnten wesentlich mehr Heizsysteme pro Jahr umgestellt werden.

Die Statistiken zeigen weiter, dass der Altbestand an Mehrfamilienhäusern den Einfamilienhäusern in der Umrüstung hinterherhinkt. Dies bestätigt die Beobachtungen, dass insbesondere in Mehrfamilienhäusern mit Stockwerkeigentum die Umrüstungsentscheide zugunsten von erneuerbaren Energiesystemen schwerfälliger sind.

Zwar hat die Anzahl der Umrüstung gemäss Aussagen des AEV in den letzten Jahren merklich zugenommen. Dennoch, wenn Graubünden bis 2050 dekarbonisieren will, braucht es also auch bei der Ausrüstung von Neubauten und der Umrüstung von Altbauten eine eindeutige Beschleunigung.

Wir gehen davon aus, dass die privaten Haushalte insbesondere aus den folgenden Gründen nicht bzw. nur langsam umrüsten:

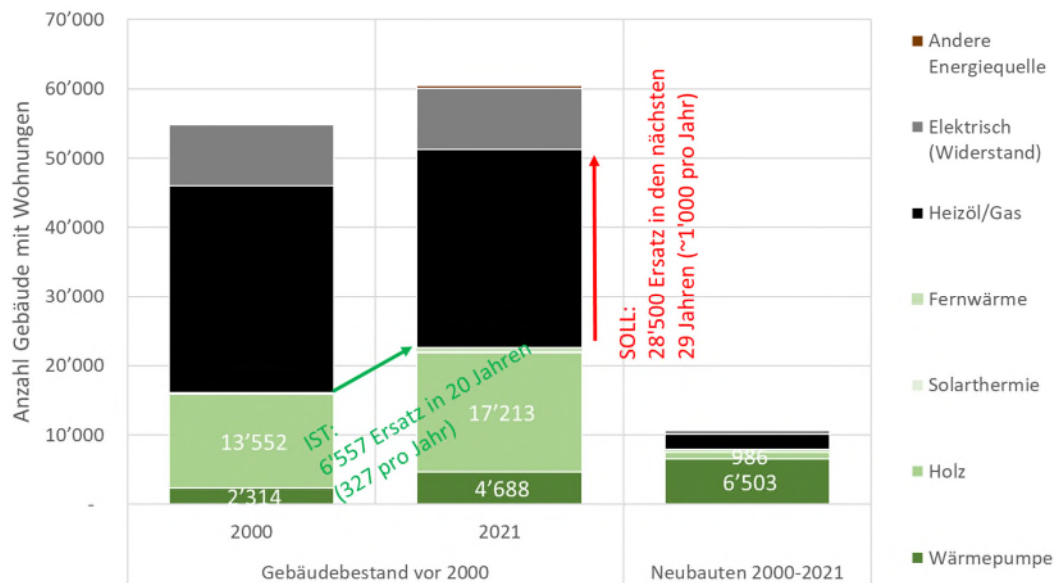
- Erstens muss eine gewisse Trägheit überwunden werden, denn die eigebauten Energiesysteme laufen relativ kostengünstig und ohne Probleme.
- Zweitens bedeutet eine Umrüstung von Öl auf Wärmepumpe oder andere erneuerbare Energien eine Investition von CHF 40'000 – 60'000 pro Haushalt. Auch wenn diese Investition rechnerisch rentabel ist, weil die Abschreibungen und Betriebskosten für das neue System unwesentlich höher sind als der Betrieb einer Ölheizung, stellt sich dennoch die Frage der vorhandenen Liquidität bzw. des Verschuldungswillens der Eigentümer zum Zeitpunkt der Umrüstung.

- Drittens ist bekanntlich in Mehrfamilienhäusern mit Stockwerkeigentum die Entscheidungsfindung nicht ganz einfach.

Beim Liegenschaftsbestand stellt sich die Frage ob Anreize in Form von Subventionen genügen, um eine raschere Umrüstung voranzutreiben. Rein ökonomisch dürften die Anreize auf absehbarer Zeit nicht stark sein. Denn die Strompreise (für Wärmepumpen) sind relativ stärker gestiegen als die Ölpreise. Wir gehen davon aus, dass eine Beschleunigung der Umrüstung gewisse zeitliche Vorgaben für die Umrüstung voraussetzen. Denkbar wäre, statt nur die Umrüstung zu unterstützen, den Verzicht auf die Umrüstung zu verteuern oder sogar die Umrüstung in einem bestimmten Zeitraum vorzugeben.

Abbildung 37

Heizungen in Gebäude mit Wohnungen in Graubünden



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf BFS (Der höhere Bestand an Gebäuden 2000 im 2021 gegenüber 2000 ist auf eine unterschiedliche Zählungsmethode (Volkszählung statt Gebäuderegister) zurückzuführen.)

7.4 Ausbau der Solar- und Windkraft-Anlagen

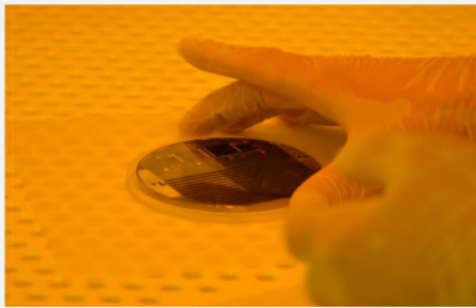
Deutliche Erhöhung des Tempos nötig

Wir gehen von einem Potenzial in der Grössenordnung von 1.4 TWh Stromproduktion auf Dachflächen sowie von einem Potenzial von 1.3 TWh Windstrom in Graubünden aus. Hinzu kommen vielfältige Potenziale für PV-Anlagen auf Infrastruktur und in alpinen Solarparks. Insgesamt zeigt unsere Schätzung des Strombedarfs zudem einen Gesamtbedarf von rund 2 TWh aus Solar- und Windkraft für die Dekarbonisierung Graubündens.

Die bisherigen Schätzungen in der Literatur basieren auf den heutigen Wirkungsgrad der Photovoltaik (monokristalline Zellen mit ca. 20-24% Wirkungsgrad). Aktuelle Forschungsergebnisse lassen hingegen erwarten, dass die Stromausbeute pro Fläche bereits in absehbarer Zeit mit Tandemzellen wesentlich gesteigert werden kann, bis zum Faktor 2. Weitere Ideen für die Verbesserung der Solarzellentechnologien sind in der Erforschung. Entsprechend kann man davon ausgehen, dass die Stromausbeute der PV-Anlagen künftig deutlich erhöht werden kann.

Info-Box: Fraunhofer ISE entwickelt effizienteste Solarzelle der Welt mit 47,6 Prozent Wirkungsgrad (30.05.2022)

«(...) Forscherinnen und Forschern am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE ist es gelungen, mit Hilfe einer neuen Antireflexbeschichtung die Effizienz der bisher besten Vierfachsolarzelle von 46,1 auf 47,6 Prozent bei 665-facher Sonnenkonzentration zu erhöhen. Ein Meilenstein, denn es gibt gegenwärtig keine effizientere Solarzelle auf der Welt. (...) Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK soll erstmals eine Solarzelle mit 50 Prozent Wirkungsgrad entstehen. Hierzu wird jede einzelne Schicht der komplexen Mehrfachsolarzellen noch einmal weiter optimiert und prozess-technologische Verbesserungen an den Metallkontakten sowie verbesserte Antireflexionsschichten eingebaut. (...) Es handelt sich hierbei um eine obere Tandemsolarzelle aus Gallium-Indium-Phosphid (GaInP) und Aluminium-Gallium-Arsenid (AlGaAs), die von Soitec auf eine untere Tandemsolarzelle aus Gallium-Indium-Arsenid-Phosphid (GaInAsP) und Gallium-Indium-Arsenid (GaInAs) gebondet wurde.



Quelle: Fraunhofer ISE⁶¹ / Nahaufnahme einer Tandemzelle

Derzeit produziert Graubünden aus Solar- und Windkraft rund 100 GWh.⁶² Der jährliche Zubau betrug in den letzten 10 Jahren rund 100 GWh bzw. 10 GWh pro Jahr. Mit dieser Zubaurate würde die benötigte Produktion von 2 TWh im Jahr 2213! erreicht. Umgekehrt gesprochen, müsste Graubünden um 2 TWh im Jahr 2050 zu erreichen, jährlich Solar- und Windkraft von rund 70 GWh pro Jahr zubauen, also 7x mehr als in den letzten 10 Jahren. Es ist offensichtlich, dass die Zubaurate markant erhöht werden muss. Das beste Mittel dazu ist insbesondere die Installation von grossen Anlagen auf Industrie und Infrastruktur. Um die installierte Leistung rasch zu erhöhen, bieten sich folgende Lösungen an:

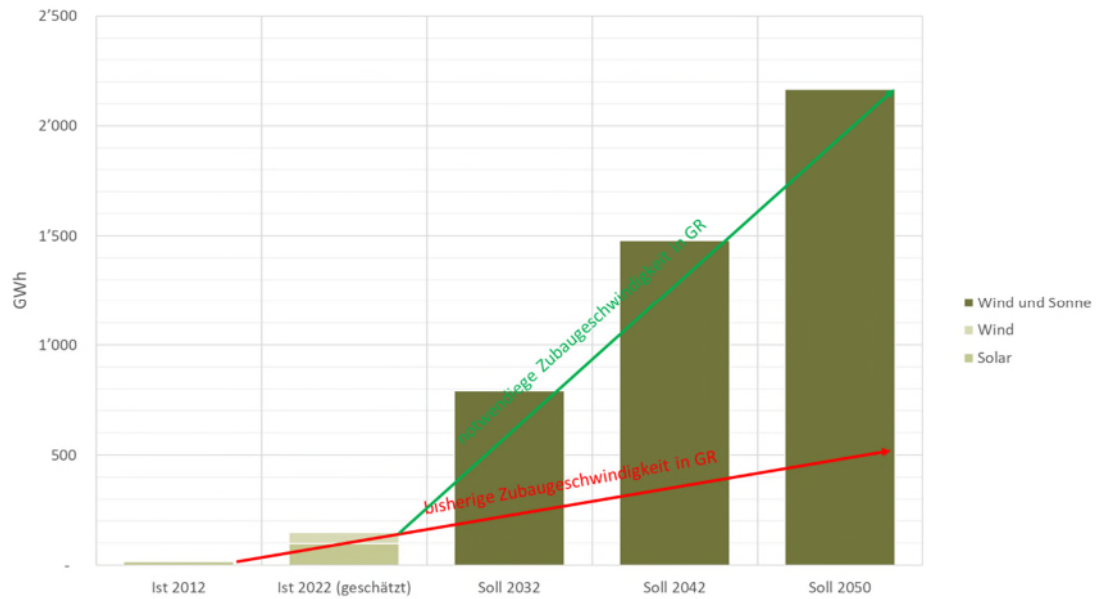
- Neubauten müssen die Dachfläche weitgehend mit PV-Modulen bedecken. Wer seine geeignete Dachfläche nicht nutzen will/kann (Steinplatten, Denkmalschutz), muss die entsprechende Modulfläche bei einer PV-Anlage auf Infrastruktur einkaufen.
- Verfügbare, geeignete Dachflächen müssen mit PV-Modulen (in einem vernünftigen Ausmass) bis zu einem bestimmten Zeitpunkt belegt werden. Die entsprechenden Investitionskosten werden durch staatlich verbürgte Darlehen zur Verfügung gestellt.
- Eine bestimmte noch festzulegende Anzahl alpiner Solar- und Windparks wird mit Blick auf die Winterstromproduktion umgesetzt.

⁶¹ <https://www.axpo.com/ch/de/energiewissen/solarenergie.html>

⁶² <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/fraunhofer-ise-entwickelt-effizienteste-solarzelle-der-welt-mit-47-komma-6-prozent-wirkungsgrad.html>

Abbildung 38

Stromproduktion in Graubünden aus Solar- und Windkraft



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf AEV und VESE

Vereinfachend zusammengefasst:

1. Um Graubünden bis im Jahr 2050 zu dekarbonisieren, muss die Geschwindigkeit der Umrüstung des Fahrzeugparks sowie der Energiesysteme in Gebäuden wie auch des Zubaus von Solar- und Windkraft beschleunigt werden.
2. Um diese Beschleunigung zu erreichen, muss die Trägheit der Akteure überwunden werden. Statt lediglich mit Subventionen für die Umsetzung von Projekten Anreize zu setzen, sollte der Verzicht auf den Umstieg verteuert werden. Weiter ist im Bereich der Energiesysteme im Gebäude (Heizung, Warmwasser und PV-Anlagen) zu prüfen, ob zeitliche Vorgaben für die Umrüstung gemacht werden sollten. Mit der Vergabe von staatlichen Bürgschaften, könnte zudem die Finanzierung der Umrüstung vereinfacht werden.
3. Schliesslich ist nach heutiger Einschätzung davon auszugehen, dass Graubünden einen wesentlichen Teil der neuen erneuerbaren Energie aus alpinen Solar- und Windparks beschaffen muss. Es braucht deshalb eine politische Aushandlung wie viele und welche dieser Parks umgesetzt werden sollen.

8 Abgleich mit dem Aktionsplan Green Deal

Im Kanton Graubünden ist seit Herbst 2021 die erste Etappe des «Aktionsplans Green Deal» (AGD) beschlossene Sache. Ungefähr Ende 2023 soll die zweite Etappe des AGD in den grossen Rat kommen. Wir wollen an dieser Stelle noch kurz zeigen, wie der AGD zu unseren Überlegungen steht.

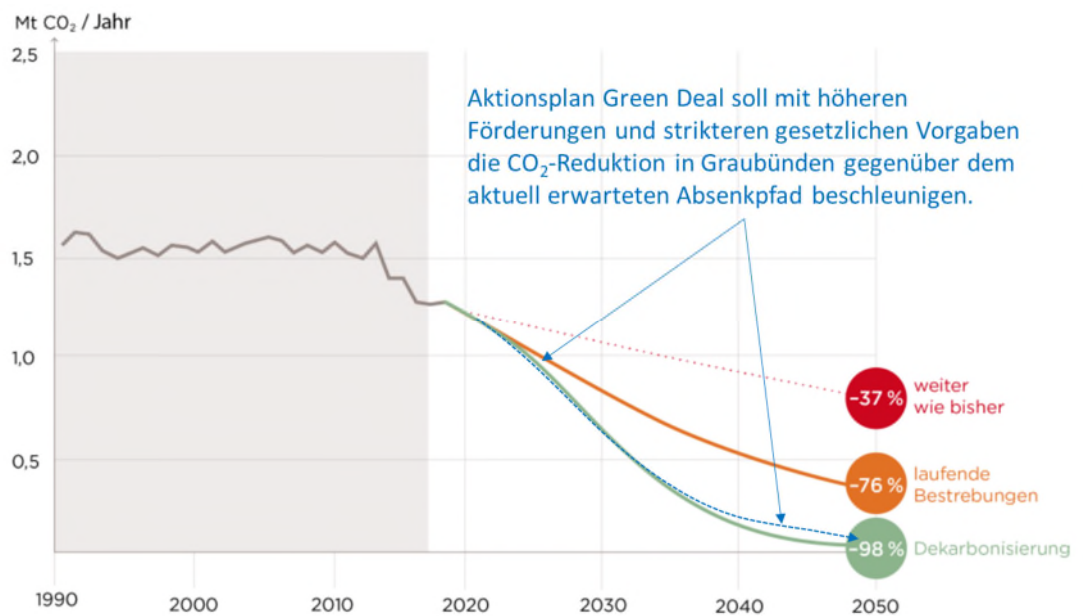
8.1 Was ist der Aktionsplan Green Deal

Aktuelle Bestrebungen zur Reduktion des CO₂ sollen verstärkt werden.

Der Aktionsplan Green Deal ist ein Programm des Kantons Graubünden, um in Graubünden die Reduktion der CO₂-Emissionen gegenüber den heutigen Bestrebungen durch An-/Abreize, Ge-/Verbote sowie Förderungen von Bund und Kanton zu verstärken und zu beschleunigen. Zudem sollen Anpassungen an Auswirkungen des Klimawandels unterstützt werden.

Abbildung 39

Szenarien für die CO₂-Reduktion gemäss Aktionsplan Green Deal und Rolle des Aktionsplans Green Deal



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf Aktionsplan Green Deal (2021)

Der Aktionsplan Green Deal geht von der Zielsetzung aus, dass Graubünden bis 2050 das Ziel von Netto-Null erreicht. Im Kern handelt es sich beim Aktionsplan Green Deal um ein Programm, welches einerseits eine Vielzahl von Anreizen und Förderinstrumenten und andererseits für die Finanzierung dieser Förderinstrumente eine Mischung aus Steuern und neu einzuführenden Abgaben vorsieht.

Eine erste Etappe des AGD mit Kosten von rund CHF 68 Mio. wurde im 2021 durch den Grossen Rat beschlossen. Sie umfasst insbesondere Massnahmen, die ohne Gesetzesänderungen umgesetzt werden konnten. Beispielsweise werden auch bestehende Förderinstrumente stärker dotiert bzw. die Förderhöhen erhöht oder Fördervorgaben justiert um einen grösseren Anreiz auszulösen. Die Abbildung 40 zeigt die Massnahmenfelder der ersten Etappe in der Übersicht.

Abbildung 40

Massnahmen des AGD Etappe I (Total in Mio. Franken). In kursiver Schrift diejenigen Massnahmen, welche zu den Green-Deal-Massnahmen des Regierungsprogramms 2021–2024 hinzukommen.

ES oder ID	Bezeichnung	Total
ES 8.3	Klimaschutz in der Landwirtschaft	5.55
ES 8.2	Ausbau erneuerbarer Energien	26.10
Total ES 8 (Gemäss RP 2021-2024 sonderfinanziert)		31.65
KS.E-1.1	<i>Förderung erneuerbare Stromproduktion, besonders Winterstromproduktion</i>	6.00
KS.G-1.1	<i>Gebäudeparktransformation forcieren mit ergänzten Energievorschriften und justierter finanzieller Förderung</i>	12.00
KS.E-1.2	<i>Entwicklung erneuerbarer Fernwärme und -kälte</i>	6.00
Verstärkte Förderung für den Ausbau der erneuerbaren Energien und für die Effizienzsteigerung sowie Substitution im Gebäudepark		24.00
KS.V-1.1	<i>- Beiträge an Massnahmen zur Förderung des ÖV</i>	1.50
Förderung ÖV	<i>- Investitionsbeiträge an Infrastrukturen/Busanlagen</i>	1.50
	<i>- Investitionsbeiträge an Infrastrukturen des ÖV</i>	3.00
KS.V-1.2	<i>Stärkung Schienengüterverkehr (Förderung der Verlagerung des Güterverkehrs von der Strasse auf die Schiene)</i>	6.00
Verstärkte Investitionsbeiträge für öffentlichen Verkehr und Güterverkehr		12.00
Total AGD Etappe 1		67.65

Quelle: Regierung des Kantons Graubünden (2021)

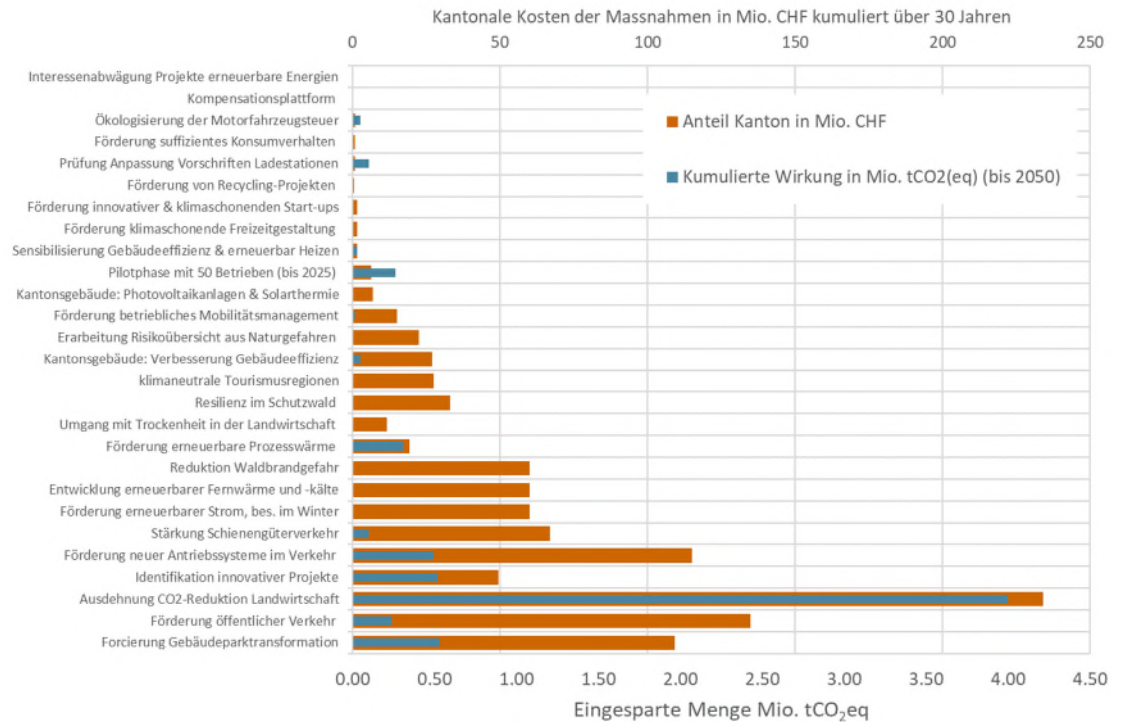
In der Etappe II will der Kanton Graubünden Massnahmen umsetzen, welche gesetzliche Anpassungen erfordern oder technisch nicht sofort umgesetzt werden können. Der Kanton rechnet mit einem kantonalen Mittelbedarf von CHF 1 Mrd. in einem Zeitraum von 30 Jahren. In Abbildung 41 werden die Massnahmen dargestellt, für welche die Mittel des Aktionsplans Green Deal (I und II Etappe) insgesamt eingesetzt werden sollen:

- Mehr als die Hälfte der Mittel fliessen in die beiden Bereiche **Gebäude und Verkehr**. Im Gebäudebereich dient die Unterstützung der Transformation des Gebäudeparks und ist entsprechend gut eingesetzt wie vorstehende Ausführungen zeigen. Im wesentlichen werden bereits bestehende Förderangebote deutlich ausgebaut, was auch im Sinne der Effizienz zu begrüssen ist, da keine neuen Subventionsgefässe geschaffen werden und sich so die notwendige Administration in Grenzen hält.
- Im **Verkehr** sollen die Mittel in den Ausbau des öffentlichen Verkehrs und der Verlagerung des Gütertransports auf die Schiene eingesetzt werden. Grundsätzlich ist das nachvollziehbar. Wir befürchten aber, dass der Umstiegseffekt bzw. die Einsparung von CO₂ pro eingesetztem Investitionsfranken mit den im Green Deal vorgesehenen Verbesserungen (im Vergleich zu anderen Massnahmen) nicht sehr gross sein wird.
- Der AGD investiert weiter in den Bereichen **Landwirtschaft** und Industrie, was grundsätzlich ebenfalls für wichtige CO₂-Einsparungen sorgt.
- Für die **Energiemehrproduktion** sollen primär erneuerbare Energien, hauptsächlich im Winter, besser ausgenutzt werden und mehr Fernwärme und -kälte verwendet werden. Grundsätzlich sind die Ansätze zweckmässig, werden aber wohl kaum ausreichen, um den Energiemehrbedarf zu decken, welcher bei einem Ausstieg aus der Kernkraft, einem Verzicht auf weitere Importe und einer Abscheidung des restlichen CO₂ vor Ort benötigt würde. Dies gilt jedoch nur unter der Annahme, dass weiterhin gleich viel Strom aus dem Kanton exportiert wird.

- Im Gegensatz zur Darstellung im vorliegenden Bericht, rechnet der AGD stets mit **kumulativen Werten für die CO₂-Einsparung bis 2050**. Dies generiert primär relativ hohe Einsparwerte und erschwert die Übersicht. Vorteil der Methode ist, dass Einsparpfade gezeigt werden können. Wir sind der Ansicht, dass absolute Zahlen pro Jahr die einfachere, weil verständlichere Messgrösse sind.

Abbildung 41

Massnahmen des Aktionsplans Green Deal



Quelle: Wirtschaftsforum Graubünden, basierend auf Angaben aus Aktionsplan Green Deal

Die entsprechenden Mittel sollen durch einen Bündner Klimafonds bereitgestellt werden. Dieser Klimafonds soll aus Steuern sowie zusätzlichen Abgaben (z.B. Stromabgaben, CO₂-Abgabe auf Wohneigentum, CO₂-Abgabe auf Fahrzeuge, Klima-Tourismusabgabe, Überschüsse kantonale Strassenrechnung) geüffnet werden. Die Finanzierung des Klimafonds über spezifische Abgaben hat den Vorteil, dass die Abgaben selber auch An- und Abreize darstellen, damit sich die Akteure möglichst Klimafreundlich verhalten.

Der Kanton wird im Laufe des 2023 die Etappe II des Aktionsplans Green Deal ausarbeiten und zur Beschlussfassung dem Grossen Rat vorlegen.

8.2 Einordnung des Aktionsplans Green Deal

Aktionsplan Green Deal sinnvoll, aber nicht vollständig

Der Aktionsplan Green Deal ist grundsätzlich eine zu begrüssende Initiative mit dem klaren Ziel der Dekarbonisierung Graubündens bis im Jahr 2050. Die darin enthaltenen Massnahmen sind - auch vor dem Hintergrund unserer Erkenntnisse zu den Notwendigkeiten und Machbarkeiten zur Dekarbonisierung Graubündens - weitgehend zielgerichtet und dürfte mithelfen, die Dekarbonisierung voranzutreiben.

Unsere Berechnung der Wirtschaftlichkeit zeigt zudem, dass die Dekarbonisierung Graubündens mit den aktuellen und absehbaren Technologien volkswirtschaftlich nicht nur sinnvoll sondern sogar erstrebenswert ist. Deshalb sind auch die vielfältigen Fördermechanismen, die im Aktionsplan Green Deal vorgesehen sind volkswirtschaftlich grundsätzlich vertretbar.

Aufgrund unserer Analyse der notwendigen Massnahmen zur raschen Dekarbonisierung Graubündens fehlen im Aktionsplan Green Deal jedoch die folgenden Themen, welche im oder ergänzend zum Aktionsplan Green Deal thematisiert werden müssen:

- **Vorgaben im Gebäudebereich, primär Heizung:** Statt mit reinen finanziellen Anreizen könnte man die Dekarbonisierung auch mit erhöhten Vorgaben im Gebäudebereich vorantreiben und dafür auf eine finanzielle Mittelumverteilung verzichten. Denn ohne klare Vorgaben scheint es uns sehr optimistisch, die zeitlichen Ziele in Graubünden erreichen zu können. Dies insbesondere, wenn die Energiepreise sich mittelfristig wieder auf das Niveau von vor dem Ukraine-Krieg einpendeln sollten. Wenn man die politische Diskussion in der Schweiz verfolgt, kann man unweigerlich feststellen, dass die Energievorschriften für Gebäude regelmässig verschärft werden.
- **Zeitliche Vorgaben und Liquidität für PV-Anlagen:** Für die Dekarbonisierung ist ein markanter Zubau von erneuerbarer Elektrizitätsproduktion notwendig. Der Zubau war bis anhin in der Schweiz und in Graubünden (mit Ausnahme der letzten beiden Jahre) eher bescheiden. Der Engpass bei den Haushalten bestand nicht nur aus fehlenden finanzielle Anreizen sondern insbesondere auch aus einer abwartenden Haltung von Liegenschaftsbesitzern, zum Teil weil kein unmittelbarer Handlungsdruck bestand und zum Teil, weil die Rentabilität und/oder Liquidität nicht gegeben ist oder die Hauseigentümer sich nicht weiter verschulden wollen. Im gewerblichen Bereich liessen insbesondere die Marktmechanismen eine Investition in Solaranlagen auf Dächern nicht rentabel umsetzen. Soll dies geändert werden stehen grundsätzlich zwei Strategien in Vordergrund: Die Hauseigentümer müssen dazu geführt werden, dass die Dächer konsequent und maximal für PV-Anlagen nutzen. Die entstehenden Stromkosten müssen durch ein geeignetes Marktdesign abgegolten werden, sei dies durch Defizitdeckung in Form von Subventionen oder Abnahmeverpflichtung der Stromverbraucher. Nebst finanziellen Anreizen braucht es künftig für die Haushalte und Unternehmen eine Kombination aus günstiger Liquidität und klaren zeitlichen Vorgaben für die Aufrüstung ihrer Dachflächen mit Photovoltaikanlagen, um die abwartende Haltung zu überwinden. Zudem muss bei der Ersellung einer PV-Anlage auf Gebäuden zwingend die gesamte nutzbare Dachfläche ausgeschöpft werden. Dadurch kann auch die Effizienz der Installation wesentlich erhöht werden und damit der Bedarf von Fachkräften pro installierten kWp deutlich reduziert werden.
- **Zubau der Elektrizitätsproduktion in Grossanlagen politisch klären:** Grossanlagen zur Energieproduktion im Bereich Windparks, Wasserkraft und PV-Freiflächenanlagen stehen oft im Konflikt mit Landschafts- und/oder Naturschutzanliegen. Kernkraftwerke sind derzeit in der Schweiz politisch nicht gewollt und Gaskraftwerke stehen entgegen der Zielsetzung der Dekarbonisierung. Aufgrund der unsicheren Entwicklung des Strommarktes ist zudem eine Investition in solche Anlagen derzeit mit hohen wirtschaftlichen Risiken verbunden. Es braucht deshalb eine politische Klärung auf welche Stromerzeugungsformen die Schweiz setzt und in welchem Ausmass die Umsetzung möglich ist. Danach braucht es ein Marktdesign, welches die ökonomischen Risiken kontrollierbar machen (Subventionen, Reservehaltungsbeiträge, Defizitgarantien des Staates oder Stromabnahmeverpflichtungen der Konsumenten usw.).
- **Pumpspeicherwerke zur Kapazitätssteuerung:** Nebst dem Zubau der Stromproduktion braucht es vermutlich auch grossmassstäbliche Pumpspeicherwerke (z.B. Pumpspeicherwerk Lago Bianco), welche mithelfen, die Produktion aus Wind- und Solarkraft zeitlich mit der Nachfrage zu synchronisieren. Auch für diese Anlagen fehlen heute Marktmechanismen, die solche Investitionen mit kalkulierbaren Risiken ermöglichen würden. Wenn die Marktmechanismen nicht geändert werden können, stellt sich die Frage, ob solche Anlagen durch staatliche Finanzierungen ermöglicht werden sollen. Denn ohne Anlagen, die in der Lage sind, wesentliche Stromproduktionen

kurzfristig abzunehmen und zu speichern, dürfte ein Ausbau von Wind- und Solarkraft um 40 – 50 GW in der Schweiz illusorisch oder extrem ineffektiv bleiben.

- **Bewilligungsvoraussetzungen:** Weiter braucht es eine Anpassung der Bewilligungsvoraussetzungen, damit die Projekte rasch realisiert werden können. Dies setzt wiederum eine entsprechende politische Diskussion voraus, insbesondere bei Wind- und Solarparks, welche grosse Landschaftsflächen benötigen. Es braucht hierzu die Diskussion, ob alpine Solar- oder Windparks eine entscheidende Rolle spielen sollen und wieviele solcher Parks erstrebenswert sind. Die aktuelle dringliche Gesetzgebung des Bundes hat die Debatte zwar lanciert. Langfristig bedarf es aber eine Weiterentwicklung dieser Gesetzgebung, da die darin verankerten Ziele für den Zubau der Realität vermutlich nicht stand halten werden.

9 Zusammenfassung der Kernerkenntnisse & Diskussionsvorschläge

9.1 Kernerkenntnisse

Netto-Null ist in Graubünden bis 2050 oder rascher machbar

Im vorliegenden Bericht haben wir uns umfassend mit den Herausforderungen zur Elimination des CO₂ in Graubünden auseinandergesetzt. Die Kernerkenntnisse lauten:

Eliminierung des CO₂

Insgesamt muss in Graubünden ein Jahresausstoss von rund 2 Mio. t CO_{2äq} dauerhaft entfernt werden.

CO₂-Neutralität im (terrestrischen) Verkehr und in Gebäuden ist mit der heutigen und absehbar verfügbaren Technologie grundsätzlich bis im 2050 machbar.

Gewisse Bereiche wie Landwirtschaft, Industrie, Abfallverbrennung usw. erfordern eine Abscheidung von CO₂, da sie auch künftig CO₂ ausstossen werden. Technologien für die Abscheidung des CO₂ sind zumindest für KVA und Zementwerk vorhanden. Für die Abscheidung von nicht eliminierbaren Emissionen aus der Landwirtschaft muss die Technologie noch ausgereift werden.

Eine Herausforderung dürfte die Umstellung des Nutzfahrzeugparks (LKW, Baumaschinen, Pistenmaschinen usw.) bilden, da die Verfügbarkeit von Fahrzeugalternativen den Personalfahrzeugen um etwa 10 Jahre hinterherhinkt.

Strombedarf und Bereitstellung

Nahezu alle Technologien, die uns helfen das CO₂ zu substituieren werden zusätzlichen Strom erfordern. Deshalb stellt sich die zentrale Frage, wieviel zusätzlicher Strom aus erneuerbaren Energien und zusätzliche Wasserspeicherkapazität (Speicher und Pumpen) in Graubünden hergestellt werden kann und muss. Hierbei bestehen zwei Ebenen:

- Graubünden als Stromproduzent für die eigenen Bedürfnisse (Bedarf rund 2.4 TWh inkl. Ausstieg aus Kernkraft)
- Graubünden als Stromproduzent für den Bedarf der Schweiz oder Europa (Bedarf unklar aber bis zu 10 TWh im Winter für CH denkbar).

Die Bereitstellung von genügend **CO₂-freien Strom, insb. im Winter** wird für die Schweiz die grosse Herausforderung bilden. In Graubünden wird nebst der Wasserkraft, vor allem der Wind- und Solarenergie Potenzial beigemessen. Es stellt sich hier die **zentrale Frage, ob alpine Solarparks und Windparks gebaut werden sollen und wie viele**. Erste Antworten auf diese Fragen liefert der Richtplan Energie des Kantons Graubünden und die aktuell laufende Debatte um den Solarexpress. In den nächsten Jahren wird sich klären, welche Ausschöpfung der Stromproduktionspotenziale im alpinen Raum Graubündens gesellschaftlich akzeptiert werden. Die Differenz zwischen Bedarf und alpinem Ausbau muss durch andere Anlagen (PV im Siedlungsgebiet, andere erneuerbare Quellen, Import oder Kernkraft) bereitgestellt werden.

Die **Dekarbonisierung kann in zwei Phasen unterteilt werden**.

- In einer ersten Phase werden **fossile Treib- und Brennstoffe substituiert**. Dafür braucht Graubünden schätzungsweise zusätzlichen erneuerbaren Strom von **1.1 TWh/a**. Die Mehrkosten können durch die Einsparungen aus fossilen Treib- und Heizstoffen aufgefangen werden.
- In der **zweiten Phase soll der Ausstieg aus der Kernkraft und die Abscheidung vom restlichen CO₂** bewerkstelligt werden. Dies erhöht den Strombedarf von Graubünden aus erneuerbaren Quellen um **weitere 1.3 TWh/a**. Den Mehrkosten für die Produktion stehen jedoch kaum Einsparungen gegenüber, weshalb diese Phase ökonomisch deutlich herausfordernder ist.

Es ist nicht ausgeschlossen, dass auch künftig die **Kernkraft** einen Teil des Strommixes in Westeuropa und damit in der Schweiz bildet. Diese Frage liegt jedoch ausserhalb des Einflussbereichs von Graubünden und ist Teil einer nationalen Diskussion, weshalb wir die Frage an dieser Stelle nicht weiter vertiefen. Für den Ausbau der Kernkraft in Europa spricht, dass einzelne Länder in Europa auch künftig mit CO₂-freier Kernkraft rechnen. Dagegen sprechen die Risiko-/Abfallproblematik und dass auch in Europa im Sommer ein Überschuss an Solarstrom zu erwarten ist, welcher den Betrieb von KKW in Frage stellen kann, da diese nur in der Winterzeit benötigt würden.

Kosten der Dekarbonisierung

Der Umbau der Energieversorgung von fossil auf erneuerbare Elektrizität ist - nach unseren Berechnungen - volkswirtschaftlich sinnvoll. Je nach Szenario und Annahmen kann die vollständige Dekarbonisierung zu heutigen oder leicht höheren Energiekosten (bei aktuellen Preisen gerechnet) bewerkstelligt werden. In allen Szenarien erhöht sich aber das BIP in Graubünden um rund CHF 400 – 800 Mio./a, da mit der Herstellung von erneuerbarer Energie eine **Importsubstitution** der fossilen Energieträger erfolgt. Deshalb ist es volkswirtschaftlich nicht nur vertretbar, sondern sogar erstrebenswert, die Dekarbonisierung Graubündens rasch zu vollziehen.

Festzuhalten ist, dass der **Ersatz der fossilen Treib- und Brennstoffe ökonomisch sehr attraktiv ist**, da in dieser Phase 66% CO₂ eliminiert werden können und die Energiekosten gleichzeitig sinken. Der **Ausstieg aus der Kernkraft und die Abscheidung der restlichen 33% CO₂** erfordern jedoch Investitionen mit wenig finanziellen Einspareffekten, weshalb dieser letzte Drittel der Dekarbonisierung die Kostenersparnis wieder auffrisst.

Die **Kosten und Erträge fallen jedoch nicht bei allen Akteuren gleichmässig an** und können verschiedene Akteure bevorteilen und andere benachteiligen. Sie stellen entsprechende An- und Abreize dar. Dem **Staat kommt deshalb die Aufgabe zu, die notwendigen Ausgleiche** und Anreize für die einzelnen Akteure so zu gestalten (Subventionen, Stromabnahmeverpflichtungen, steuerliche Anreize usw.), dass für die Akteure ein möglichst grosser Anreiz entsteht, zur Dekarbonisierung beizutragen.

Geschwindigkeit der Dekarbonisierung

Die **bisherige Geschwindigkeit des Umbaus der Energieträger genügt nicht**, um 2050 CO₂-neutral zu sein. Die Geschwindigkeit muss deutlich erhöht und hochgehalten werden, womit auch Fragen der praktischen Umsetzbarkeit auftauchen (z.B. Fachkräftemangel, Effizienz, Zwang statt Anreiz).

Der **Aktionsplan Green Deal setzt primär auf Fördermechanismen mit entsprechenden finanziellen Anreizen**. Dies ist grundsätzlich denkbar und volkswirtschaftlich machbar. Wenn wir aber das Ziel Netto-Null ernst nehmen, könnten im Gebäudepark auch stärker Ge- und Verbote eingesetzt werden. Insbesondere wenn die Umsetzungsgeschwindigkeit erhöht werden soll. Im Bereich der Personenfahrzeuge ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass der Umstieg auf Elektrofahrzeuge auch ohne besonderes Engagement des Kantons erfolgen wird. Die öffentlichen Gelder könnten so für die Erforschung und Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur für den Güterverkehr sowie der CO₂-Abscheidungskapazitäten eingesetzt werden.

Aus Bündner Sicht dürfte die Frage nach dem **politisch gewollten oder zulässigen Ausbau der alpinen Solar- und Windpärke sowie der Wasserkraft entscheidender** zum Umbau der Energieversorgung (in Graubünden und der Schweiz) beitragen, als ob mit dem Aktionsplan Green Deal einzelne Förderungen verstärkt werden.

Innovation im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung

Die Dekarbonisierung Graubündens **erfordert die Entwicklung von neuen Lösungen**. Ein grosser Teil dieser Lösungen wird von aussen nach Graubünden gebracht werden (z.B. Elektroautos, Wärmepumpen, Solarzellen). In einzelnen Bereichen kann **Graubünden jedoch wesentliche angewandte Forschung und Entwicklung betreiben**. Wir sehen primär die folgenden Themen:

- Dekarbonisieren der **Landwirtschaft** mit neuen Ideen zur Bodenbewirtschaftung, Tierhaltung und Tierfütterung.
- Aufbau von Produktionen rund um **Wasserstoff und synthetischen Treibstoffen** im Ausmass von überschüssiger Elektrizitätsproduktion im Sommerhalbjahr.
- Entwickeln von CO₂-freien oder negativem **Zement/Beton**.
- Weiterentwickeln der **Holzbauweise**.
- Optimierung der **Energieeffizienz** in bestehenden Anlagen der **Industrie** und in Gebäuden.
- **CO₂-Abscheidung** bei der Kehrrechtverbrennungsanlage in Trimmis und dem Zementwerk in Untervaz.
- Realisierung von hocheffizienten **alpinen Solarparks**.

Energiewirtschaftsstrategische Positionierung des Kantons

Der Kanton Graubünden war bis heute mit rund 8 TWh/a Stromproduktion und 2 TWh/a Stromverbrauch in volkswirtschaftlich-strategischer Hinsicht ein Stromproduzent, der an hohen Strompreisen interessiert ist. Bezüglich der fossilen Energie war Graubünden ein Konsument von rund 4 TWh/a. Wenn man beides zusammenrechnet, so hat Graubünden immer noch etwas mehr Energie hergestellt als verbraucht. Weil die Energiepreise auf dem Weltmarkt miteinander verzahnt sind, war der Kanton gegenüber Energiepreisen einigermassen neutral aufgestellt.

Nebst allen anderen Fragen in diesem Bericht kann man nun auch überlegen, wie man den Kanton künftig energiestrategisch aufstellen will. Wenn Graubünden künftig auf den heutigen Zukauf von 4 TWh/a fossile Energie verzichtet und seine Energieproduktion um 2.4 TWh/a erhöht, wird Graubündens energiestrategische Position wesentlich gestärkt.

Sollte aber der Strom künftig im Sommer keinen Wert mehr aufweisen, weil Europa über zuviel Solarstrom verfügt, könnte die bestehende und neu gebaute Energieproduktion in Graubünden entwertet werden. Aus dieser Sicht ist zu überlegen, ob der Aufbau einer Wasserstoffproduktion bzw. Produktion von synthetischen Treibstoffen zur Verlängerung und Sicherung der Wertkette im Sommer ein Weg sein kann. Aus dieser Optik sind zumindest der Ausbau von Pilotprojekten in diesem Bereich als erste Tests sicherlich zu begrüssen.

Fazit: Graubünden kann und sollte aus ureigenem volkswirtschaftlichem Interesse CO₂-neutral werden. Sollte dies bis 2050 erfolgen, muss jedoch das Engagement bzw. die Geschwindigkeit des Umbaus der Energienutzung deutlich erhöht werden.

Sieben Vorschläge, die wir unterstreichen wollen

9.2 Diskussionsvorschläge

Die politische Debatte um die richtigen Strategien und Massnahmen für die Dekarbonisierung kennt bereits eine Vielzahl von Ideen und Vorschlägen. Es ist schwierig gänzlich neue Vorschläge zu präsentieren. Auch in Graubünden sind im Zusammenhang mit dem Aktionsplan Green Deal vielfältige Ideen bereits diskutiert und geprüft worden.

Wir beschränken uns deshalb bei unseren Vorschlägen darauf, einzelne Ideen / Massnahmen nochmals zu unterstreichen, die aus unserer Sicht politisch geklärt werden sollen bzw. von besonderer Bedeutung sind.

9.2.1 Vorschlag 1: Umstieg ergibt volkswirtschaftlich Sinn und soll rasch vorangetrieben werden

Der Umstieg auf erneuerbare Energien in Graubünden ist machbar und auch volkswirtschaftlich erstrebenswert. Deshalb ist auch gerechtfertigt den Umstieg zeitlich zu beschleunigen, statt 'auf die lange Bank' zu schieben. Auch wenn der Rest der Welt in der Klimapolitik langsamer unterwegs sein sollte als Graubünden, so hat Graubünden nichts zu verlieren. Denn die Energieversorgung wird voraussichtlich volkswirtschaftlich nicht oder nur unwesentlich teurer als heute ausfallen. Zusätzlich nimmt die strategische Abhängigkeit von Graubünden von Erdöl- und Erdgasförderländer markant ab. Graubünden schützt dabei die Volkswirtschaft vor steigenden Preisen bei knappen fossilen Rohstoffen. Da der Mix der Kosten der Energieversorgung in Graubünden sich von Ausgaben für importierte Treib- und Brennstoffe hin zu Ausgaben für Investitionen vor Ort verschiebt, profitiert Graubünden von Impulsen, die als teilweise Importsubstitution im volkswirtschaftlichen Sinne betrachtet werden können.

9.2.2 Vorschlag 2: Stromproduktion zuerst

Der Umbau der Energieversorgung wird auf jeden Fall höhere erneuerbare Stromkapazitäten erfordern. Selbstverständlich muss gleichzeitig auch dafür gesorgt werden, dass die Energieeffizienz steigt. Dies gilt insbesondere in den Gebäuden durch eine verbesserte Dämmung. Bei den industriellen Prozessen und der CO₂-Abscheidung wird eine erhöhte Energieeffizienz auch Innovation voraussetzen. Beim Umstieg von Verbrennermotoren auf batteriegetriebene Fahrzeuge wie auch beim Ersatz der heutigen Heizungen, wird die Energieeffizienz automatisch stark erhöht.

Weil das Klima durch die Emission von CO₂ und nicht durch die 'Energieineffizienz' belastet wird, schlagen wir vor, den Ausbau der erneuerbaren Energie prioritär und unabhängig von der Frage der Energieeffizienz voranzutreiben. Diese Priorität spielt beim Design der Förderpolitiken eine wesentliche Rolle. Sollte tatsächlich entgegen der heutigen Erwartung künftig zuviel erneuerbarer Strom vorhanden sein, können die entsprechenden Fördermassnahmen jederzeit reduziert werden.

9.2.3 Vorschlag 3: Chance für Ausbau Energieproduktion nutzen

Die aktuelle Situation mit einer erwarteten Energieknappheit im Winter birgt die folgenden volkswirtschaftlichen Chancen für Graubünden.

- Ausbau der **Wasserkraftproduktion** (Projekte Chlus, Pradapunt usw.)
- **Verschiebung** eines Teils der **Wasserkraftproduktion** in den wertschöpfungsstärkeren Winter (Staumauererhöhungen)
- Realisierung von **steuerbarer Wasserkraftproduktion (Pumpspeicherwerke)**.
- Realisierung einiger **alpiner Solarparks und evtl. Windparks**

- Allenfalls Realisierung von **Wasserstoffproduktionen oder Produktion von synthetischen Treibstoffen** mit überschüssigem Sommerstrom und damit Verlängerung der Stromwertschöpfungskette.
- Realisierung einer **CO₂-Abscheidung** bei der KVA Trimmis und dem Zementwerk in Untervaz und damit ebenfalls eine Verlängerung der Wertschöpfungskette der Abfallwirtschaft oder Zementherstellung.

All diesen Potenzialen gemeinsam ist, dass sie personalextensiv sein werden und deshalb geeignet sind, in Graubünden das BIP pro Einwohner zu erhöhen. Weiter wissen wir heute nicht, wie sich die Preise für Energie/Strom in der Zukunft entwickeln werden. Es ist denkbar, dass der Strom im Sommer keinen Wert haben wird, weshalb die **Verlagerung in den Winter** und die **Verlängerung der Wertkette in Wasserstoff und synth. Treibstoffen** ein Weg darstellt, den Wert der Stromproduktion im Sommer zu retten. Es ist aber auch denkbar, dass Strom sehr wertvoll werden wird. Wenn Graubünden weiterhin ein Nettoproduzent bleibt oder die Position sogar ausbaut, wird die Volkswirtschaft **gegenüber Energiepreisentwicklungen immun**, da man gleichzeitig Produzent und Konsument ist.

Der Ausbau der Energieproduktion ist für Graubünden aus dieser Optik eine **volkswirtschaftliche Chance, die genutzt werden will**. Selbstverständlich sind bezüglich der Landschaftsnutzung und Umweltschutz in jedem Projekt die Vor- und Nachteile sorgsam abzuwägen.

In diesem Zusammenhang ist auch zu prüfen, inwiefern die Investitionen in die Energieproduktion durch die Gemeinden und den Kanton getätigt werden sollen, bzw. wie sichergestellt wird, dass die **Ressourcenrente** (der Wasser-, Wind- und Solarkraft) nicht an private Investoren abfließt.

9.2.4 Vorschlag 4: Runder Tisch für Grossanlagen der Wasser-, Solar- und Windkraft

Unsere Analysen zeigen, dass Graubünden nebst der Nutzung der Dach- und Infrastrukturflächen rund 1 GW an zusätzlich installierten Wind- und alpinen Solarparks braucht, um das Ziel von Netto-Null zu erreichen und den Strommehrbedarf der Dekarbonisierung mit zusätzlichen erneuerbaren Energien auch im Winter zu decken. Sofern Graubünden auch einen Beitrag an den Winterstrombedarf der übrigen Schweiz leisten soll, so würde sich die Zahl vervielfachen. Derzeit findet in der Schweiz eine intensive Debatte um den Ausbau von alpinen Solar- und Windparks statt. Aufgrund der verabschiedeten Gesetzgebung des Bundes (z.B. Solarexpress) suchen verschiedene Akteure nach Standorten für solche Anlagen. Mit der Möglichkeit einen Solar- oder Windzins zu erwirtschaften sind insbesondere auch die Gemeinden in Graubünden an solchen Projekten interessiert. Mit dem Richtplan Energie (KRIP-E) hat der Kanton detailliert das Ausbaupotenzial für Wasserkraft- und Windkraftprojekte dargelegt und weitgehend auch beurteilt.

Offensichtlich muss in diesem Thema ein Abgleich zwischen Nutzung von Wasser-, Solar- und Windkraftpotenzialen und Landschaftsschutz stattfinden. Graubünden sollte deshalb rasch einen Sachplan mit den zu bauenden Wasser-, Solar- und Windparks erstellen, welche mit der Akzeptanz der Bevölkerung und den Landschaftsschutzinteressen abgeglichen sind. Die entsprechenden gemeinsam festgelegten Standorte im Sinne eines 'runden Tisches' sollten dann in Form von Konzessionen durch die Territorialgemeinden zur Entwicklung ausgeschrieben werden. Der KRIP-E bietet dazu gute Anhaltspunkte.

Auch wenn der aktuelle Solarexpress nur bis im Jahr 2025 gilt, gehen wir davon aus, dass falls die Schweiz Wind- und Solarparks braucht, die entsprechenden Regeln in einer artverwandten Form auch nach 2025 gelten werden und deshalb dieses politische Diskussionsthema Graubünden für die nächsten 5-10 Jahre erhalten bleiben dürfte.

9.2.5 Vorschlag 5: Kantonale Klimabürgschaften

In der Regel führt eine Umrüstung der Energieversorgung in Gebäuden langfristig zu tieferen laufenden Kosten, weshalb sie in der Regel auch wirtschaftlich interessant ist. Die Umrüstung selbst verursacht jedoch eine beträchtliche Investition. Diese einmaligen Investitionskosten stellen sowohl bei privaten Haushalten wie auch bei Unternehmen eine wesentliche Finanzierungshürde für die rasche Umrüstung dar. Sei dies, weil die Liquidität oder Verschuldungsfähigkeit fehlt oder weil der Eigentümer sich nicht verschulden will.

Wir schlagen deshalb vor, dass **umrüstungswilligen Privathaushalten oder Unternehmen die Investition in die Umrüstung von Heizungen und die Investition in PV-Anlagen auf Dächern vollständig durch die Banken mit Hypotheken finanziert wird**. Dies unabhängig von der bereits bestehenden Belehnung und Kreditfähigkeit des Schuldners. Die entsprechende Finanzierung soll durch den Kanton in Anlehnung an die Covid-19-Kredite durch Bürgschaften vollständig abgedeckt werden.

Indem der Kanton diese Finanzierungen verbürgt, verbilligt er die Finanzierung, da günstigere Zinsen ermöglicht werden. Die Hürde des fehlenden Kapitals fällt vollständig weg. Langfristig kann der Kredit mit den in aller Regel günstigeren laufenden Kosten zurückgeführt werden.

Das Risiko von Kreditausfällen dürfte sehr tief liegen, da die Umrüstung in der Regel zu tieferen laufenden Kosten führt. Mit einem solchen Programm kann dort, wo die Finanzierung tatsächlich einen Engpass bildet, dieser gelöst werden. Wo der Eigentümer sich ziert seine Verschuldung zu erhöhen, hilft ein solches Instrument, indem die staatlich verbürgte Zusatzfinanzierung zu besseren Konditionen führt und allenfalls auch weniger schnell amortisiert werden muss als eine rein kommerzielle Finanzierung.

Sofern Klimabürgschaften zur Verfügung gestellt werden, kann der Kanton auch die Energievorschriften rascher verschärfen und die Gebäudeeigentümer zwingen, die Umrüstung rascher voranzutreiben, da die Finanzierung nicht mehr im Weg steht und damit der Vorwurf der 'teilweisen Enteignung' wegfällt.

Im Unterschied zur Umrüstung auf PV und erneuerbaren Energieträgern ist die Dämmung für den Privathaushalt schwieriger in Wert zu setzen. Auch kann dort die Verschuldung weniger einfach zurückverdient werden. Deshalb sind a-fonds-perdu Beiträge des Staates für die nachträgliche Dämmung des Bestandes sinnvoller als bei der Umrüstung der Energieträger. Die Zuschüsse müssten sich nicht unbedingt an den Kosten, sondern an der eingesparten Energie orientieren.

9.2.6 Vorschlag 7: Bedingt rückzahlbare Darlehen für strategische Wasserkraftprojekte

In Graubünden besteht eine Anzahl von Projekten zum Ausbau der Wasserkraft. Es ist höchst wahrscheinlich, dass diese Projekte für den Energieumbau benötigt werden. Dennoch fehlen diesen Projekten - trotz volkswirtschaftlicher Sinnhaftigkeit - allenfalls die betriebswirtschaftliche Machbarkeit im zu erwartenden Wettbewerbsumfeld.

Kanton und Bund sollten gemeinsam klären, welche dieser Wasserkraftprojekte strategischen Charakter haben. Die entsprechenden Projekte (voraussichtlich Chlus, Lago Bianco, Nalps, Marmorera und weitere) sollten mit bedingt rückzahlbaren Darlehen von Bund und Kanton ausgestaltet werden, damit die Projekte rasch vorangetrieben werden können. Bund und Kanton gewinnen so Zeit, um allfällige Marktregeln neu zu gestalten, damit die tatsächlichen Defizite dieser Projekte später möglichst gering ausfallen oder besser gar nicht anfallen. Die Projektentwickler auf der anderen Seite werden so deblockiert und müssen nicht abwarten, bis die Politik es schafft, die richtigen Rahmenbedingungen zu formulieren, damit die strategischen Projekte wirtschaftlich dargestellt werden können. Im Unterschied zu reinen Subventionen können so auch Mitnahmeeffekte verhindert werden.

Anhang 01 Quellenverzeichnis

Amt für Energie und Verkehr, Kanton Graubünden (o.D.): EN–120: Ersatz Wärmeerzeugung. [Folienpräsentation]

Amt für Energie und Verkehr (2011): Stromproduktion aus erneuerbaren Energien ohne Grosswasserkraft

Potenzialstudie 2011

Amt für Natur und Umwelt Graubünden, Kanton Graubünden (2018): Emissionskataster Kanton Graubünden – Luftschadstoffe und Treibhausgase. [Entwurf Schlussbericht]

Amt für Natur und Umwelt Graubünden (2021). Aktionsplan Green Deal Graubünden – Massnahmen zu Klimaschutz und Klimaanpassung.

Amt für Raumentwicklung, Kanton Graubünden (2018): Mobilität in Graubünden – Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015

Amt für Raumentwicklung, Kanton Graubünden (August 2021): Leitfaden für Solaranlagen – Verfahrens und Gestaltungsempfehlungen

Amt für Raumentwicklung, Kanton Graubünden (Oktober 2014): Potenzialabschätzung Solarstrom Graubünden

Bundesamt für Energie BFE (2013): Volkswirtschaftliche Bedeutung erneuerbarer Energien in der Schweiz

Bundesamt für Energie BFE (2014): Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Rapperswil AG

Bundesamt für Energie (2020): Energieperspektiven 2050+, Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.

Bundesamt für Energie BFE (2021): Schweizer Elektrizitätsstatistik 2020

Bundesamt für Energie BFE (2022): Beschleunigung des Ersatzes von Elektroheizungen in der Schweiz – Bericht zu Handen des Bundesamt

Bundesamt für Energie (2022): Auswirkungen einer starken Elektrifizierung und eines massiven Ausbaus der Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien auf die Schweizer Stromverteilnetze.

Bundesamt für Energie BFE (2022): Finanzierungsmodelle für Gebäudesanierungen und Heizungsersatz

Bundesamt für Energie BFE (2022): Solarstromanlagen: Besser in den Bergen oder im Mittelland?

Bundesamt für Energie BFE (2022): Statistik Sonnenenergie – Referenzjahr 2021

Bundesamt für Energie BFE (2022): Windpotenzial Schweiz 2022

Bundesamt für Umwelt BAFU (2007): Graue Treibhausgas–Emissionen in der Schweiz 1990–2004 – Erweiterte und aktualisierte Bilanz

Bundesamt für Umwelt BAFU (2022): Kenngrössen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz, 1990–2020

Bundesamt für Statistik (2022): Waldflächen, Waldwachstum gemäss Landesforstinventare.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2021): Informationsblatt CO₂ – Faktoren – Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss

Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2022): Wie viel CO₂ binden landwirtschaftlich genutzte Böden?, Website <https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/wie-funktioniert-landwirtschaft-heute/wie-viel-co2-bindet-landwirtschaftliche-boeden> besucht am 31.10.2022

Bündner Regierung (2021): Botschaft der Regierung an den Grossen Rat, 9. Wasserkraftstrategie des Kantons Graubünden 2022–2050. [Heft Nr. 9/2021-2022]

- EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE (2019): “Studie Winterstrom Schweiz” – Was kann Photovoltaik beitragen? [Abschlussbericht]
- EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE (2020): Photovoltaikmarkt-Beobachtungsstudie 2019
- EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE (2020): Photovoltaikmarkt-Beobachtungsstudie 2019
- EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE (2021): Simulation von Energiesystemen mit Tachion-Simulation-Framework. [Benutzerdokumentation]
- EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE (2022): Schlüsseldaten rund um meine Solaranlage - Photovoltaikreport Standort 7000 Chur
- EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE (2022): Schlüsseldaten rund um meine Solaranlage - Photovoltaikreport Standort 7460 Surses
- Holcim (Schweiz) AG (o.D.): Umweltdaten 2020
- Infras (2022): Aktualisierung Emissionskataster Kanton Graubünden 2022
- Jendrischik, M. (2022): Wie Climeworks den Klimawandel durch Luftabscheidung umkehren will.
- Kanton Graubünden (10.08.2021): Aktionsplan Green Deal für Graubünden – Zwischenbericht zur Massnahmenplanung mit Finanzierungskonzept und verpflichtungskredit für die Etappe I. [Medienkonferenz]
- Kanton Graubünden (2023): Leitfaden Bewilligungsverfahren für Photovoltaik-Grossanlagen nach Art. 71a EnG
- KVA Linth (2020): CO₂-Abscheidung und -Speicherung: Chance für den Klimaschutz
- Moro, N. et al (2021): Das Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern
- Neue Zürcher Zeitung AG (07.05.2022): Phantomziel Netto-Null? [NZZ, S. 56]
- Neue Zürcher Zeitung AG (07.05.2022): Strom vom Auto zurück in die Steckdose – das funktioniert, weist aber noch Tücken auf. [NZZ, S. 57]
- Nordmann, R. (2017): Sonne für den Klimaschutz
- Regierung des Kantons Graubünden (2021): Botschaft der Regierung an den Grossen Rat Heft 4 2021/2022.
- Rohner, J. (2019): Winterstrom: Problem oder Chance für Sonne, Wind und Speicher? [Folienvorstellung ZHAW - IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen]
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2022): Dringliche Massnahmen zur kurzfristigen Bereitstellung einer sicheren Stromversorgung, Energiegesetz (EnG).
- Somedia AG (22.08.2022): Vom éliesen zum Wasserstoffgiganten. [Bündner Zeitung, S. 15]
- Stauffer & Studach (2019): Kommerzielle Windenergienutzung im Kanton Graubünden, Planungsleitfaden für Behörden und Projektentwickler
- Tagesschau (2021): Klimakiller Kuh?, Website <https://www.tagesschau.de/wissen/klima/kuh-co2-landwirtschaft-101.html> besucht am 31.10.2022
- Tromm, P. (03.11.2020): Chancen und Bedeutung einer Wasserstoffwirtschaft für Graubünden [FHGR [Onlinebericht](#)]
- Verkehrsbetriebe Zürich (o.D.): Elektrisch un die Zukunft: Batteriebusse im Test bei den VBZ. www.stadt-zuerich.ch
- VESE (2022): Karte der Photovoltaikleistung der Schweiz, Stand vom 1.12.2022
- Wikipedia (2022): Orca (carbon capture plant), [https://en.wikipedia.org/wiki/Orca_\(carbon_capture_plant\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orca_(carbon_capture_plant)) besucht am 20.12.2022
- Wirtschaftsforum Graubünden (2010). Elektrizitätswirtschaft Graubünden – Analyse der Wertschöpfungsflüsse. www.wirtschaftsforum-gr.ch

Klimaneutrales Graubünden – eine greifbare Utopie! | Zusammenfassung der Kernerkenntnisse & Diskussionsvorschläge

Wirtschaftsforum Graubünden (2014): Elektrizitätswirtschaft Graubünden – Trends 2014.
www.wirtschaftsforum-gr.ch

Bericht in 60 Sekunden

Mit dem Bericht 'Klimaneutrales Graubünden – eine greifbare Utopie!' hat das Wirtschaftsforum Graubünden analysiert, ob das Ziel Netto-Null in Graubünden erreichbar ist, und wenn ja, mit welchen volkswirtschaftlichen Kosten zu rechnen ist und welche Massnahmen im Zentrum stehen müssen. Die zentralen Erkenntnisse lauten:

Entfernung des CO₂: Insgesamt muss in Graubünden ein Jahresausstoss von rund **2 Mio. t CO_{2äq} dauerhaft entfernt** werden. Dies sind **pro Einwohnenden in Graubünden 10 t CO_{2äq}/a**. CO₂-Neutralität im (terrestrischen) Verkehr und in Gebäuden ist mit der heutigen und absehbar verfügbaren Technologie grundsätzlich **bis im 2050 machbar**. Gewisse Bereiche wie Landwirtschaft, Industrie, Abfallverbrennung usw. **erfordern eine Abscheidung von CO₂**, da sie auch künftig CO₂ ausstossen werden. Technologien für die Abscheidung des CO₂ sind zumindest für KVA und Zementwerk vorhanden. Für die Abscheidung von nicht eliminierbaren Emissionen aus der Landwirtschaft muss die Technologie noch ausgereift werden. Eine **Herausforderung** dürfte die **Umstellung des Nutzfahrzeugparks** (LKW, Baumaschinen, Pistenmaschinen usw.) bilden, da die Verfügbarkeit von Fahrzeugalternativen den Personalfahrzeugen um etwa 10 Jahre hinterherhinkt.

Kosten des Umbaus: Der **Umbau der Energieversorgung** von fossil auf erneuerbare Elektrizität ist nach unseren Berechnungen **volkswirtschaftlich kostenmässig machbar und sogar erstrebenswert**, weil je nach Annahmen mit gleichen oder etwas höheren Energiekosten aber deutlich höheren BIP-Beiträgen in Graubünden das CO₂ eliminiert werden kann.

Wichtigste Massnahmen: Die bisherige Geschwindigkeit des Umbaus der Energieträger genügt nicht, um 2050 CO₂-neutral zu sein. **Die Geschwindigkeit muss deutlich erhöht werden**, womit auch Fragen der praktischen Umsetzbarkeit auftauchen (z.B. Fachkräftemangel, Effizienz, Zwang statt Anreiz). Die Dekarbonisierung Graubündens erfordert die Entwicklung von neuen Lösungen. Ein grosser Teil dieser Lösungen wird von Aussen nach Graubünden gebracht werden (z.B. Elektroautos, Wärmepumpen, Solarzellen). Aber auch Graubünden kann mit **angewandter Forschung zur Dekarbonisierung beitragen und selbst Wissen aufbauen** (z.B. Landwirtschaft, CO₂-Abscheidung, Zement, Holzbau, Produktion von Wasserstoff / synth. Treibstoffen). Die politische Debatte rund um die Dekarbonisierung kennt bereits eine Vielzahl von konkreten Ideen und Vorschlägen. Es ist deshalb schwierig, gänzlich neue Ideen einzubringen. Aus Bündner Sicht dürfte aber die Frage nach dem politisch gewollten oder zulässigen Ausbau der **alpinen Solar- und Windpärke sowie der Wasserkraft die wichtigste Debatte** rund um den Umbau der Energieversorgung und Dekarbonisierung bilden. Hierbei ergeben sich auch **wirtschaftliche Chancen für periphere Regionen, die jetzt genutzt werden sollen**. Aufgrund unserer Analyse möchten wir die **folgenden Vorschläge unterstreichen** und für die weitere politische Diskussion empfehlen:

1. Dekarbonisierung **ergibt** für Graubünden **volkswirtschaftlich Sinn und soll rasch vorangetrieben** werden.
2. Dekarbonisierung braucht erneuerbaren Strom, deshalb soll das **Primat des Ausbaus der erneuerbaren Stromproduktion** gelten.
3. **Chance für Ausbau Energieproduktion** auch wirtschaftlich und für Innovation nutzen.
4. **Runder Tisch** für Ausbau der Grossanlagen der Wasser-, Solar- und Windkraft, damit die Projekte in nützlicher Frist geklärt und umgesetzt werden können.
5. Kantonale **Klimabürgschaften für Hauseigentümer** anbieten, damit die Umrüstung des Gebäudeparks beschleunigt werden kann.
6. Defizitgarantien für **strategische Wasserkraftprojekte** prüfen, damit offensichtlich notwendige Projekte, deren Rentabilität von künftigen Strommarktdesigns abhängen und deren Realisierung lange Zeiträume braucht, in nützlicher Frist vorangetrieben werden können.