

Technische und Suffizienz-Massnahmen zur Reduktion der schweizerischen Treibhausgasemissionen: Der Vermeidungskostenansatz



Bildquellen: unsplash

September 2020

<https://doi.org/10.21256/zhaw-2653>

Forschungsgruppe Erneuerbare Energien
IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Campus Grüental, CH-8820 Wädenswil
www.zhaw.ch/iunr/erneuerbareenergien/

Autoren: Muriel Siegwart, Léonore Hälg, David Sauter, Jürg Rohrer

Begleitgruppe: Patrick Hofstetter (WWF Schweiz), Elmar Grosse Ruse (WWF Schweiz), Gianni Operto (AEE Suisse)

Finanzierung: Wir danken der Werner Siemens-Stiftung für die Finanzierung dieser Studie.

Zusammenfassung

Um die fortschreitende Erderhitzung zu verlangsamen oder stoppen, ist eine massive Reduktion der Treibhausgasemissionen (CO₂eq¹-Emissionen) nötig. Dies kann nur mit umfassenden Massnahmen erreicht werden. Die vorliegende Studie bietet eine Analyse des Potentials verschiedener Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Schweiz. Einerseits wurden technische Massnahmen und andererseits auch Suffizienz-Massnahmen untersucht. Neben dem Potential zur Reduktion der CO₂eq-Emissionen wurde für die technischen Massnahmen auch die zu erwartenden volkswirtschaftlichen Einsparungen oder Kosten analysiert. Bei der Auswahl der Massnahmen lag der Fokus auf etablierten und kostengünstigen Technologien oder Verfahren, welche ab heute eingesetzt werden könnten.

Die in der vorliegenden Studie verwendete Methodik ist grundsätzlich dieselbe, welche McKinsey im Jahr 2009 verwendete, um eine Analyse zu den CO₂eq-Reduktionskosten verschiedener Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgase in der Schweiz durchzuführen (McKinsey, 2009b). McKinsey hatte die volkswirtschaftlichen Kosten der verschiedenen Massnahmen untersucht. Steuern, Subventionen oder indirekte Kosten, wie zum Beispiel externe Kosten, die als Folge des Klimawandels entstehen, wurden nicht berücksichtigt. Seit der Veröffentlichung der Studie von McKinsey hat die technologische Entwicklung grosse Fortschritte gemacht und die Kosten vieler emissionsarmer Technologien, wie Photovoltaik und Elektroautos, sind erheblich gesunken. Die vorliegende Studie berücksichtigt diese Entwicklungen und analysiert die Reduktionskosten basierend auf aktuellen Daten. Das Reduktionspotential der Massnahmen wurde ermittelt, indem die Emissionen, die bei der Umsetzung der Massnahmen entstehen, mit den Emissionen im Referenzfall ohne Massnahmen verglichen wurden. Analog wurden die Kosten der technischen Massnahmen mit den Kosten des Referenzfalls verglichen. Für die Referenzfälle wurde basierend auf den Prognosen der Energieperspektiven 2050 des Bundes (Prognos, 2013) und anderen Studien (Infras, 2017; TEP Energy & Ecoplan, 2019) evaluiert, wie viele Emissionen im Jahr 2030 ohne Umsetzung der untersuchten Massnahmen entstehen.

Nicht alle technischen Massnahmen verursachen Mehrkosten gegenüber dem Referenzfall. Bei einigen Massnahmen führen geringere Energie- und/oder Unterhaltskosten insgesamt zu Kosteneinsparungen. Um die Kosteneffizienz der verschiedenen technischen Massnahmen bezüglich CO₂eq-Reduktion zu vergleichen, wurden die jährlichen Kosten ins Verhältnis zum jährlichen Reduktionspotential gesetzt und so die spezifischen Reduktionskosten pro vermiedene Tonne CO₂eq-Emissionen berechnet.

Die Ergebnisse zu den technischen Massnahmen sind in einer CO₂eq-Reduktionskostenkurve dargestellt und zeigen das CO₂eq-Reduktionspotential auf der horizontalen Achse und die CO₂eq-Reduktionskosten auf der senkrechten Achse (Abbildung 1). Sowohl das Potential wie auch die Kosten wurden für das Jahr 2030 berechnet. Gemäss dem schweizerischen Treibhausgasinventar, welches Emissionen nach dem Territorialprinzip berücksichtigt, betrug im Jahr 2018 der CO₂eq-Ausstoss der Schweiz 46.6 Mio. tCO₂eq (BAFU, 2020b). Durch Steigerung der Energieeffizienz und teilweise Umstellung auf fossilfreie Technologien kann im Referenzszenario der CO₂eq-Ausstoss der gesamten Schweiz bis 2030 auf 41.8 Mio. tCO₂eq reduziert werden (Schweizerischer Bundesrat, 2017). Die in Abbildung 1 gezeigten technischen Massnahmen gehen bei der Umstellung auf fossilfreie Technologien viel weiter als das Referenzszenario und mit ihrer Umsetzung könnten zusätzlich 13.6 Mio. tCO₂eq eingespart werden, sodass der CO₂eq-Ausstoss der Schweiz im Jahr 2030 auf 28.2 Mio. tCO₂eq reduziert würde (Abbildung 2).

¹ Um die Klimawirkung verschiedener Treibhausgase miteinander vergleichen zu können, wird sie für alle Gase in CO₂-Äquivalente (*engl.* equivalents (eq)) umgerechnet.

Das Potential der technischen Massnahmen zur Emissionsreduktion im Jahr 2030 ist stark davon abhängig, wann mit der Umsetzung der Massnahmen begonnen wird. In der vorliegenden Studie wurde angenommen, dass sie ab 2021 umgesetzt werden. Wird erst später mit der Umsetzung begonnen, sinkt das Potential entsprechend. Eine technische Massnahme beinhaltet beispielsweise, dass alle neuen Personenwagen (PKWs) ausschliesslich elektrisch mit einer Batterie betrieben werden. Eine Verzögerung dieser Massnahme würde dazu führen, dass in den nächsten Jahren weiterhin fossil betriebene PKWs gekauft würden. Somit wäre der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge im Jahr 2030 geringer, als wenn die Massnahme ab 2021 umgesetzt würde, und entsprechend wären im Jahr 2030 die Emissionen höher und die volkswirtschaftlichen Einsparungen tiefer. Zudem ist zu beachten, dass Abbildung 1 nur das CO₂eq-Reduktionspotential und die finanziellen Einsparungen/Kosten für das Jahr 2030 zeigt. Die Reduktion der CO₂eq-Emissionen und finanziellen Einsparungen/Kosten, welche durch die Umsetzung ab dem Jahr 2021 bis 2029 anfallen würden, sind in Abbildung 1 nicht ersichtlich.

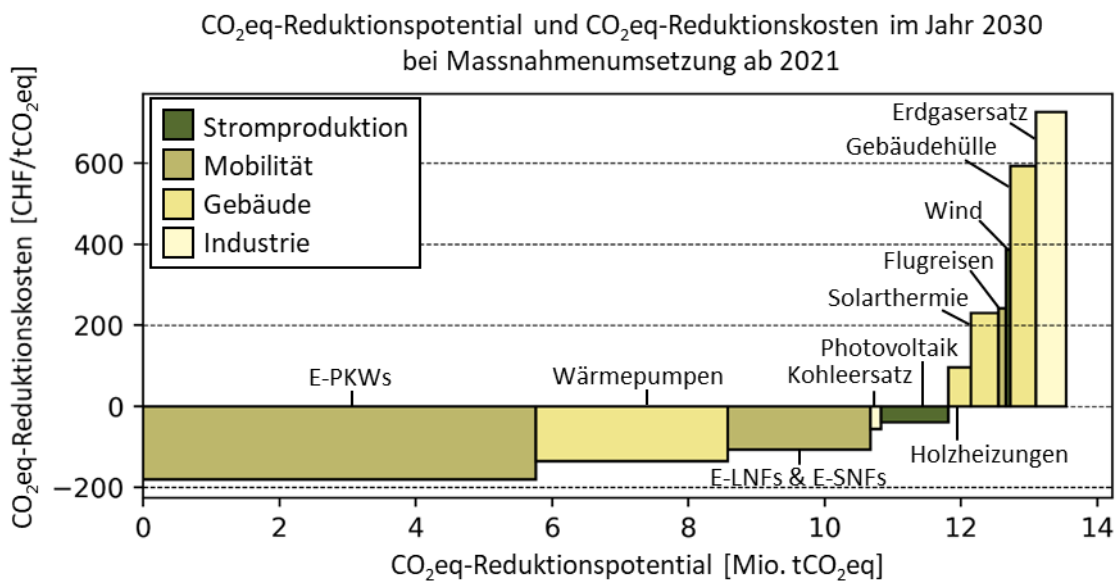


Abbildung 1. CO₂eq-Reduktionspotential und CO₂eq-Reduktionskosten im Jahr 2030 bei Umsetzung der Massnahmen ab 2021. Je breiter der Balken für eine Massnahme auf der horizontalen Achse ist, desto höher ist das CO₂eq-Reduktionspotential gegenüber dem Referenzfall. Negative Reduktionskosten bedeuten finanzielle Einsparungen bei Umsetzung der Massnahme. Ganz links ist die Massnahme mit den grössten finanziellen Einsparungen gezeigt und nach rechts sinken die Einsparungen respektive steigen die Kosten pro vermiedene Tonne CO₂eq-Emissionen.

Die Analyse der ausgewählten technischen Massnahmen zeigt, dass der grösste Teil des Reduktionspotentials in den Sektoren Mobilität und Gebäude anfällt. Die Massnahmen mit den grössten Reduktionspotentialen sind die Umstellung auf Elektromobilität bei PKWs («E-PKWs»), Leichtnutzfahrzeugen und Schwernutzfahrzeugen («E-LNFs & E-SNFs») und der Ersatz fossiler Heizsysteme mit Wärmepumpen («Wärmepumpen»), welche zusammen 80 % des Reduktionspotentials aller untersuchten Massnahmen ausmachen (Abbildung 1). Mit der Umsetzung dieser Massnahmen ab dem Jahr 2021 wären im Jahr 2030 volkswirtschaftliche Kosteneinsparungen von 1'650 Mio. CHF möglich. Darüber hinaus führen auch der Ersatz von Kohle bei der Zementproduktion («Kohleersatz») und der Zubau von Photovoltaikanlagen («Photovoltaik») zu volkswirtschaftlichen Kosteneinsparungen. Die Umsetzung aller untersuchten Massnahmen führt zu Netto-Kosteneinsparungen von 980 Mio. CHF im Jahr 2030.

Der CO₂eq-Reduktionskostenkurve liegen verschiedene Prognosen und Annahmen zu Grunde. Diese Annahmen sind zum Teil mit grösseren Unsicherheiten behaftet. Deshalb wurde jeweils mit Sensitivitätsanalysen untersucht, wie diese Parameter die Ergebnisse beeinflussen. Die Kosteneinsparungen, welche bei der Umstellung auf Elektromobilität und Heizen mit Wärmepumpen entstehen, sind vor

allem von den zukünftigen Preisen für Strom, Treib- und Brennstoffe abhängig. Die Prognosen der International Energy Agency (IEA) gehen von einer Zunahme des Ölpreises zwischen 2018 und 2030 von 30 % aus. Diese Prognose wurde für die Berechnungen der in Abbildung 1 zusammengefassten Ergebnisse verwendet. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die drei Massnahmen mit dem grössten CO₂eq-Reduktionspotential bei gleichbleibendem Ölpreis immer noch volkswirtschaftliche Einsparungen im Jahr 2030 bieten. Diese werden aber auf 770 Mio. CHF reduziert. Da die Umstellung auf Elektromobilität und Heizen mit Wärmepumpen einen erhöhten Strombedarf zur Folge hat, würde ein sinkender Strompreis zu höheren Kosteneinsparungen führen. Je nach Annahme für den Strom-, Treibstoff- und Brennstoffpreis kann sich die Reihenfolge der Massnahmen in Abbildung 1 ändern.

Die Reduktionskostenkurve ist vor allem geeignet zu zeigen, welche Massnahmen kostengünstig sind und daher möglichst rasch umgesetzt werden sollten. Die Kurve gibt aber keinesfalls Hinweise darauf, welche Massnahmen auf Grund der Kosten *nicht* umgesetzt werden sollten. Einige Massnahmen bieten indirekte Kostenvorteile, wenn sie im Gesamtsystem betrachtet werden. Zum Beispiel haben Windkraftanlagen relativ hohe Reduktionskosten. Sie bieten aber im Winter eine hohe Produktionskapazität und können daher die tiefere Winterstromproduktion von Wasserkraft und Photovoltaikanlagen teilweise ausgleichen. Windkraftanlagen reduzieren somit den Bedarf an Energiespeichern. Solche Effekte sind in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt. Ausserdem basiert die Analyse ausschliesslich auf einem ökonomischen Blickwinkel. Andere Aspekte, wie die politische Realisierbarkeit oder gesellschaftliche Akzeptanz, werden nicht betrachtet. Nicht-monetäre Effekte, wie zum Beispiel eine Komfortsteigerung nach einer Gebäudesanierung (z.B. durch weniger Zugluft oder erhöhte Schalldämmung), wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Ebenso nicht betrachtet wurden indirekte Effekte auf die Volkswirtschaft: Zum Beispiel verursacht eine Gebäudesanierung zwar hohe Investitionskosten, führt aber auch zu einer gesteigerten Wertschöpfung in der Baubranche.

Im zweiten Teil dieser Studie wurden sechs Suffizienz-Massnahmen zur Reduktion der CO₂eq-Emissionen in den Bereichen Mobilität, Gebäude und Ernährung untersucht. Bei diesen Massnahmen entsteht im Gegensatz zu den technischen Massnahmen eine Änderung des Nutzens. Zum Beispiel könnte eine Reduktion der täglich zurückgelegten Reisedistanz mit dem Auto durch Fahrgemeinschaften zum Arbeitsort erreicht werden. Diese Verhaltensänderung bringt eventuell einigen Personen als Zusatznutzen soziale Kontakte, dafür könnte der Verlust an Flexibilität als Nutzenminderung betrachtet werden. Da für die meisten Suffizienz-Massnahmen solche nicht-monetäre Effekte mehr ins Gewicht fallen als bei den technischen Massnahmen, wurde für die Suffizienz-Massnahmen keine Kostenanalyse durchgeführt. Die Reduktion der jährlichen PKW-Fahrleistung, eine kleinere beheizte Wohnfläche pro Person und tiefere Raumtemperaturen im Winter sind Massnahmen, welche die Emissionen im Inland reduzieren. Im Bereich Ernährung wurde die Vermeidung von Lebensmittelverlusten und die Umstellung von einer fleischhaltigen auf eine vegetarische Ernährung untersucht. Die Emissionen der Ernährung entstehen jedoch nur zu 30 % in der Schweiz. Die restlichen 70 % entstehen im Ausland durch den Import von Lebens- und Futtermitteln. Die Emissionen von internationalen Flugreisen werden übereinstimmend mit der Klimakonvention der Vereinten Nationen nicht dem Schweizer Treibhausgasinventar angerechnet (BAFU, o. J.). In der vorliegenden Studie werden die Emissionen aus internationalen Flugreisen als im Ausland anfallend betrachtet.

Ausser bei internationalen Flugreisen führen technische Fortschritte in allen Bereichen auch im Referenzszenario zu sinkenden Emissionen zwischen 2018 und 2030. Für internationale Flugreisen wurde angenommen, dass Effizienzsteigerungen die erhöhte Nachfrage nicht kompensieren können und daher die Emissionen zwischen 2018 und 2030 zunehmen werden (Abbildung 2). Für die Berechnung des Reduktionspotentials der Suffizienz-Massnahmen wurde folgendes angenommen: Je 50 % Reduktion gegenüber 2018 bei der jährlichen PKW-Fahrleistung, bei internationalen Flugreisen und bei den Lebensmittelverlusten, eine Umstellung auf vegetarische Ernährung, 30 % kleinere Wohnfläche

pro Person und 3 °C tiefere Raumtemperaturen im Winter. Die erwähnten Suffizienz-Massnahmen könnten die CO₂eq-Emissionen innerhalb der Schweiz um 5.3 Mio. tCO₂eq und im Ausland um 17.3 Mio. tCO₂eq reduzieren (Abbildung 2). Den mit Abstand grössten Anteil an der Emissionsreduktion hätte eine Reduktion statt Zunahme der internationalen Flugreisen: Diese eingesparte Menge an Treibhausgasen ist vergleichbar mit den gesamten Emissionen, welche durch die technischen Massnahmen, die im ersten Teil dieser Studie untersucht wurden, im Jahr 2030 eingespart werden können.

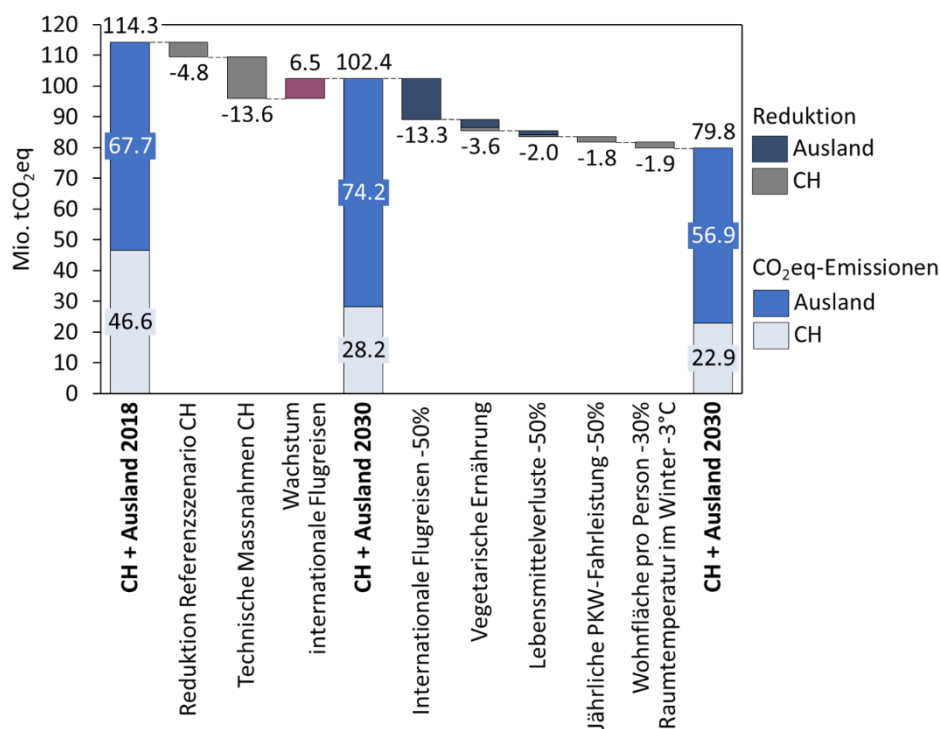


Abbildung 2. CO₂eq-Emissionen innerhalb der Schweizer Grenze (hellgrau) und durch Schweizer im Ausland verursacht (hellblau) im Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 2018. Im Referenzszenario wird der CO₂eq-Ausstoss der Schweiz im Jahr 2030 gegenüber 2018 um 4.8 Mio. tCO₂eq reduziert. Mit der Umsetzung der im vorliegenden Bericht untersuchten technischen Massnahmen könnten weitere 13.6 Mio. tCO₂eq und mit den Suffizienz-Massnahmen 5.3 Mio. tCO₂eq im Inland reduziert werden. Das Reduktionspotential im Ausland durch Suffizienz-Massnahmen zur Reduktion internationaler Flugreisen und im Bereich Ernährung beträgt 17.3 Mio. tCO₂eq.

Eine wichtige Erkenntnis der Studie ist, dass

- der vollständige Übergang zu batterieelektrisch betriebenen Autos, Lieferwagen und Lastwagen in der Mobilität,
- der Ersatz von 90 % der alten Heizungen mit Wärmepumpen im Gebäudesektor und
- der stark beschleunigte Ausbau der Photovoltaik im Energiesektor

sowohl eine starke Reduktion der CO₂eq-Emissionen als auch grosse Einsparungen bei den volkswirtschaftlichen Kosten erlauben. Es empfiehlt sich deshalb, mit der Umsetzung dieser Massnahmen möglichst bald zu beginnen. Zudem zeigt die Studie, dass grosse CO₂eq-Reduktionen durch Suffizienz-Massnahmen, wie die Reduktion von internationalen Flugreisen oder Umstellung einer fleischhaltigen auf vegetarische Ernährung, möglich sind. Die Zusammenstellung an vorgeschlagenen Massnahmen ist jedoch nicht vollständig oder ausreichend, um die Treibhausgasemissionen auf Netto-Null zu reduzieren.

Für die rasche Umsetzung der analysierten Massnahmen sind politische Instrumente (Gesetze und Verordnungen) nötig. Der vorliegende Bericht soll eine Grundlage für die Auswahl, Priorisierung und Ausgestaltung dieser Instrumente dienen. Die AutorInnen empfehlen den politischen Entscheidungsträgern diese Instrumente so rasch wie möglich zu implementieren.

Mesures techniques et de sobriété en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre de la Suisse

Résumé

Afin de ralentir ou de stopper le réchauffement progressif planétaire, une réduction massive des émissions de gaz à effet de serre (émissions d'éq.-CO₂²) est nécessaire. Seules des mesures d'envergure permettront d'y arriver. La présente étude analyse le potentiel de différentes mesures de réduction des émissions en Suisse. Des mesures techniques et des mesures de sobriété ont été examinées. En plus du potentiel de réduction des émissions d'éq.-CO₂, les économies ou les coûts attendus des mesures techniques pour la société ont également été analysés. Pour choisir les mesures examinées, l'accent a été placé sur les technologies ou les procédés établis et peu onéreux, qui pourraient être utilisés dès aujourd'hui.

La méthode appliquée dans la présente étude est en principe la même que celle utilisée en 2009 par le bureau McKinsey dans une analyse des coûts de réduction d'éq.-CO₂ de différentes mesures visant à diminuer les gaz à effet de serre en Suisse (McKinsey, 2009b). McKinsey avait analysé les coûts économiques des différentes mesures sous revue. Les impôts, les subventions ou les coûts indirects comme les coûts externes, conséquences des changements climatiques, n'avaient pas été pris en compte. Depuis cette publication, de grands progrès technologiques se sont produits et les coûts de nombreuses technologies émettant peu de gaz à effet de serre, comme le photovoltaïque ou les voitures électriques, ont sensiblement baissé. La présente étude tient compte de ces évolutions et analyse les coûts de réduction sur la base des données actuelles. Le potentiel de réduction des mesures a été identifié en comparant d'une part les émissions qui se produisent lorsque les mesures sont mises en œuvre avec, d'autre part, les émissions produites dans le cas de référence, c'est-à-dire sans mesures. De manière analogue, les coûts des mesures techniques ont été comparés avec les coûts du cas de référence. Concernant les cas de référence, l'évaluation visait à chiffrer les émissions en 2030 sans mise en œuvre des mesures examinées sur la base des prévisions des «Perspectives énergétiques 2050» de la Confédération (Prognos, 2013) et d'autres études (Infras, 2017; TEP Energy & EcoPlan, 2019).

Certaines mesures techniques n'engendrent pas de coûts supplémentaires par rapport au cas de référence. Pour certaines, la réduction des frais d'énergie et/ou de maintenance entraîne dans l'ensemble des économies de coûts. Pour comparer l'efficacité des coûts des différentes mesures techniques sous l'angle de la réduction des éq.-CO₂, les coûts annuels ont été mis en rapport avec le potentiel de réduction annuel, afin de calculer les coûts de réduction spécifiques par tonne d'éq.-CO₂ évitée.

Les résultats relatifs aux mesures techniques sont représentés dans une courbe de réduction des coûts des éq.-CO₂. Ils montrent le potentiel de réduction sur l'axe horizontal et les coûts de réduction sur l'axe vertical (figure 1). Tant le potentiel que les coûts ont été calculés pour l'année 2030. Selon l'Inventaire des gaz à effet de serre de la Suisse, qui tient compte des émissions d'après le principe territorial, les émissions d'éq.-CO₂ de la Suisse se sont montées, en 2018, à 46,6 millions de tonnes (BAFU, 2020b). Grâce à la hausse de l'efficacité énergétique et, en partie, au passage à des technologies qui se passent de ressources fossiles, les émissions d'éq.-CO₂ de la Suisse à l'horizon 2030 peuvent être réduites à 41,8 millions de tonnes dans le scénario de référence (Schweizerischer

² Des équivalents (éq.) CO₂ sont calculés pour tous les gaz à effet de serre afin de pouvoir comparer leur effet sur le climat.

Bundesrat, 2017). Pour le passage aux technologies sans recours aux ressources fossiles, les mesures techniques présentées dans la figure 1 vont bien plus loin que le scénario de référence. Leur mise en œuvre permettrait d'économiser 13,6 millions de tonnes d'éq.-CO₂ supplémentaires, de sorte que les émissions d'éq.-CO₂ de la Suisse en 2030 seraient réduites à 28,2 millions de tonnes (figure 2).

Le potentiel des mesures techniques de réduction des émissions en 2030 dépend fortement du moment où elles seront mises en œuvre. La présente étude part du principe que c'est le cas à partir de 2021. Si elles sont appliquées plus tard, le potentiel diminue en conséquence. Une mesure technique implique par exemple que toutes les nouvelles voitures de tourisme (VT) sont exclusivement alimentées par une batterie électrique. Si la mise en œuvre de cette mesure est retardée, des voitures de tourisme carburant aux énergies fossiles continueront d'être vendues ces prochaines années. Dans ce cas, la part des véhicules à motorisation électrique en 2030 sera moins importante que si la mesure est réalisée dès 2021. En 2030, les émissions seront donc plus élevées et les économies plus faibles pour la société. On notera en outre que la figure 1 ne montre que le potentiel de réduction d'éq.-CO₂ et les économies/coûts financiers pour l'année 2030. La réduction des émissions d'éq.-CO₂ et les économies/coûts financiers qui seraient engendrés par la mise en œuvre à partir de 2021 et jusqu'en 2029, ne sont pas indiquées dans la figure 1.

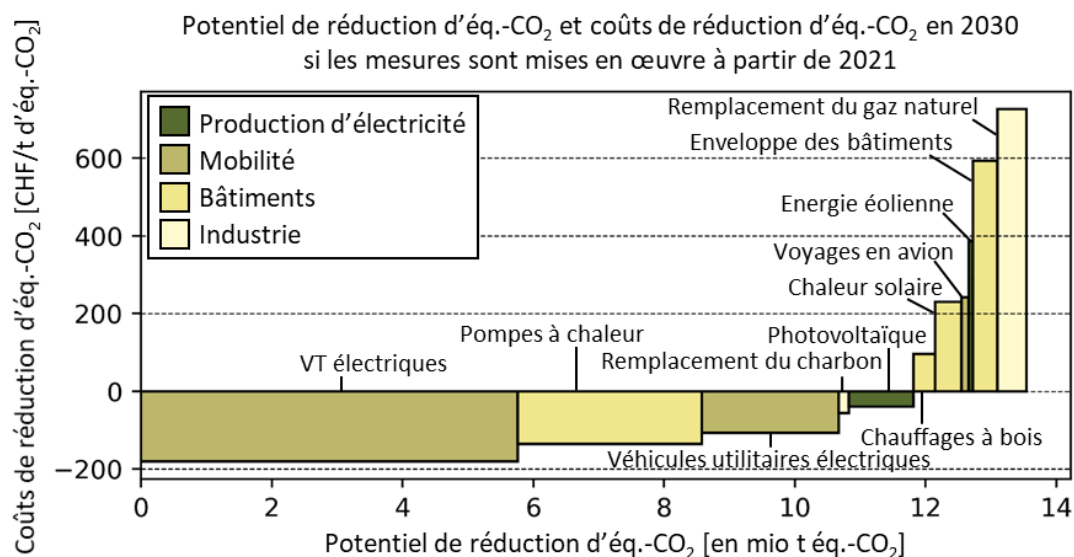


Figure 1. Potentiel de réduction d'éq.-CO₂ et coûts de réduction d'éq.-CO₂ en 2030 si les mesures sont mises en œuvre à partir de 2021. Plus la barre représentant une mesure sur l'axe horizontal est large et plus le potentiel de réduction d'éq.-CO₂ par rapport au cas de référence est élevé. Des coûts de réduction négatifs impliquent des économies financières si la mesure est mise en œuvre. La mesure entraînant les plus importantes économies financières est à gauche, tandis qu'à droite, les économies diminuent et les coûts augmentent par tonne d'éq.-CO₂ d'émissions évitées.

L'analyse des mesures techniques choisies montre que la majeure partie du potentiel de réduction se situe dans les secteurs de la mobilité et des bâtiments. Les mesures présentant les plus grands potentiels de réduction sont le passage à l'électromobilité pour les voitures de tourisme («E-VT») et les véhicules utilitaires lourds et légers, ainsi que le remplacement des systèmes de chauffage fossiles par des pompes à chaleur («pompes à chaleur») qui représentent, ensemble, 80% du potentiel de réduction de toutes les mesures examinées (figure 1). Leur mise en œuvre dès 2021 permettrait de faire des économies de coûts de l'ordre de 1650 millions de francs en 2030. Le remplacement du charbon dans la production de ciment («remplacement du charbon») et le développement des installations photovoltaïques («photovoltaïque») entraînent en outre des économies de coûts pour la société. La mise en œuvre de toutes les mesures analysées conduit à des économies de coûts nettes de 980 millions de francs en 2030.

La courbe de réduction des coûts d'éq.-CO₂ repose sur différentes prévisions et hypothèses. Ces hypothèses sont en partie liées à de grandes incertitudes. C'est pourquoi des analyses de sensibilité ont été effectuées pour tenter d'évaluer comment ces paramètres influencent les résultats. Les coûts économisés par le passage à l'électromobilité et aux pompes à chaleur sont avant tout fonction des prix futurs de l'électricité, des carburants et des combustibles. Les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) tablent sur une augmentation du prix du pétrole de 30% entre 2018 et 2030. Cette prévision a été utilisée pour le calcul des résultats résumés par la figure 1. L'analyse de sensibilité montre que les trois mesures présentant le plus important potentiel de réduction d'éq.-CO₂, avec un prix du pétrole constant, entraînent encore des économies pour la société en 2030. Celles-ci sont cependant réduites à 770 millions de francs. Comme le passage à l'électromobilité et le chauffage par des pompes à chaleur fait augmenter la demande d'électricité, une baisse des prix du courant entraînerait des économies de coûts plus élevées. Selon l'hypothèse servant à évaluer le prix de l'électricité, des carburants et des combustibles, l'ordre des mesures à la figure 1 peut varier.

La courbe de réduction des coûts permet surtout de montrer quelles sont les mesures peu onéreuses et qui devraient donc être mises en œuvre le plus rapidement possible. Cependant, la courbe ne dit rien des mesures qui ne devraient pas être réalisées en raison de leurs coûts. Certaines mesures présentent des avantages indirects en matière de coûts, pour autant qu'on les considère dans le système global. La réduction des coûts est par exemple relativement élevée dans le cas des installations éoliennes. En hiver, leur capacité de production est élevée, ce qui leur permet de compenser en partie la diminution de la production de courant des centrales hydrauliques et photovoltaïques en hiver. Ce faisant, les éoliennes diminuent le besoin de stocker l'énergie. De tels effets ne sont pas pris en considération dans la présente étude. L'analyse repose par ailleurs exclusivement sur une approche économique. D'autres aspects, comme la possibilité de réalisation politique ou l'acceptation dans la société, ne sont pas considérés. Les effets non monétaires comme une amélioration du confort après la rénovation d'un bâtiment (p. ex. par la réduction des courants d'air ou une meilleure insonorisation) n'ont pas non plus été pris en compte. Les effets indirects sur l'économie publique ont aussi été laissés de côté. Car si la rénovation d'un bâtiment entraîne des coûts d'investissement importants, elle augmente également la création de valeur dans la branche de la construction.

Dans la deuxième partie de cette étude, six mesures de sobriété destinées à réduire les émissions d'éq.-CO₂ dans les secteurs de la mobilité, des bâtiments et de l'alimentation ont été examinées. Contrairement aux mesures techniques, ces mesures modifient l'aspect de l'utilité. Par exemple, il serait possible de réduire les distances parcourues quotidiennement en voiture pour se rendre sur son lieu de travail grâce au covoiturage. Cette modification de comportement peut éventuellement offrir un avantage supplémentaire à certaines personnes sous forme de contacts sociaux. Par contre, la perte de flexibilité pourrait être considérée comme une perte d'utilité. Pour la plupart des mesures de sobriété, de tels effets non monétaires pèsent plus lourds que dans le cas des mesures techniques, raison pour laquelle aucune analyse des coûts n'a été réalisée dans ce volet de l'étude. La réduction de la distance parcourue annuellement en voiture, une surface habitable chauffée moindre par personne et des températures plus basses dans les pièces en hiver sont autant de mesures réduisant les émissions dans le pays. Sur le front de l'alimentation, la réduction du gaspillage de denrées et le passage à un régime végétarien ont été examinés. Les émissions dues à l'alimentation ne sont générées qu'à hauteur de 30% en Suisse. Les 70% restants sont produits à l'étranger, par l'importation d'aliments et de fourrage. En accord avec la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, les émissions du trafic aérien international n'ont pas été imputées à l'Inventaire des gaz à effet de serre de la Suisse (BAFU, o. J.). Dans la présente étude, les émissions du trafic aérien international sont considérées comme produites à l'étranger.

A l'exception du trafic aérien international, les progrès techniques conduisent, dans tous les domaines, à des émissions en baisse entre 2018 et 2030, aussi dans le scénario de référence. Concernant le trafic aérien international, l'hypothèse de base est que les améliorations de l'efficacité ne parviendront pas à compenser la demande accrue et donc que les émissions augmenteront entre 2018 et 2030 (figure 2). Pour le calcul du potentiel de réduction des mesures de sobriété, l'hypothèse est la suivante: 50% de réduction par rapport à 2018 pour la distance annuelle parcourue en voiture, pour le trafic aérien international et pour le gaspillage alimentaire, passage à un régime végétarien, surface habitable réduite de 30% par personne et température inférieure de 3 °C dans les pièces en hiver. Les mesures de sobriété examinées pourraient permettre de réduire les émissions d'éq.-CO₂ en Suisse de 5,3 millions de tonnes et de 17,3 millions de tonnes à l'étranger (figure 2). Une réduction au lieu d'une augmentation du trafic aérien international aurait, et de loin, le plus grand effet sur les émissions: la quantité de gaz à effet de serre économisée en 2030 serait comparable à toutes les émissions qui peuvent être économisées par les mesures techniques analysées dans la première partie de cette étude.

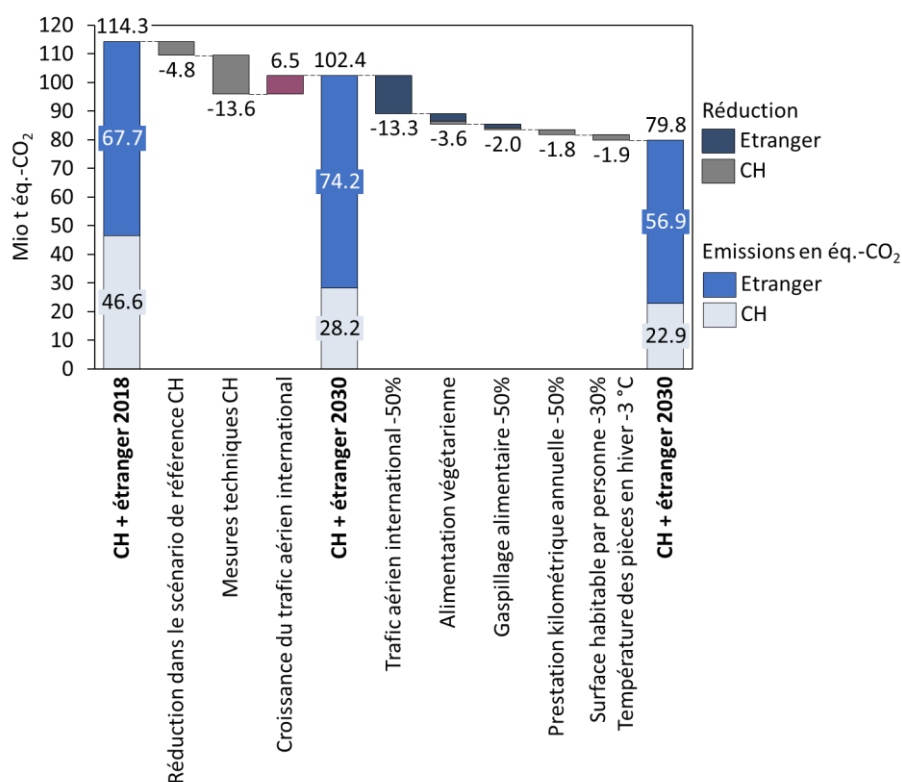


Figure 2. Emissions d'éq.-CO₂ sur le territoire suisse (gris clair) et occasionnées par la Suisse à l'étranger (bleu ciel) en 2030, comparées à celles de l'année 2018. Dans le scénario de référence, les émissions d'éq.-CO₂ de la Suisse en 2030 sont diminuées de 4,8 millions de tonnes par rapport à 2018. La mise en œuvre des mesures techniques examinées dans le présent rapport permettrait de réduire de 13,6 millions de tonnes d'éq.-CO₂ supplémentaires les émissions en Suisse, auxquelles s'ajouteraient les 5,3 millions de tonnes d'éq.-CO₂ économisées sur le territoire national avec les mesures de sobriété. Le potentiel de réduction à l'étranger des mesures de sobriété visant le trafic aérien international et le domaine de l'alimentation est de 17,3 millions de tonnes d'éq.-CO₂.

Un constat important de l'étude est que

- la transition complète vers des voitures, utilitaires légers et camions à motorisation électrique dans le domaine de la mobilité,
- le remplacement de 90% des anciens chauffages par des pompes à chaleur dans le secteur du bâtiment,
- et l'accélération marquée du développement de la production photovoltaïque dans le secteur de l'énergie

permettent une forte réduction des émissions d'éq.-CO₂ et d'importantes économies de coûts pour la société. La mise en œuvre de ces mesures le plus tôt possible est donc recommandée. L'étude montre par ailleurs que les mesures de sobriété, comme la diminution du trafic aérien international ou le passage à un régime végétarien, permettent d'importantes réductions d'éq.-CO₂. Les mesures proposées ne constituent toutefois pas une liste complète ou suffisante pour réduire les émissions de gaz à effet de serre à zéro net.

Des instruments politiques (lois et ordonnances) sont nécessaires pour que les mesures analysées puissent être rapidement mises en œuvre. Le présent rapport doit être une base pour le choix, la priorisation et la conception de ces instruments. Les auteurs recommandent aux décideurs politiques de concrétiser ces instruments le plus rapidement possible.

Interventi tecnici e misure di sufficienza per la riduzione delle emissioni svizzere di gas a effetto serra

Sintesi

Al fine di rallentare o arrestare il progressivo riscaldamento della terra, è necessaria una massiccia riduzione delle emissioni di gas a effetto serra (emissioni di CO₂eq³), che può avvenire solo grazie a interventi di ampio respiro. Il presente studio fornisce un'analisi del potenziale di diverse misure volte alla riduzione delle emissioni di gas serra in Svizzera. Da un lato sono stati presi in esame gli interventi tecnici, dall'altro le misure di sufficienza. Oltre al potenziale di riduzione delle emissioni di CO₂eq, per gli interventi tecnici si è altresì proceduto all'analisi dei risparmi e dei costi economici previsti. Nella scelta delle misure, l'attenzione si è rivolta a tecnologie o processi consolidati e a basso costo impiegabili fin da subito.

La metodologia utilizzata nel presente studio è fondamentalmente la medesima a cui è ricorso McKinsey nel 2009 per effettuare un'analisi dei costi di riduzione della CO₂eq di varie misure di diminuzione dei gas serra in Svizzera (McKinsey, 2009b). McKinsey aveva esaminato i costi economici dei diversi interventi; le imposte, le sovvenzioni o i costi indiretti, quali ad esempio i costi esterni sostenuti a causa del cambiamento climatico, non sono stati presi in considerazione. Dalla pubblicazione dello studio di McKinsey, lo sviluppo tecnologico ha compiuto grandi progressi e il costo di numerose tecnologie a basse emissioni, quali il fotovoltaico e le automobili elettriche, è diminuito in modo significativo. Il presente studio tiene conto di questi sviluppi, analizzando i costi di riduzione sulla base dei dati attuali. Il potenziale di riduzione delle misure è stato determinato confrontando le emissioni generate dall'attuazione degli interventi stessi con le emissioni del caso di riferimento, senza l'attuazione di alcun intervento. Analogamente, i costi degli interventi tecnici sono stati raffrontati con i costi del caso di riferimento. Per i casi di riferimento, sulla base delle proiezioni delle Prospettive energetiche 2050 della Confederazione (Prognos, 2013) e di ulteriori studi (Infras, 2017; TEP Energy & Ecoplan, 2019) si è proceduto alla valutazione della quantità di emissioni che verranno generate nel 2030 qualora le misure in analisi non venissero introdotte.

Non tutti gli interventi tecnici comportano costi aggiuntivi rispetto al caso di riferimento; per alcuni di essi, i costi energetici e/o di manutenzione più contenuti si traducono in un risparmio complessivo sui costi. Ai fini del confronto dell'efficienza dal punto di vista dei costi dei differenti interventi di natura tecnica rispetto alla riduzione della CO₂eq, i costi annuali sono stati stabiliti in relazione al potenziale di riduzione annuale, calcolando così i costi specifici di riduzione per tonnellata di emissioni di CO₂eq evitata.

I risultati degli interventi tecnici sono rappresentati in una curva dei costi di riduzione della CO₂eq, laddove il potenziale di riduzione è indicato sull'ascissa e i costi di riduzione sull'ordinata (figura 1). Sia il potenziale sia i costi sono stati calcolati per l'anno 2030. Secondo l'Inventario svizzero dei gas serra, che registra le emissioni secondo il principio territoriale, le emissioni svizzere di CO₂eq nel 2018 ammontavano a 46,6 milioni di tCO₂eq (BAFU, 2020b). Aumentando l'efficienza energetica e passando parzialmente alle tecnologie che rinunciano ai combustibili fossili, lo scenario di riferimento dell'emissione di CO₂eq dell'intero territorio svizzero può essere ridotto a 41,8 milioni di tCO₂eq entro il 2030 (Schweizerischer Bundesrat, 2017). Gli interventi tecnici di cui alla figura 1 vanno ben oltre lo scenario di riferimento nella transizione verso tecnologie scevre da combustibili fossili, e la loro

³Per poter confrontare l'effetto climatico dei diversi gas serra, si procede alla conversione di tutti i gas in CO₂ equivalenti (*ingl.* equivalents (eq)).

attuazione potrebbe determinare un risparmio pari a ulteriori 13,6 milioni di tCO₂eq, riducendo le emissioni svizzere di CO₂eq a 28,2 milioni di tCO₂eq nel 2030 (figura 2).

Il potenziale degli interventi tecnici di riduzione delle emissioni nel 2030 dipende in larga misura dal momento in cui si procederà alla loro attuazione: il presente studio ipotizza un'esecuzione a partire dal 2021. Qualora ciò avvenisse solo successivamente, il potenziale diminuirà di conseguenza. A titolo esemplificativo, un intervento tecnico può prevedere che tutte le nuove autovetture siano elettriche e dotate di batteria. Ritardare una misura di questo genere comporterebbe l'acquisto di automobili a combustibili fossili negli anni a venire. Pertanto, la quota di veicoli elettrici a batteria nel 2030 risulterebbe inferiore rispetto a uno scenario di esecuzione dell'intervento a partire dal 2021, con conseguenti emissioni più elevate e risparmi economici inferiori nel 2030. Si noti inoltre che la figura 1 mostra soltanto il potenziale di riduzione di CO₂eq e i risparmi/costi finanziari per l'anno 2030, senza illustrare la riduzione delle emissioni della CO₂eq e dei risparmi/costi finanziari risultanti dall'attuazione nel periodo 2021-2029.

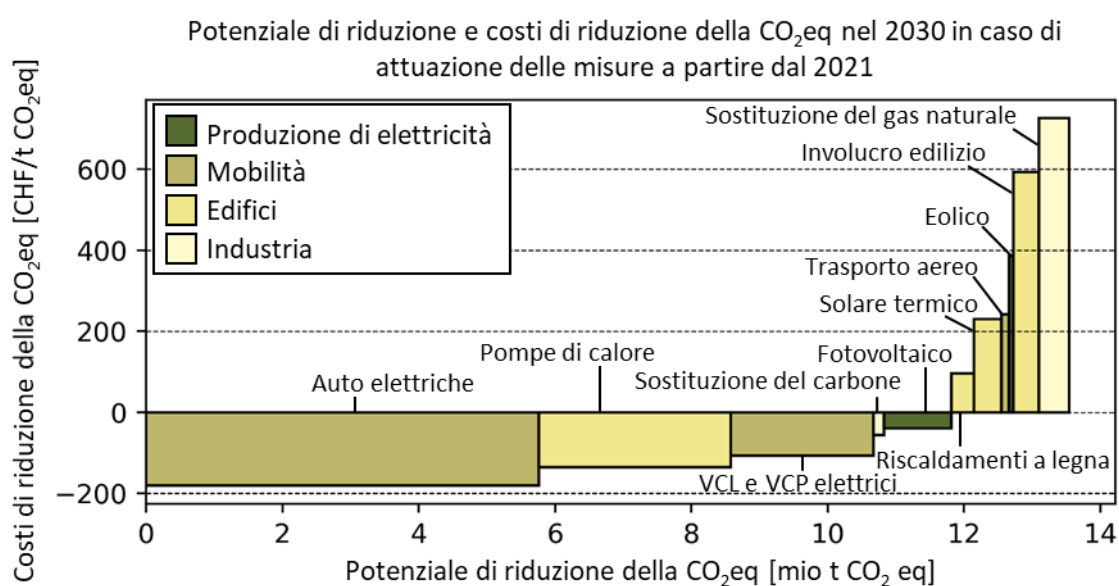


Figura 1. Potenziale di riduzione e costi di riduzione della CO₂eq nel 2030 in caso di attuazione delle misure a partire dal 2021. Più è alto il valore dell'intervento sull'ascissa, maggiore è il potenziale di riduzione di CO₂eq rispetto al caso di riferimento. Costi di riduzione negativi indicano risparmi finanziari nell'attuazione della misura. All'estrema sinistra si evince la misura con i maggiori risparmi finanziari, mentre sulla destra diminuiscono i risparmi, ovvero aumentano i costi per tonnellata di emissioni di CO₂eq evitata.

L'analisi degli interventi tecnici selezionati mostra che la maggior parte del potenziale di riduzione interessa i settori della mobilità e dell'edilizia. Le misure con il maggior potenziale di riduzione sono il passaggio alla mobilità elettrica delle autovetture ("auto elettriche"), dei veicoli commerciali leggeri e pesanti ("VCL e VCP elettrici") e la sostituzione dei sistemi di riscaldamento alimentati a combustibili fossili con pompe di calore ("pompe di calore"), che insieme rappresentano l'80% del potenziale di riduzione di tutte le misure esaminate (figura 1). Mediante l'introduzione di tali misure a partire dal 2021, nel 2030 sarebbe possibile un risparmio sui costi economici pari a 1.650 mio. CHF. Inoltre, a livello economico, anche la sostituzione del carbone nella produzione del cemento ("sostituzione del carbone") e la costruzione di nuovi impianti fotovoltaici ("fotovoltaico") determinano risparmi sui costi. L'attuazione di tutte le misure in disamina comporterà nel 2030 un risparmio netto sui costi pari a 980 mio. CHF.

La curva dei costi di riduzione per la CO₂eq si basa su diverse previsioni e ipotesi, alcune delle quali sono caratterizzate da un grado maggiore di incertezza. Pertanto, per indagare in che modo tali parametri influenzino i risultati, si è fatto ricorso a delle analisi di sensibilità. I risparmi sui costi

derivanti dal passaggio all'elettromobilità e al riscaldamento con pompe di calore dipendono in primis dai futuri prezzi di elettricità, carburanti e combustibili. Tra il 2018 e il 2030 l'Agenzia internazionale dell'energia (AIE) prevede un aumento del prezzo del petrolio del 30%: questa previsione è stata utilizzata per il calcolo dei risultati riassunti nella figura 1. L'analisi di sensibilità indica che le tre misure con il maggiore potenziale di riduzione di CO₂eq, pur mantenendo lo stesso prezzo del petrolio, nel 2030 offrono comunque risparmi a livello economico, ancorché ridotti a 770 mio. CHF. Poiché la conseguenza del passaggio all'elettromobilità e al riscaldamento con pompe di calore è un aumento della domanda di elettricità, un calo del prezzo dell'energia elettrica comporterebbe ulteriori risparmi sui costi. A seconda dell'ipotesi relativa al prezzo di elettricità, carburante e combustibile, l'ordine degli interventi di cui alla figura 1 può variare.

La curva dei costi di riduzione è soprattutto adatta a indicare quali misure risultino maggiormente economiche e dovrebbero pertanto essere introdotte il più rapidamente possibile; tuttavia, la curva non segnala in alcun modo quali interventi *non* dovrebbero venire attuati a causa dei costi. Alcune misure offrono vantaggi indiretti in termini di costi, se considerate nel sistema generale. Ad esempio, gli impianti eolici presentano costi di riduzione relativamente elevati, ma offrono un'alta capacità produttiva in inverno, riuscendo pertanto a compensare parzialmente un'inferiore produzione invernale di energia idroelettrica e degli impianti fotovoltaici. Gli impianti eolici riducono così la necessità di accumulatori di energia. Tali effetti non sono presi in considerazione nel presente studio. Inoltre, l'analisi si basa esclusivamente su una prospettiva economica, tralasciando ulteriori aspetti quali la fattibilità politica o l'accettazione sociale, nonché gli effetti non monetari, come l'aumento del comfort successivo a una ristrutturazione edilizia (ad es. grazie a meno spifferi oppure a un maggiore isolamento acustico). Analogamente, non sono stati presi in considerazione nemmeno gli effetti indiretti sull'economia: ad esempio, le ristrutturazioni determinano elevati costi di investimento, apportando tuttavia anche un aumento del valore aggiunto nel settore edilizio.

La seconda parte del presente studio verte sull'analisi di sei misure di sufficienza volte alla riduzione delle emissioni di CO₂eq nei settori della mobilità, dell'edilizia e dell'alimentazione. A differenza degli interventi di natura tecnica, queste misure potrebbero comportare dei cambiamenti in termini di benefici. Ad esempio, si potrebbe ridurre la distanza di viaggio percorsa giornalmente in automobile mediante il carpooling per recarsi sul luogo di lavoro: un tale cambiamento di abitudini può rappresentare come valore aggiunto per alcune persone il contatto sociale, ma la perdita di flessibilità potrebbe essere percepita come una riduzione dei vantaggi. Poiché per la maggior parte delle misure di sufficienza tali effetti non monetari hanno un peso maggiore rispetto agli interventi tecnici, per questo tipo di misure non è stata effettuata alcuna analisi dei costi. La riduzione del chilometraggio annuale dell'automobile, uno spazio abitativo riscaldato più piccolo per persona e una temperatura ambiente inferiore in inverno rappresentano misure che riducono le emissioni a livello nazionale. Nel campo dell'alimentazione, sono stati esaminati la prevenzione delle perdite alimentari e il passaggio da una dieta a base di carne a una vegetariana. Tuttavia, in Svizzera viene generato solo il 30% delle emissioni alimentari: il restante 70% viene prodotto all'estero, dall'importazione di alimenti e mangimi. In conformità alla Convenzione delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, le emissioni causate dai viaggi aerei internazionali non sono conteggiate nell'Inventario svizzero dei gas serra (BAFU, o .J.): il presente studio considera invece tali emissioni come generate all'estero.

Oltre ai viaggi aerei internazionali, i progressi tecnologici in tutti i settori portano a minori emissioni tra il 2018 e il 2030 anche nello scenario di riferimento. Per quanto riguarda il trasporto aereo internazionale, si è ipotizzato che l'aumento in termini di efficienza non potrà compensare l'incremento della domanda, e che quindi tra il 2018 e il 2030 si verificherà un aumento delle emissioni (figura 2). Ai fini del calcolo del potenziale di riduzione delle misure di sufficienza, si è presupposto quanto segue: riduzione del 50% rispetto al 2018 per chilometraggio annuale delle automobili, trasporto aereo internazionale e perdite alimentari; passaggio a una dieta vegetariana; spazi abitativi a persona inferiori del 30% e temperatura ambiente di 3 °C inferiore nella stagione invernale. Le misure di sufficienza di cui sopra potrebbero ridurre le emissioni di CO₂eq di 5,3 mio. tCO₂eq sul territorio svizzero e di 17,3 mio. tCO₂eq all'estero (figura 2). Il

contributo principale alla riduzione delle emissioni deriverebbe da una diminuzione dei viaggi aerei internazionali invece del loro aumento: la quantità di gas serra così risparmiata è paragonabile alle emissioni totali che si potrebbero evitare nel 2030 grazie agli interventi tecnici esaminati nella prima parte del presente studio.

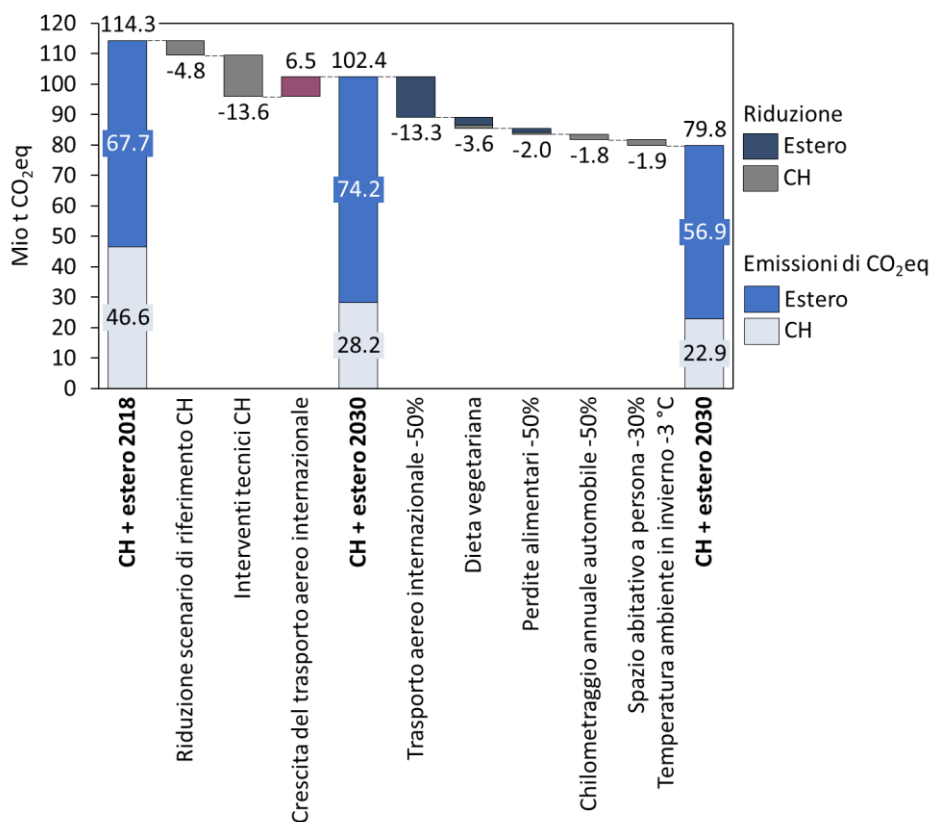


Figura 2. Emissioni di CO₂eq sul territorio svizzero (grigio chiaro) e prodotte dagli svizzeri all'estero (azzurro) nel 2030 rispetto al 2018. Nello scenario di riferimento, le emissioni svizzere di CO₂eq nel 2030 saranno ridotte di 4,8 mio. tCO₂eq rispetto al 2018. Con l'attuazione degli interventi tecnici analizzati nel presente rapporto, a livello nazionale si potrebbero ridurre ulteriori 13,6 mio. tCO₂eq, mentre grazie alle misure di sufficienza 5,3 mio. di tCO₂eq. Il potenziale di riduzione all'estero legato alle misure di sufficienza per contenere il trasporto aereo internazionale e nell'industria alimentare ammonta a 17,3 mio. tCO₂eq.

Un'importante nozione evinta dallo studio è che

- la completa transizione verso autovetture, furgoni e camion elettrici a batteria nella mobilità,
- la sostituzione del 90% dei vecchi riscaldamenti a favore delle pompe di calore nel settore edile e
- una notevole accelerazione dell'espansione del fotovoltaico nel settore energetico

consentono una significativa riduzione delle emissioni di CO₂eq nonché ingenti risparmi sui costi economici. Risulta pertanto opportuno iniziare ad attuare tali misure quanto prima. Inoltre, lo studio mostra che sono possibili ampie riduzioni di CO₂eq in virtù delle misure di sufficienza, come la riduzione del trasporto aereo internazionale o l'abbandono di una dieta a base di carne a favore di quella vegetariana. La combinazione delle misure proposte non è tuttavia completa né sufficiente a limitare le emissioni di gas serra e raggiungere un saldo netto pari a zero.

Per la rapida attuazione delle misure analizzate si rendono necessari strumenti politici (leggi e ordinanze). La presente relazione intende fornire una base per la selezione, la definizione delle priorità e la progettazione di tali strumenti. Gli autori raccomandano ai decisori politici di procedere il prima possibile all'attuazione dei predetti strumenti.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	i
Résumé.....	v
Sintesi.....	x
Inhaltsverzeichnis.....	xiv
Abbildungsverzeichnis.....	xvii
Tabellenverzeichnis.....	xix
Glossar.....	xx
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangslage und Motivation.....	1
1.2 Ziele der Studie.....	2
1.3 Rahmenbedingungen und Einschränkungen.....	3
1.4 Die Situation in der Schweiz.....	3
2 Methode.....	5
2.1 Untersuchte Massnahmen.....	5
2.2 Systemgrenzen.....	6
2.3 Referenzfälle und Referenzszenario.....	7
2.4 CO ₂ eq-Reduktionspotential.....	8
2.5 CO ₂ eq-Reduktionskosten.....	8
2.6 CO ₂ eq-Reduktionskostenkurve.....	10
3 CO₂eq-Reduktionskostenkurve.....	12
3.1 CO ₂ eq-Reduktionspotential und –kosten im Jahr 2030 bei Umsetzung der Massnahmen ab dem Jahr 2021.....	12
3.2 Einfluss des Umsetzungszeitpunkts.....	14
3.3 Sensitivitätsanalyse für sektorenübergreifende Parameter.....	16
3.3.1 Stagnierende Rohöl- und Erdgaspreise.....	17
3.3.2 Abnahme des Rohöl- und Erdgaspreises im Vergleich zu 2018.....	17
3.3.3 Abnahme des Strompreises im Vergleich zu 2018.....	18
3.3.4 Zunahme des Strompreises im Vergleich zu 2018.....	19
3.3.5 Erhöhter Stromemissionsfaktor.....	20
3.3.6 Erhöhte Zins- und Diskontrate.....	21
3.3.7 Zusammenfassung sektorenübergreifende Sensitivitätsanalyse.....	21

4	Sektorenanalyse	23
4.1	Mobilitätssektor	23
4.1.1	Neuwagen ausschliesslich batterieelektrisch (E-PKWs)	23
4.1.2	Neue Leichtnutzfahrzeuge (LNFs) und Schwerlastnutzfahrzeuge (SNFs) ausschliesslich elektrisch	33
4.1.3	Inlandflüge durch Zugreisen ersetzen	36
4.2	Gebäudesektor	38
4.2.1	Heizungersatz mit 90 % Wärmepumpen	39
4.2.2	Heizungersatz mit 10 % Holzpellet-Heizungen	42
4.2.3	Unterstützung fossiler Heizsysteme mit Solarthermie.....	43
4.2.4	Gebäudehülle sanieren	43
4.3	Industriesektor	45
4.3.1	Erdgas für Prozesswärme in der Industrie durch Biomethan ersetzen.....	46
4.3.2	Kohle in der Zementindustrie durch alternative Brennstoffe ersetzen	47
4.4	Land- und Forstwirtschaftssektor.....	48
4.4.1	Wiedervernässung von Hochmooren.....	48
4.5	Stromproduktion	50
4.5.1	Ausbau der Photovoltaik	50
4.5.2	Ausbau der Windenergie.....	52
5	Suffizienz-Massnahmen	54
5.1	Einleitung.....	54
5.2	CO ₂ eq-Emissionen: Schweiz und Ausland	55
5.3	Übersicht über Suffizienz-Massnahmen.....	55
5.4	Suffizienz im Gebäudesektor.....	56
5.4.1	Kleinere Wohnfläche pro Person	56
5.4.2	Tiefere Raumtemperaturen in Innenräumen im Winter.....	58
5.4.3	CO ₂ eq-Reduktionspotential bei Kombination der beiden Suffizienz-Massnahmen im Gebäudebereich	59
5.5	Suffizienz in der Mobilität	60
5.5.1	Reduktion der jährlichen Fahrleistung von PKWs	60
5.5.2	Reduktion der Emissionen aus dem internationalen Flugverkehr	62
5.6	Suffizienz bei der Ernährung	63
5.6.1	Lebensmittelverluste verhindern	64
5.6.2	Vegetarische oder vegane statt fleischhaltige Ernährung	64
5.7	Schlussfolgerungen Suffizienz-Massnahmen	65
	Diskussion.....	68
	Literaturverzeichnis.....	71

Anhang	77
A. 1. Annahmen und Berechnungsgrundlagen.....	77
A. 1. 1. Annahmen Emissionsfaktor Strom	77
A. 1. 2. Sektorenübergreifende Annahmen.....	77
A. 1. 3. Mobilitätssektor	78
A. 1. 4. Gebäudesektor	83
A. 1. 5. Industriesektor	86
A. 1. 6. Stromsektor.....	89
A. 1. 7. Land- und Forstwirtschaftssektor.....	91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. CO ₂ eq-Reduktionspotential und CO ₂ eq-Reduktionskosten im Jahr 2030 bei Umsetzung der Massnahmen ab 2021.....	ii
Abbildung 2. CO ₂ eq-Emissionen innerhalb der Schweizer Grenze (hellgrau) und durch Schweizer Konsum im Ausland verursacht (hellblau) im Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 2018.....	iv
Abbildung 3. CO ₂ eq-Emissionen in der Schweiz im Jahr 2018 und ihre Aufteilung nach Sektoren.	4
Abbildung 4. CO ₂ eq-Emissionen in der Schweiz im Referenzszenario im Jahr 2030 und die Aufteilung nach Sektoren gemäss der Botschaft des Schweizer Bundesrates zur Totalrevision des CO ₂ -Gesetzes (2017).	7
Abbildung 5. Beispiel einer CO ₂ eq-Reduktionskostenkurve.	10
Abbildung 6. CO ₂ eq-Reduktionspotential und CO ₂ eq-Reduktionskosten im Jahr 2030 bei Umsetzung der Massnahmen ab 2021.....	13
Abbildung 7. CO ₂ eq-Reduktionspotential der Massnahmen im Jahr 2030 a) bei Umsetzung ab 2021 bis 2030 und b) bei Umsetzung erst im Jahr 2030.....	15
Abbildung 8. Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionspotential und CO ₂ eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit stagnierendem Rohölpreis und Erdgaspreis verglichen zu Preisen im Jahr 2018. ..	17
Abbildung 9. Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionspotential und CO ₂ eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit um 30 % reduziertem Rohölpreis und Erdgaspreis verglichen zu Preisen im Jahr 2018.	18
Abbildung 10. Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionspotential und CO ₂ eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit um 30 % reduziertem Strompreis verglichen zu 2018.	19
Abbildung 11. Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionspotential und CO ₂ eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit um 30 % erhöhtem Strompreis verglichen zu 2018.....	19
Abbildung 12. Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionspotential und CO ₂ eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit 5-fach erhöhtem Stromemissionsfaktor verglichen zu Basisannahmen von 50 gCO ₂ eq/kWh.	20
Abbildung 13. Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionspotential und CO ₂ eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit einem Zins- und Diskontsatz von 3 % anstelle von 0.5 %.....	21
Abbildung 14. Neue PKWs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq Reduktionskosten in Abhängigkeit des Strompreises und der Treibstoffpreise im Jahr 2030.	30
Abbildung 15. Neue PKWs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit der Werkstattkostendifferenz zwischen Benzin/Diesel-PKWs und E-PKWs für 4 verschiedenen Batteriekapazitäten (40, 60, 80 und 100 kWh) im Jahr 2030.	31
Abbildung 16. Neue PKWs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionspotential in Abhängigkeit des Stromemissionsfaktors im Jahr 2030 und für 4 verschiedenen Annahmen zur jährlichen Fahrleistung von Neuwagen (11'000, 15'000, 19'000 und 23'000 km).	32
Abbildung 17. Neue PKWs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für Stromverbrauch in Abhängigkeit der jährlichen Fahrleistung von Neuwagen im ersten Jahr.....	33
Abbildung 18. Neue LNFs & SNFs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq Reduktionskosten in Abhängigkeit des Strompreises und der Treibstoffpreise im Jahr 2030.	35

Abbildung 19. Neue LNFs & SNFs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit des Werkstattkosten-Vorteil bzw. Nachteil für E-LNF und E-SNF gegenüber fossil betriebenen Fahrzeugen mit drei verschiedenen Annahmen für die Batterielebensdauer eines E-SNFs (100'000, 200'000, 400'000 km).....	36
Abbildung 20. Inlandflüge durch Zugreisen ersetzen: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit der Differenz zwischen Zug- und Flugpersonenkilometerkosten und für verschiedene Annahmen für den CO ₂ eq-Emissionsfaktor der Flugpersonenkilometer.....	38
Abbildung 21. Heizungsersatz mit Wärmepumpen: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit des Strompreises und des Heizölpreises im Jahr 2030.	41
Abbildung 22. Heizungsersatz mit Wärmepumpen: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionspotential und Stromverbrauch im Jahr 2030 in Abhängigkeit der durchschnittlichen JAZ von Wärmepumpen bei linearer Zunahme der JAZ ab dem Jahr 2018. Das CO ₂ eq-Reduktionspotential ist für vier verschiedene Stromemissionsfaktoren gezeigt.....	42
Abbildung 23. Gebäudehüllen sanieren: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit der Mehrkosten, welche für einen geringeren jährlichen Wärmebedarf investiert werden müssen.	45
Abbildung 24. Ausbau der Photovoltaik: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit des Emissionsfaktors und für 4 verschiedene Annahmen für die Gesteungskosten des Referenzstroms im Jahr 2030 (67, 74, 81, 89 CHF/MWh).....	51
Abbildung 25. Ausbau der Windenergie: Sensitivitätsanalyse für CO ₂ eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit der Unterhaltskosten für 4 verschiedene Annahmen für die Gesteungskosten des Referenzstroms im Jahr 2030 (67, 74, 81, 89 CHF/MWh).....	53
Abbildung 26. CO ₂ eq-Emissionen innerhalb der Schweizer Landesgrenzen im Jahr 1990, 2018 und 2030 im Vergleich zu den Reduktionspotentialen im Referenzszenario und durch zusätzliche technische Massnahmen. Zudem ist auch der totale durch Schweizer verursachte CO ₂ eq-Austoss inklusiv Konsum ausländischer Güter und internationale Flugreisen gezeigt.	55
Abbildung 27. Suffizienz-Massnahme «Kleinere beheizte Wohnfläche pro Person».....	58
Abbildung 28. CO ₂ eq-Emissionen verursacht durch die Bereitstellung von Raumwärme in Schweizer Wohngebäuden im Jahr 2030 in Abhängigkeit der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person und Raumtemperatur im Winter.	59
Abbildung 29. CO ₂ eq-Reduktionspotential im Jahr 2030 der beiden Suffizienz-Massnahmen «Kleinere beheizte Wohnfläche pro Person» und «Raumtemperatur 20 °C anstatt 23 °C».....	60
Abbildung 30. a) CO ₂ eq-Emissionen verursacht durch die gesamte jährliche Fahrleistung aller Schweizer PKWs im Jahr 2030. b) CO ₂ eq-Reduktionspotential bei Reduktion der jährlichen Fahrleistung für Referenzszenario und mit Umsetzung der technischen Massnahme «Neuwagen ausschliesslich batterieelektrisch».	61
Abbildung 31. CO ₂ eq-Reduktionspotential im Jahr 2030, wenn die Emissionen von internationalen Flugreisen nicht steigen oder um 50 % sinken gegenüber 2015 oder komplett vermieden werden. .	63
Abbildung 32. CO ₂ eq-Reduktionspotential in der Schweiz und im Ausland in Abhängigkeit vom Anteil vermiedener Lebensmittelverluste.....	64
Abbildung 33. CO ₂ eq-Reduktionspotential in der Schweiz und im Ausland verschiedener Ernährungsstile.	65

Abbildung 34. CO₂eq-Emissionen innerhalb der Schweizer Grenzen und von Schweizern im Ausland verursacht im Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 2018 und Reduktionspotentiale der technischen Massnahmen und Suffizienz-Massnahmen. 66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Übersicht über die untersuchten Massnahmen.	5
Tabelle 2. Übersicht über das CO ₂ eq-Reduktionspotential [Mio. tCO ₂ eq/Jahr] und die CO ₂ eq-Reduktionskosten [CHF/tCO ₂ eq] im Jahr 2030, wenn die Massnahmen ab 2021 umgesetzt werden. 13	
Tabelle 3. Parameter der sektorenübergreifenden Sensitivitätsanalyse. Variation der Annahmen für das Jahr 2030.	16
Tabelle 4. Sektorenübergreifende Sensitivitätsanalyse: CO ₂ eq-Reduktionskosten.	22
Tabelle 5. Sektorenübergreifende Sensitivitätsanalyse: Totale Massnahmenkosten.	22
Tabelle 6. Werkstattkosten (Wartungs- und Reparaturkosten) für Autos mit Verbrennungsmotor und Elektromotor: Vergleich zwischen Literaturangaben und eigener Analyse basierend auf (ADAC, 2020a). Angaben gelten für Neuwagen (maximal 5 Jahre Haltungsdauer) und 10'000 - 15'000 km jährliche Fahrleistung.	28
Tabelle 7. Neue batterieelektrische PKWs: Vergleich von Kosten, Energieverbrauch und CO ₂ eq-Ausstoss im Jahr 2030 zu fossil betriebenen PKWs.	29
Tabelle 8. Neue batterieelektrische LNFs und SNFs: Vergleich von Kosten, Energieverbrauch und CO ₂ eq-Ausstoss im Jahr 2030.	34
Tabelle 9. Kostendifferenz zwischen einer Wärmepumpe und einem fossilen Heizsystemen im Jahr 2030. Investitions- und Unterhaltskosten berechnet basierend auf (WWF Schweiz, 2016) als gewichteter Durchschnitt für 57 % Einfamilienhäuser und 43 % Mehrfamilienhäuser (BFS, 2019c). Alle Angaben ohne MWST, Mineralölsteuer, CO ₂ -Abgabe und andere Steuern.	40
Tabelle 10. Kostendifferenz zwischen einer Pelletheizung und einem fossilen Heizsystemen im Jahr 2030. Investitions- und Unterhaltskosten berechnet basierend auf (WWF Schweiz, 2016) als gewichteter Durchschnitt für 57 % Einfamilienhäuser und 43 % Mehrfamilienhäuser (BFS, 2019c). Alle Angaben ohne MWST, Mineralölsteuer, CO ₂ -Abgabe und andere Steuern.	42
Tabelle 11. Kostendifferenz pro Gebäudesanierung zwischen Massnahmen und Referenzfall im Jahr 2030 für 10 MWh/Jahr mehr Wärmebedarf-Reduktion.	44
Tabelle 12. Übersicht über die untersuchten Suffizienz-Massnahmen.	56
Tabelle 13. CO ₂ eq-Reduktionspotentiale der Suffizienz-Massnahmen im Jahr 2030.	65

Glossar

CO ₂ eq-Emissionen	Emissionen von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen umgerechnet in CO ₂ -Äquivalente für einen Zeithorizont von 100 Jahren.
Politisches Instrument	Mittel, welches in einem Gesetz oder einer Verordnung festgeschrieben wird, um eine Massnahme zu fördern oder durchzusetzen.
Lebensdauer	Zeit, während der die Massnahme nach der Umsetzung wirksam bleibt. Ein Heizsystem wird zum Beispiel im Durchschnitt alle 25 Jahre ersetzt und hat daher eine Lebensdauer von 25 Jahren.
Massnahme	Vorgeschlagenes Mittel, um CO ₂ eq-Reduktionen zu erzielen. Beispiele von Massnahmen, welche in der vorliegenden Studie untersucht wurden, sind der Ersatz von Erdgas in der Industrie durch Biomethan oder dass bei Sanierungen von Gebäudehüllen der höchste Effizienzstandard umgesetzt wird.
Referenzfall	Gegenstück zu <i>einer</i> spezifischen Massnahme. Fall, der eintreten würde, wenn eine spezifische Massnahme nicht oder nur teilweise umgesetzt würde.
Referenzszenario	Szenario, welches eintreten würde, wenn die untersuchten Massnahmen nicht oder nur teilweise umgesetzt würden.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Der Klimawandel ist eine der grössten gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Um die katastrophalen Konsequenzen steigender Durchschnittstemperaturen zu begrenzen, müssen umfassende Massnahmen zur Reduktion und Vermeidung der Emissionen von Kohlenstoffdioxid und anderen Treibhausgasen getroffen werden. Solche Massnahmen beinhalten neben der grossflächigen Verbreitung emissionsarmer Technologien auch die verbesserte Effizienz in der Energienutzung, die Schaffung von Kohlenstoffsinken sowie Suffizienz-Massnahmen. Verschiedene Massnahmen haben ein unterschiedliches Potential CO₂eq-Emissionen effektiv zu senken. Zudem verursacht deren Einführung auch unterschiedlich hohe volkswirtschaftliche Kosten⁴: Während einige Massnahmen sehr hohe Kosten verursachen, bieten andere nicht nur ein hohes CO₂eq-Reduktionspotential sondern auch eine Einsparung bei den volkswirtschaftlichen Kosten im Vergleich zu ihren emissionsreichen Alternativen.

Um eine faktenbasierte Diskussion über mögliche Massnahmen zur CO₂eq-Emissionsreduktion zu führen, ist es wichtig, die Potentiale verschiedener Massnahmen vergleichbar aufzuzeigen. Dies ist auch von Relevanz für politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger, die Instrumente zur Umsetzung dieser Massnahmen einführen müssen. Aus diesem Grund veröffentlichte McKinsey & Co. 2007 einen Bericht mit einer Kurve, welche das Potential einzelner Massnahmen zur Reduktion der globalen CO₂eq-Emissionen und die damit verbundenen Kosten darstellt (McKinsey, 2007). Diesem ersten Bericht folgten weitere Analysen zu einzelnen Ländern, inklusive der Schweiz (McKinsey, 2009b), sowie eine Aktualisierung der globalen Analyse im Jahr 2009 (McKinsey, 2009a). Während diese Analysen und die dazugehörigen CO₂eq-Reduktionskostenkurven dafür kritisiert wurden, dass sie die Komplexität des Gesamtsystems nicht berücksichtigen und zu viele Vereinfachungen enthalten, bieten sie eine umfassende Übersicht über das Potential und die Kosten verschiedener Massnahmen, um CO₂eq-Emissionen zu reduzieren.

Heute im Jahr 2020 ist die Notwendigkeit der Umsetzung von Massnahmen zur Reduktion der CO₂eq-Emissionen offensichtlicher denn je. Seit der Veröffentlichung der McKinsey-Berichte hat die technologische Entwicklung jedoch grosse Fortschritte gemacht. Die Kosten vieler emissionsarmer Technologien, wie Photovoltaik und Elektroautos, sind erheblich gesunken und zusätzliche Technologien sind auf den Markt gekommen. In der Schweiz soll ein neues CO₂-Gesetz neue Klimaschutzregeln bis 2030 festlegen und der Bundesrat hat das Netto-Null-Ziel für das Jahr 2050 beschlossen (BAFU, 2020a). Zudem wird momentan ein neues Energiegesetz erarbeitet. Umwelt- und zivile Verbände fordern das Netto-Null-Ziel für 2030. Letzteres entspricht dem Schweizer Beitrag, um das 1.5 °C-Szenario des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 % zu erreichen (Rohrer, 2019). Könnten alle Länder ihren Beitrag zur Verringerung der CO₂eq-Emissionen einhalten, würde mit hoher Wahrscheinlichkeit die globale Durchschnittstemperatur um maximal 1.5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Wert steigen. Daher ist es wichtig, aktuelle Informationen zu den CO₂eq-Reduktionspotentialen und den zu erwartenden volkswirtschaftlichen Kosten der Realisierung dieser Potentiale zu kennen, um eine faktenbasierte Diskussion über die Vor- und Nachteile verschiedener Massnahmen und die vorgelagerten politischen Instrumente zu führen. Politische Instrumente sind Gesetze oder Verordnungen, welche zum Beispiel Standards, Verbote oder

⁴ Die volkswirtschaftlichen Kosten werden hier als die Summe aller direkten Kosten definiert, welche die Einführung einer Massnahme verursacht, unabhängig davon, wer diese Kosten innerhalb der Gesellschaft trägt. Diese Kosten beinhalten Investitions- und Unterhaltskosten, jedoch keine Steuern, Subventionen oder indirekte Kosten, wie zum Beispiel Kosten als Folge des Klimawandels (siehe Kapitel 2.5).

finanzielle Förderprogramme festlegen.

Der vorliegende Bericht und die dahinterstehende Analyse haben zum Zweck, aktualisierte Informationen zu den CO₂eq-Reduktionspotentialen sowie zu den zu erwartenden volkswirtschaftlichen Kosten verschiedener Massnahmen zu liefern. Diese Massnahmen beinhalten Umsetzungsvorschläge, wie CO₂eq-Emissionen eingespart werden können. Sie geben aber keinen Aufschluss darüber, welche politischen Instrumente nötig sind, um deren tatsächliche Umsetzung einzuleiten. Die Analyse folgt dabei mehrheitlich dem Ansatz von McKinsey, der einen ausschliesslich ökonomischen Blickwinkel einnimmt und nicht-ökonomische Abwägungen, wie die politische Realisierbarkeit oder gesellschaftliche Akzeptanz, ausser Betracht lässt. Wie im nächsten Abschnitt ausführlicher beschrieben, ist das Ziel der Analyse, einen ersten Vergleich verschiedener Massnahmen und derer Reduktionspotentiale und Kosten anzustellen und so den Weg für weitergehende Analysen und Diskussionen zu ebnet.

1.2 Ziele der Studie

Das Ziel der vorliegenden Studie ist zu analysieren, welche Massnahmen zur Reduktion der CO₂eq-Emissionen in der Schweiz aus heutiger Sicht kurzfristig umsetzbar und kostengünstig sind. Dabei wird untersucht, wie hoch die Einsparpotentiale dieser Massnahmen in Bezug auf die CO₂eq-Emissionen und die Kosten für die Schweizer Volkswirtschaft sind. Dabei werden im ersten Teil (Kapitel 3 und 4) technische Massnahmen analysiert und in einer CO₂eq-Reduktionskostenkurve zusammengefasst. Die CO₂eq-Reduktionskostenkurve zeigt das Reduktionspotential und die Kosten der verschiedenen Massnahmen und bietet somit eine Übersicht über deren Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Da das Jahr 2030 oft als Ziel-Jahr genannt wird, um Netto-Null zu erreichen (siehe oben), zeigt der vorliegende Bericht das CO₂eq-Reduktionspotential für das Jahr 2030 auf. Es wurde angenommen, dass das analysierte Massnahmenpaket bereits ab 2021 umgesetzt wird. Ein Beispiel für eine Massnahme ist der Ersatz von 90 % der alten Heizungen, die am Ende ihrer Lebensdauer angekommen sind, mit Wärmepumpen. Das CO₂eq-Einsparpotential dieser Massnahme im Jahr 2030 ist stark davon abhängig, wann mit der Umsetzung begonnen wird, denn der Anteil an fossilen Heizsystemen am Heizungsbestand im Jahr 2030 hängt davon ab, in welchem Jahr angefangen wird, ausschliesslich erneuerbare Heizsysteme einzubauen. Wenn bereits ab dem Jahr 2021 90 % der alten Heizungen mit Wärmepumpen ersetzt werden, besteht im Jahr 2030 ein viel grösserer Anteil des Heizungsbestands aus Wärmepumpen, als wenn diese Massnahme erst ab dem Jahr 2025 oder 2030 umgesetzt wird. Für alle Massnahmen, deren CO₂eq-Einsparpotentiale im Jahr 2030 vom Zeitpunkt abhängig sind, ab dem mit der Umsetzung begonnen wird, wurde angenommen, dass sie bereits ab 2021 umgesetzt werden. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt jeweils auf, welchen Einfluss verschiedene Annahmen wie beispielsweise der zukünftige Öl- oder Strompreis auf die Ergebnisse haben.

In Kapitel 5 wird zudem das jährliche CO₂eq-Reduktionspotential von Suffizienz-Massnahmen analysiert. Im Unterschied zu den technischen Massnahmen ergibt sich bei Suffizienz-Massnahmen eine Änderung des Nutzens (Fischer & Griebhammer, 2013). Zum Beispiel kann durch die Bildung von Fahrgemeinschaften zum Arbeitsplatz die Anzahl gefahrener Kilometer pro Auto und somit CO₂eq-Emissionen reduziert werden. Eine Fahrgemeinschaft bedeutet eventuell für einige Personen einen zusätzlichen Nutzen wegen sozialen Kontakten, für andere bedeutet der Verlust von Flexibilität hingegen eine Verminderung des Nutzen. Da diese Nutzenänderungen schwierig monetär zu beziffern sind, werden diese Suffizienz-Massnahmen separat untersucht und nicht in der Reduktionskostenkurve gezeigt.

1.3 Rahmenbedingungen und Einschränkungen

Es ist wichtig zu beachten, dass die Berechnung der zukünftigen Potentiale der einzelnen Massnahmen auf heute verfügbaren Daten und Annahmen beruhen und deshalb keine Angaben über tatsächliche zukünftige CO₂eq-Emissionseinsparungen, deren Kosten und Technologieentwicklungen gemacht werden können. In der vorliegenden Studie wurde der Fokus prioritär auf reife und marktnahe Massnahmen gelegt, welche bis 2030 in grossem Ausmass umsetzbar und kostengünstig sind. Technologien, die in der Schweiz noch nicht auf dem Markt sind, wurden deshalb ausgeklammert. Die Zusammenstellung an vorgeschlagenen Massnahmen ist keinesfalls vollständig. Schlussendlich möchten wir betonen, dass die weitgehende Umsetzung der analysierten Massnahmen ohne finanzielle oder regulatorische Anreize wohl nicht machbar ist, obwohl einige Massnahmen Kosteneinsparung gegenüber dem Nicht-Umsetzen der Massnahme bedeuten. Der Grund ist nicht nur, dass Menschen nicht primär rational oder gar gewinnmaximierend entscheiden und handeln, sondern auch, dass viele andere Hindernisse wie zum Beispiel das Mieter-Vermieter-Dilemma (principal agent problem, Investor zahlt Betriebskosten nicht) oder hohe Transaktionskosten (klimafreundliche Lösungen sind schlicht nicht bekannt oder gute Erfahrung fehlt) bestehen. Es ist an den politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsträgern, die Priorität der einzelnen Massnahmen zu gewichten und geeignete Instrumente zu deren Umsetzung zu implementieren. Je nach Massnahme und eingesetzten politischen Instrumenten entstehen unterschiedliche volkswirtschaftliche Zusatzkosten oder Einsparungen. Welche Instrumente am effizientesten zur Umsetzung der Massnahmen beitragen, ist nicht Inhalt der vorliegenden Studie.

1.4 Die Situation in der Schweiz

Im Jahr 2018 betragen die gesamthaft auf Schweizer Boden ausgestossenen Treibhausgasemissionen 46.4 Mio. tCO₂eq (BAFU, 2020b), was einem CO₂eq-Ausstoss von 5.5 Mio. tCO₂eq pro Kopf entspricht (siehe Abbildung 3). Diese Zahlen beinhalten jedoch weder den internationalen Schiff- und Flugverkehr noch die durch Importgüter im Ausland verursachten Emissionen. Wie Abbildung 3 zeigt, entfällt ein Drittel der jährlichen CO₂eq-Emissionen in der Schweiz auf den Verkehr, wovon knapp drei Viertel oder 10.9 Mio. tCO₂eq ausschliesslich von mit fossilen Treibstoffen betriebenen Personenwagen verursacht werden (BAFU, 2020b). Der restliche Viertel der vom Verkehr verursachten CO₂eq-Emissionen entfällt mehrheitlich auf Last- und Lieferwagen, sowie Busse. Gebäude verursachen ein Viertel des CO₂eq-Ausstosses in der Schweiz. Hiervon werden mehr als zwei Drittel oder 7.7 Mio. tCO₂eq den privaten Haushalten zugeschrieben, während der Service- und Gewerbesektor den restlichen Drittel oder 3.5 Mio. tCO₂eq ausmacht (BAFU, 2020b). Die Industrie verursacht rund einen Fünftel der Schweizer CO₂eq-Emissionen. Diese stammen zu rund der Hälfte aus der Energieumwandlung, das heisst mehrheitlich aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe für Prozesswärme. Die andere Hälfte der CO₂eq-Emissionen entsteht direkt durch industrielle Prozesse, durch welche Treibhausgase als Endprodukte emittiert werden (BAFU, 2020b). Die Schweizer Landwirtschaft trägt 13 % zu den CO₂eq-Emissionen bei. Der Haupttreiber der Emissionen aus der Landwirtschaft sind mit rund 55 % oder 3.3 Mio. tCO₂eq die Methanemissionen, welche Rinder und andere Wiederkäuer bei der Verdauung ausstossen. Weitere Quellen von Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft sind die Boden- und Hofdüngerbewirtschaftung (BAFU, 2020b, 2020e). Die Energieumwandlung trägt mit 7 % zu den Schweizer CO₂eq-Emissionen bei, wovon knapp zwei Drittel durch Strom- oder Fernwärmeerzeugung mittels Abfallverbrennung entstehen. Das restliche Drittel entsteht durch Erdöl-Raffination (BAFU, 2020b, 2020e). Die inländische Stromproduktion produziert im internationalen Vergleich eher wenig Treibhausgasemissionen, da sie mehrheitlich mit der CO₂eq-armen Wasserkraft und Kernkraftwerken erfolgt. Die Dekarbonisierung der obengenannten Sektoren hängt aber grösstenteils mit deren Elektrifizierung zusammen, was die Nachfrage nach emissionsarmer Stromproduktion massiv erhöhen wird

(Sperr & Rohrer, o. J., 2019). Um eine massive Senkung der CO₂eq-Emissionen der Schweiz zu erreichen, sind umfassende Massnahmen nötig. Die vorliegende Analyse zeigt auf, welche Massnahmen zeitnah umsetzbar und kostengünstig sind und wie hoch ihr CO₂eq-Reduktionspotential sowie die zu erwartenden Kosten sind.

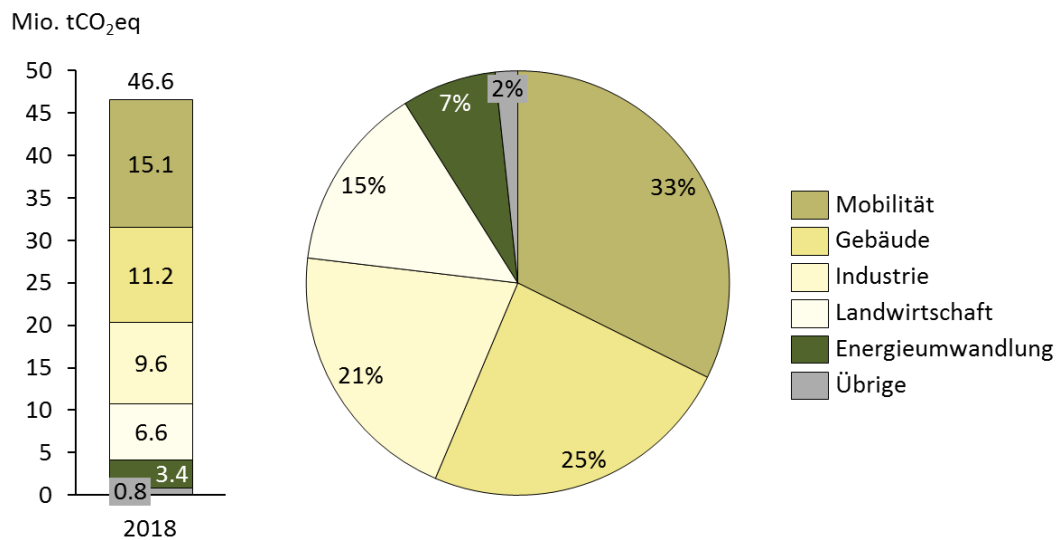


Abbildung 3. CO₂eq-Emissionen in der Schweiz im Jahr 2018 und ihre Aufteilung nach Sektoren. Der Sektor «Übrige» beinhaltet die Emissionen aus der nicht-energetisch nutzbaren Abfallverwertung, Brand- und Feuerschäden sowie vom Militär. CO₂eq-Emissionen aus dem internationalen Schiff- und Flugverkehr sowie negative CO₂eq-Emissionen aus der Landnutzung, Waldbewirtschaftung und Holzprodukten sind nicht berücksichtigt. Quelle: BAFU(2020b).

2 Methode

Die in dieser Analyse angewandte Methode basiert mehrheitlich auf dem Vorgehen von McKinsey (2009a). Abschnitt 2.1 präsentiert und begründet die Auswahl der modellierten Massnahmen und Abschnitt 2.2 definiert die Systemgrenzen. Abschnitt 2.3 geht auf das Referenzszenario ein und die Referenzfälle, welche als Gegenstück der verschiedenen Massnahmen dienen. Die Abschnitte 2.4 und 2.5 beschreiben die Berechnung des CO₂eq-Reduktionspotentials und der CO₂eq-Reduktionskosten der Massnahmen. Abschnitt 2.6 beschreibt den Aufbau und Nutzen der CO₂eq-Reduktionskostenkurve. Die Annahmen und Daten, welche für diese Studie verwendet wurden, sind im Anhang zusammengefasst.

2.1 Untersuchte Massnahmen

Die in dieser Analyse untersuchten Massnahmen wurden wie folgt ausgewählt: Auf Basis von existierenden CO₂eq-Reduktionsberichten (Berichte von McKinsey (McKinsey, 2009a, 2009b, 2010) oder Project Drawdown⁵ (Project Drawdown, 2018, 2020)) und eigenen Überlegungen wurde eine Liste potentiell relevanter Massnahmen zusammengestellt. Der Fokus lag dabei auf den Sektoren mit hohem CO₂eq-Ausstoss und auf Massnahmen, die auf etablierten und kostengünstigen Technologien oder Verfahren beruhen, welche ab heute umgesetzt werden können. Die untersuchten Massnahmen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1. Übersicht über die untersuchten Massnahmen.

#	Sektor	Massnahme	Beschreibung
M1	Mobilität	E-PKWs	Neue Personenkraftwagen sind ausschliesslich batterieelektrisch (E-PKW).
M2	Mobilität	E-LNFs & E-SNFS	Neue Liefer- und Lastwagen sind ausschliesslich batterieelektrisch. Lieferwagen sind Leichtnutzfahrzeuge (LNF), Lastwagen sind Schwernutzfahrzeuge (SNF).
M3	Mobilität	Flugreisen	Inländische Flugreisen werden ausschliesslich mit Zugfahrten ersetzt.
G1.1	Gebäude	Wärmepumpen	Fossile Heizsysteme werden bei Ersatz zu 90 % mit Wärmepumpen ersetzt.
G1.2	Gebäude	Holzheizungen	Fossile Heizsysteme werden bei Ersatz zu 10 % mit Holzpellet-Heizungen ersetzt.
G2	Gebäude	Solarthermie	Existierende fossile Heizsysteme werden während ihrer verbleibenden Lebensdauer mit einer Solarthermieanlage unterstützt.
G3	Gebäude	Gebäudehüllen	Bei Sanierungen der Gebäudehülle von existierenden Wohnbauten wird GEAK-Effizienzklasse A für die Gebäudehülle erreicht.
I1	Industrie	Erdgasersatz	Erdgas, das in der Industrie für Prozesswärme benutzt wird, wird durch Biomethan ersetzt.
I2	Industrie	Kohleersatz	Die Kohle, die in der Zementindustrie für Prozesswärme benutzt wird, wird durch alternative Brennstoffe ersetzt.
S1	Energie	Photovoltaik	Die Photovoltaikkapazitäten werden massiv ausgebaut.
S2	Energie	Wind	Die Windenergiekapazitäten werden massiv ausgebaut.
L1	Land- und Forstwirtschaft	Moore	Hochmoore werden wiedervernässt, um die Oxidation und Emission von im Boden gespeichertem Kohlenstoff zu verhindern.

Es gibt mehrere in der Öffentlichkeit viel und kontrovers diskutierte Massnahmen zu erwähnen, welche in diesem Bericht nicht untersucht wurden.

⁵ Drawdown ist eine Non-Profit-Organisation, die existierende Lösungen zur Eindämmung des Klimawandels aufzeigt.

Im Sektor Energie wurden in unserer Analyse nicht alle Massnahmen untersucht, um den Strom aus alten Atomkraftwerken (AKW) zu ersetzen oder/und den zukünftig steigenden Strombedarf in der Schweiz zu decken. Es fehlen zum Beispiel die Stromproduktion aus Biomasse oder die Installation eines neuen AKWs. Diese Massnahmen könnten - wie der Ausbau von Photovoltaik und Wind - eine allfällige zukünftige Stromlücke schliessen und verhindern, dass diese mit Importstrom gedeckt werden müsste. Bei der Produktion von Strom im nahen Ausland fallen beim heutigen europäischen Kraftwerkspark mehr CO₂eq-Emissionen an als bei der Stromproduktion in der Schweiz, die mehrheitlich aus Wasserkraft erfolgt. Biomasse für die Stromproduktion wurde in diesem Bericht nicht berücksichtigt, weil davon ausgegangen wird, dass das gesamte nachhaltig nachwachsbare Biomassepotential für die Produktion von Biomethan verwendet wird. Dieses Biomethan kann einen Teil des Erdgases ersetzen, welches im Industriesektor hauptsächlich zur Bereitstellung von Prozesswärme dient (siehe Abschnitt 4.3.1). Der Bau eines neuen AKWs wurde in diesem Bericht nicht berücksichtigt, weil ein neues AKW eine sehr lange Planungs- und Bauzeit hat und frühestens in 15 – 20 Jahren - also nach 2030 - am Stromnetz angeschlossen wäre.

Eine andere Massnahme, die in diesem Bericht nicht berücksichtigt wurde, betrifft den Ersatz von Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb durch Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Elektro-Antrieb. Brennstoffzellen sind im Fahrzeug montiert und wandeln die chemische Energie, welche in Wasserstoff (H₂) gespeichert ist, in Strom um. Eine Wasserstoffinfrastruktur, um Fahrzeuge mit H₂ zu betanken, ist aber heute in der Schweiz praktisch nicht vorhanden. Es gibt zwei öffentliche Wasserstofftankstellen (Stand Juli 2020). Bis Ende Jahr sind zwar 4 weitere H₂-Tankstellen geplant, aber von einem flächendeckenden Tankstellennetz ist die Schweiz noch weit entfernt. Ein weiterer Nachteil von Brennstoffzellen gegenüber reinen batterieelektrischen Fahrzeugen ist die geringere Energieeffizienz. Um Brennstoffzellen-Fahrzeuge zu betreiben, muss zuerst Strom mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt und auf 700 bar Druck verdichtet werden (h2mobilitaet, 2020), danach wird der Wasserstoff in der Brennstoffzelle wieder in Strom zurückgewandelt. Bei beiden Vorgängen entstehen Verluste. Verglichen mit einem batterieelektrischen Fahrzeug braucht es daher mehr erneuerbaren Strom, um Brennstoffzellen zu betreiben und der Betrieb ist mit höheren Kosten verbunden. Anschaffungskosten von Brennstoffzellenautos sind zurzeit ebenfalls höher verglichen mit batterieelektrischen Autos. Zudem wird in verschiedenen Berichten postuliert, dass die Priorität bei der Verwendung von Wasserstoff Bereichen zukommt, die schwierig zu elektrifizieren sind, wie z.B. die Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie oder die Luftfahrt (Sperr & Rohrer, 2020). Im Bereich Mobilität sind Brennstoffzellen als Reichweiteverlängerung von Plug-in-Hybriden denkbar oder für Reisebusse und Schwerlastnutzfahrzeuge (EBP, 2020).

2.2 Systemgrenzen

Als Systemgrenzen wurden für den ersten Teil dieser Studie (Kapitel 3 und 4) die Schweizer Landesgrenzen angenommen. Das heisst, dass Emissionen, die im Referenz- oder Massnahmenfall im Ausland anfallen, nicht eingerechnet wurden. Dies bedeutet, dass jeweils nur die direkten Emissionen berechnet wurden.

Eine Ausnahme bildet die Stromproduktion. Beim Emissionsfaktor für Strom wurden die im Ausland anfallenden direkten Emissionen auch mitberücksichtigt, da diese Emissionen das Reduktionspotential einiger der untersuchten Massnahmen stark beeinflussen. Gemäss den Energieperspektiven des Bundes (Prognos, 2013) «Politische Massnahmen (POM)» Variante E wurde angenommen, dass die Stromimporte aus dem Ausland bis 2030 von 29 % im Jahr 2014 (Messmer & Frischknecht, 2016) auf 18 % abnehmen und sich der Emissionsfaktor des Stroms von 97.4 g CO₂eq/kWh im Jahr 2018 auf 50.1 gCO₂eq/kWh im Jahr 2030 reduziert (siehe Annahmen im Anhang A. 1. 1).

2.3 Referenzfälle und Referenzszenario

Ein Referenzfall beschreibt die Entwicklung der CO₂eq-Emissionen aus einer bestimmten Kategorie, wenn keine Massnahme umgesetzt wird. Die Emissionen der Referenzfälle für die Massnahmen im Verkehrssektor wurden auf der Grundlage einer Studie von Infrac (2017) berechnet. Der Referenzfall zur Massnahme «Neuwagen ausschliesslich batterieelektrisch» beschreibt zum Beispiel die Anteile an fossil betriebenen Neuwagen an der Fahrzeugflotte, welche ohne Massnahme im Jahr 2030 in Betrieb genommen würden. Dies wären 40 % Benzin-PKW, 28 % Diesel-PKW und 15 % Hybride (siehe A. 1. 3) Für die Massnahmen im Gebäudesektor wurde die aktuelle Studie von TEP Energy und Ecoplan (2019) verwendet. Die Emissionen, welche im Referenzfall bei der Stromproduktion anfallen, wurden basierend auf den Energieperspektiven des Bundes abgeschätzt (Prognos, 2013). Dafür wurde das Szenario «Politische Massnahmen» und die Variante «Erneuerbar und Importe» verwendet, da diese Variante der heutigen Situation in der Schweiz ohne weitere Massnahmen am besten entspricht.

Das Referenzszenario beschreibt die Entwicklung der gesamten CO₂eq-Emissionen in der Schweiz im Jahr 2030, wenn die untersuchten Massnahmen nicht umgesetzt werden und dient in dieser Studie lediglich zur Veranschaulichung des Reduktionspotential der einzelnen Massnahmen im Verhältnis zum Gesamtausstoss (Abbildung 7). Da die einzelnen Referenzfälle dieser Studie nicht die gesamten Emissionen der Schweiz abbilden, wurde für diese Darstellung die Zahlen der Botschaft des Bundesrates zur Totalrevision des CO₂-Gesetzes nach 2020 verwendet (Schweizerischer Bundesrat, 2017). Die Referenzentwicklung der Emissionen im Verkehrssektor wurde für diese Botschaft ebenfalls aus der Studie von Infrac (2017) abgeleitet. Der CO₂eq-Ausstoss der Schweiz sinkt im Referenzszenario bis 2030 durch Effizienzsteigerungen und teilweise Umstellung auf fossil-freie Technologien um 4.8 Mio. tCO₂eq gegenüber 2018 (Abbildung 4). Dies ist ein Schritt in die richtige Richtung, reicht aber nicht um die Klimaziele der Schweiz zu erreichen. Daher sind weitere Massnahmen nötig.

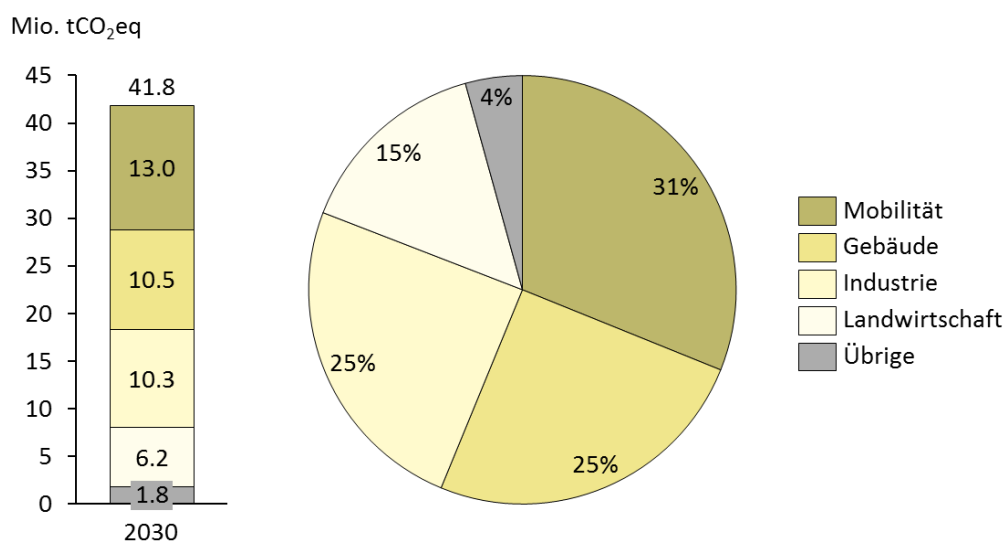


Abbildung 4. CO₂eq-Emissionen in der Schweiz im Referenzszenario im Jahr 2030 und die Aufteilung nach Sektoren gemäss der Botschaft des Schweizer Bundesrates zur Totalrevision des CO₂-Gesetzes (2017). Der Sektor «Übrige» beinhaltet die Emissionen aus der nicht-energetisch nutzbaren Abfallverwertung und Brand- und Feuerschäden. Während das BAFU die Kategorie «Energieumwandlung» separat ausweist (siehe Abbildung 3), fehlt diese Kategorie in der Botschaft des Bundesrats. Diese Emissionen wurde den restlichen Sektoren angerechnet.

2.4 CO₂eq-Reduktionspotential

Das CO₂eq-Reduktionspotential bezeichnet die Differenz zwischen den CO₂eq-Emissionen im Referenzfall und den CO₂eq-Emissionen nachdem eine spezifische Massnahme umgesetzt wurde (siehe Gleichung (1)). Der Referenzfall bezieht sich dabei auf die zu erwartenden jährlichen CO₂eq-Emissionen, falls die Massnahme nicht umgesetzt würde (siehe Abschnitt 2.3). Das CO₂eq-Reduktionspotential einer Massnahme zeigt somit auf, wie viele CO₂eq-Emissionen im Jahr 2030 eingespart werden könnten, wenn die Massnahme ab 2021 umgesetzt wird.

$$\text{CO}_2\text{eq-Reduktionspotential}_{\text{Massnahme}} = \text{CO}_2\text{eq-Emissionen}_{\text{Referenzfall}} - \text{CO}_2\text{eq-Emissionen}_{\text{Massnahme}} \quad (1)$$

In einem ersten Schritt wurde der CO₂eq-Ausstoss im Jahr 2030 einzelner Technologien oder Aktivitäten anhand von Treibstoff-, Brennstoff- oder Stromverbrauch berechnet. Der Energieverbrauch wurde dann mit dem Emissionsfaktor für die jeweilige Energieform multipliziert. Das heisst, es wurde zum Beispiel berechnet, wie viel Heizöl eine Ölheizung durchschnittlich in einem Jahr verbrennt, und anschliessend anhand des Emissionsfaktors für Heizöl die durchschnittlichen jährlichen CO₂eq-Emissionen einer Ölheizung bestimmt. In einem zweiten Schritt wurde die totale Emissionsreduktion für eine Massnahme berechnet. Die Emissionen pro Technologie wurden mit der Anzahl der im Referenzfall beziehungsweise im Massnahmenfall benutzten Technologien multipliziert. Schliesslich ergibt die Differenz zwischen Referenz und Massnahmenfall das totale CO₂eq-Reduktionspotential.

Das CO₂eq-Reduktionspotential der analysierten Massnahmen verändert sich je nach Zeitpunkt, wann eine Massnahme umgesetzt wird. Effizienzsteigerungen führen dazu, dass weniger primäre Energie verwendet wird und so die Emissionen verschiedener Technologien abnehmen. Zum Beispiel kann davon ausgegangen werden, dass die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen in Zukunft steigt und Wärmepumpen somit weniger Strom für den gleichen Wärmeertrag brauchen und dadurch weniger CO₂eq emittieren werden.

Für pfadabhängige Massnahmen (neue Fahrzeuge, alle Massnahmen im Gebäudesektor und Ausbau der Windenergie und Photovoltaik) wurde angenommen, dass diese ab dem Jahr 2021 umgesetzt werden. Zum Beispiel wurde die Anzahl Elektroautos im Jahr 2030 unter der Annahme berechnet, dass ab dem Jahr 2021 alle neuen PKWs ausschliesslich Elektroautos sind. Die Anzahl Elektroautos im Jahr 2030 wurde mit dem im ersten Schritt berechneten CO₂eq-Ausstoss pro Elektroauto und Jahr multipliziert, um die gesamten jährlichen CO₂eq-Emissionen zu erhalten. Dabei wurde berücksichtigt, dass der Stromverbrauch pro Kilometer für ein im Jahr 2021 gekauftes Elektroauto grösser ist, als der Stromverbrauch eines im Jahr 2030 gekauften Elektroauto, welches Dank Effizienzsteigerung weniger Strom pro Kilometer verbraucht. Nicht berücksichtigt wurde, ob der Markt hinreichende Mengen von Elektroautos bereitstellen kann.

2.5 CO₂eq-Reduktionskosten

Die CO₂eq-Reduktionskosten beziehen sich auf die zusätzlichen volkswirtschaftlichen Kosten, die mit der Umsetzung einer Massnahme zur Reduktion der CO₂eq-Emissionen im Vergleich zum Referenzfall für die gesamte Volkswirtschaft anfallen. Es kann sich dabei auch um negative Kosten, das heisst Kosteneinsparungen, handeln. Die CO₂eq-Reduktionskosten wurden in Schweizer Franken pro eingesparte Tonne CO₂eq berechnet.

Die Berechnung der CO₂eq-Reduktionskosten beinhaltet die Ermittlung der Vollkosten sowohl für den Referenzfall als auch für die Umsetzung der Massnahme. Die Vollkosten erfassen alle Kosten, die über

die Lebensdauer einer Technologie anfallen: die Investitions⁶-, Kapital-, Betriebs- und Unterhaltskosten. Für die untersuchten Massnahmen bestehen die Betriebskosten ausschliesslich aus Energiekosten. Allfällige Transaktions- und Informationskosten, Steuern und Subventionen wurden nicht berücksichtigt, da die volkswirtschaftlichen CO₂eq-Reduktionskosten berechnet wurden und die genannten Abgaben nur eine Umverteilung innerhalb der Volkswirtschaft bedeuten. Zum Beispiel könnten Mehrwertsteuern auf Produkten und Dienstleistungen abgeschafft werden und dafür die Einkommens- oder Vermögenssteuern erhöht werden. Da Steuern und Subventionen nicht in den volkswirtschaftlichen Reduktionskosten enthalten sind, repräsentieren diese *nicht* die Kosten, welche für einzelne Investoren und Privatpersonen bei der Umsetzung einer Massnahme anfallen. Versicherungskosten wurden ebenfalls nicht berücksichtigt, denn sie sind stark von den Regulierungen im jeweiligen Sektor abhängig. Zum Beispiel ist der Abschluss einer Versicherung bei einem Autokauf Pflicht, während dies bei einer Wärmepumpe nicht der Fall ist. Daher würde das Einrechnen von Versicherungskosten die Vergleichbarkeit der Massnahmen in den verschiedenen Sektoren vermindern. Nicht berücksichtigt wurden bei der Berechnung der Reduktionskosten ausserdem allfällige indirekte Kosten oder Einsparungen einer Technologie, wie zum Beispiel die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wirtschaft oder Verschiebungen in der inländischen Wertschöpfungskette durch Veränderungen der Nachfrage.

Analog zum CO₂eq-Reduktionspotential wurden die CO₂eq-Reduktionskosten auf jährlicher Basis berechnet (siehe Gleichung (4)). Für die Vollkostenrechnung bedeutet dies, dass die Investitionskosten sowohl im Referenzfall als auch im Massnahmenfall als jährliche Rückzahlung eines Darlehens über die Lebensdauer der Technologie modelliert wurden. Um die Zinskosten zu berücksichtigen, wurden Annuitäten (jährliche Investitionskosten) berechnet. Dies bedeutet, dass die Darlehenstilgungs- und Zinszahlungen über die Lebensdauer so verteilt werden, dass ein konstanter jährlicher Zahlungsbetrag (Annuität) anfällt. Die Annuität wurde mit folgender Formel berechnet:

$$\text{Annuität} = \alpha * \text{Investitionskosten} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{(1 + r_{\text{Zins}})^n * r_{\text{Zins}}}{(1 + r_{\text{Zins}}) - 1} \quad (3)$$

mit α = Annuitätenfaktor, r_{Zins} = jährlicher Zinssatz und n = Lebensdauer in Jahren.

Die jährlichen Vollkosten einer Massnahme setzen sich aus der Annuität, jährlichen Unterhalts- und Energiekosten zusammen:

$$\text{Jährliche Vollkosten} = \text{Annuität} + \text{Jährliche Unterhaltskosten} + \text{Jährliche Energiekosten} \quad (4)$$

Wie beim CO₂eq-Reduktionspotential beeinflusst das Jahr der Umsetzung einer Massnahme auch deren Kosten, da sich die Investitionskosten über die Zeit verändern können. Analog zur Berechnung des Reduktionspotentials wurde auch bei den Kosten angenommen, dass pfadabhängige Massnahmen (neue Fahrzeuge, alle Massnahmen im Gebäudesektor und Ausbau der Windenergie und Photovoltaik) ab dem Jahr 2021 umgesetzt werden. Die Annuitäten wurden daher jeweils auf Basis der Investitionskosten des Umsetzungsjahres berechnet. Anhand des Beispiels der Massnahme «PKW-Ersatz mit ausschliesslich Elektroautos» bedeutet dies: Die Anschaffungskosten für ein neues Elektroauto sinken über die Zeit wegen Lern- und Skaleneffekte. Für ein Elektroauto, das im Jahr 2021 angeschafft wird, muss bei der Berechnung der Annuität der Anschaffungspreis von 2021 berücksichtigt werden, auch wenn die Kosten erst 2030 anfallen.

⁶ Bei gewissen Massnahmen, zum Beispiel bei Neuwagen, wird der Begriff «Anschaffungskosten» anstelle von «Investitionskosten» verwendet.

Auch die Energiekosten werden bei pfadabhängigen Massnahmen durch das Umsetzungsjahr der Massnahme beeinflusst. So sind zum Beispiel Autos, die im Jahr 2030 angeschafft werden, wegen Lerneffekten effizienter als Autos die 2021 gekauft werden und verbrauchen daher weniger Treibstoff oder Strom. Für die Berechnung der Energiekosten wurde deshalb das Anschaffungsjahr ebenfalls berücksichtigt.

Die Kosten wurden als Nettobarwert (*net present value, NPV*) der Vollkosten für das Jahr 2021 berechnet, indem die im Jahr 2030 zu erwartenden Kosten diskontiert wurden:

$$\text{NPV}_{\text{Vollkosten}} = \frac{\text{Jährliche Vollkosten}_{2030}}{(1 + \text{Diskontsatz})^{2030-2021}} \quad (5)$$

Die CO₂eq-Reduktionskosten stehen schliesslich für den Quotienten zwischen dem Nettobarwert der durch die Massnahme anfallenden Kosten oder Kosteneinsparungen und den dabei eingesparten CO₂eq-Emissionen:

$$\text{CO}_2\text{eq-Reduktionskosten}_{\text{Massnahme}} = \frac{\text{NPV}_{\text{Vollkosten Massnahme}} - \text{NPV}_{\text{Vollkosten Referenzfall}}}{\text{CO}_2\text{eq-Emissionen}_{\text{Referenz}} - \text{CO}_2\text{eq-Emissionen}_{\text{Massnahme}}} \quad (6)$$

Alle Massnahmen in Tabelle 1 sparen CO₂eq-Emissionen im Vergleich zum Referenzfall. Daher ist der Nenner von Gleichung (6) immer positiv. Der Zähler in Gleichung (6) kann positiv oder negativ sein. Wenn die Kosten im Referenzfall kleiner sind als im Massnahmenfall bedeutet dies, dass die Massnahme Kosten generiert. Falls aber die Kosten im Referenzfall grösser als im Massnahmenfall sind, ist der Zähler in Gleichung (6) negativ. Dies bedeutet, dass die Massnahme zu Kosteneinsparungen führt.

2.6 CO₂eq-Reduktionskostenkurve

Die CO₂eq-Reduktionskostenkurve fasst die CO₂eq-Reduktionspotentiale und –kosten der verschiedenen Massnahmen im Jahr 2030 zusammen (Abbildung 5). Jeder Balken entspricht einer Massnahme und zeigt deren CO₂eq-Reduktionspotential im Vergleich zum Referenzfall auf der x-Achse und die Kosten oder Kosteneinsparungen pro eingesparte Tonne CO₂eq auf der y-Achse. Während alle untersuchten Massnahmen ein positives CO₂eq-Reduktionspotential haben, können - wie oben bereits erwähnt - die CO₂eq-Reduktionskosten positiv oder negativ sein. Negative Reduktionskosten bedeuten, dass beim Vergleich der Vollkosten für die Volkswirtschaft ein Reingewinn pro eingesparte Einheit CO₂eq entsteht. Positive Reduktionskosten bedeuten, dass die Massnahme im Vergleich zum Referenzfall zusätzliche Kosten verursacht.

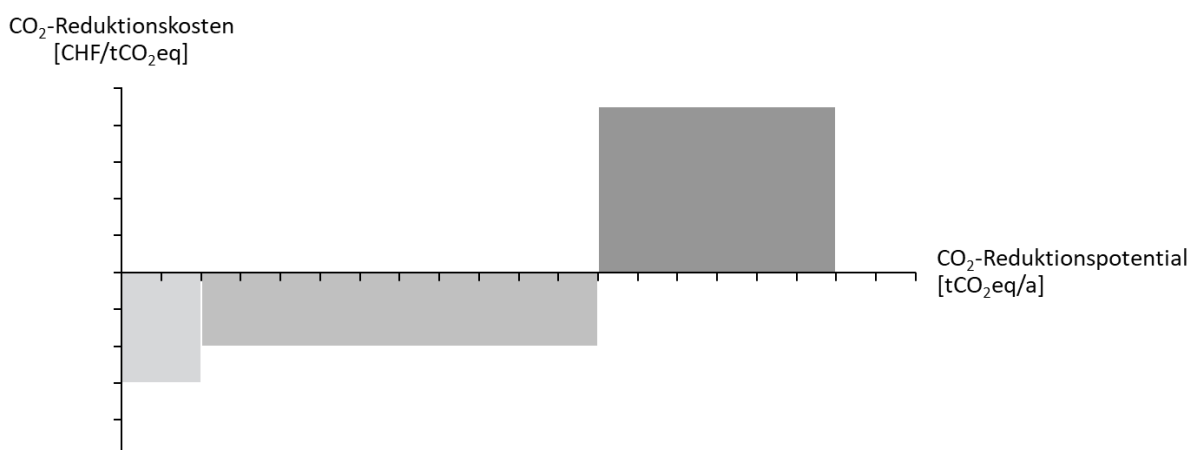


Abbildung 5. Beispiel einer CO₂eq-Reduktionskostenkurve.

Um eine Doppelzählung des CO₂eq-Reduktionspotentials zu verhindern, wurden die Massnahmen zuerst unabhängig voneinander berechnet und nach den Kosten priorisiert, bevor teurere Massnahmen mit einer neuen Ausgangssituation berechnet wurden. Dabei wurde angenommen, dass das CO₂eq-Reduktionspotential einer billigeren Massnahme immer vollständig wahrgenommen wurde, bevor eine teurere Massnahme umgesetzt wird. Billigere Massnahmen können daher das CO₂eq-Reduktionspotential von teureren Massnahmen beeinflussen.

Da wir uns in diesem Bericht auf ausgewählte Massnahmen fokussieren, gibt es wenige Massnahmen, die einander gegenseitig beeinflussen. Eine Ausnahme bildet die Stromproduktion, welche stark von anderen Sektoren beeinflusst wird. Die CO₂eq-Emissionen, welche durch den Betrieb von Wärmepumpen und E-Fahrzeugen verursacht werden, wurden mit dem CO₂eq-Emissionsfaktor für die Stromproduktion des Referenzfalls berechnet. Dieser Emissionsfaktor beinhaltet die direkten CO₂eq-Emissionen, die bei der Produktion von Strom entstehen. Wenn Massnahmen im Gebäude- und Mobilitätssektor ausschliesslich mit CO₂eq-freiem Strom aus Photovoltaik und Windenergie betrieben würden, vergrössert sich ihr CO₂eq-Einsparpotential gegenüber dem Referenzfall zusätzlich. Dieses zusätzliche CO₂eq-Einsparpotential wurde in der Reduktionskostenkurve den Massnahmen «Ausbau von Photovoltaik» und «Ausbau der Windenergie» angerechnet.

Darüber hinaus beeinflussen sich die Reduktionspotentiale der Massnahmen im Gebäudesektor gegenseitig. Daher wurden zuerst die Reduktionskosten für alle Massnahmen im Gebäudesektor unabhängig voneinander berechnet und dann nach Kosten geordnet. «Heizungersatz mit erneuerbaren Heizsystemen» und «Unterstützung von fossilen Heizungen durch Solarthermie» haben kleinere Reduktionskosten als «Gebäudehüllen sanieren». Es wurde daher angenommen, dass die zwei kostengünstigeren Massnahmen komplett umgesetzt werden und das Einsparpotential und die Reduktionkosten von der Massnahme «Gebäudehülle sanieren» wurde auf der Basis des Energiebedarfs von Gebäuden nach Umsetzung dieser zwei Massnahmen berechnet.

3 CO₂eq-Reduktionskostenkurve

In diesem Kapitel werden das CO₂eq-Reduktionspotential und die CO₂eq-Reduktionskosten aller Massnahmen von Tabelle 1 präsentiert. In Unterkapitel 3.1 wird die CO₂eq-Reduktionskostenkurve diskutiert, welche zeigt, wie viel CO₂eq-Emissionen zu welchen Kosten im Jahr 2030 eingespart werden können, wenn alle Massnahmen ab dem Jahr 2021 umgesetzt werden. Alle Massnahmen im Gebäude- und Mobilitätssektor (ausser inländische Flugreisen ersetzen) brauchen Zeit bis sie erheblich zur CO₂eq-Emissionsreduktion beitragen können, weil wir annehmen, dass zum Beispiel Heizungen und Personenwagen erst ersetzt werden, wenn sie ihre Lebensdauer erreicht haben. Es wird nicht mit vorzeitigen Ersatzinvestitionen gerechnet. Deshalb wurde für die Darstellung der CO₂eq-Reduktionskostenkurve das Jahr 2030 ausgewählt. Dadurch wird ersichtlich, wie gross das CO₂eq-Reduktionspotential im Jahre 2030 wäre, wenn die Massnahmen bereits ab 2021 umgesetzt würden. In Unterkapitel 3.2 wird ausführlicher darauf eingegangen, inwiefern der Zeitpunkt der Umsetzung der Massnahmen das CO₂eq-Reduktionspotential beeinflusst. Unterkapitel 3.3 zeigt anhand einer Sensitivitätsanalyse auf, wie stark die sektorenübergreifenden Annahmen (Energiepreise, Stromemissionsfaktor, Zins- und Diskontfaktor) die Resultate beeinflussen.

3.1 CO₂eq-Reduktionspotential und –kosten im Jahr 2030 bei Umsetzung der Massnahmen ab dem Jahr 2021

Die Resultate in Abbildung 6 und Tabelle 2 zeigen, dass bei Umsetzung aller in diesem Bericht untersuchten Massnahmen ab 2021 im Jahr 2030 im Vergleich zum Referenzszenario 13.6 Mio. tCO₂eq eingespart werden. Ein signifikanter Anteil des Reduktionspotential (11.8 Mio. tCO₂eq) wird gemäss unseren Annahmen im Jahr 2030 negative CO₂eq-Reduktionskosten haben. Das heisst, dass die Umsetzung der Massnahmen nicht nur die CO₂eq-Emissionen reduzieren, sondern gleichzeitig auch volkswirtschaftliche Kosten einsparen kann. Wenn ab dem Jahr 2021 ausschliesslich neue batterieelektrische Fahrzeuge gekauft werden, Heizsysteme am Ende ihrer Lebensdauer mit Wärmepumpen ersetzt werden, das Photovoltaikpotential stetig ausgebaut wird und in der Zementindustrie der Anteil an alternativen Brennstoffen statt Kohle über die Zeit erhöht wird, können im Jahr 2030 verglichen mit dem Referenzfall insgesamt 1700 Mio. CHF eingespart werden.

In Abbildung 6 und Tabelle 2 ist auch ersichtlich, für welche Massnahmen die Reduktionskosten unter 200 CHF/tCO₂eq liegen. Dieser Betrag entspricht in etwa den externen Kosten, welche jede ausgestossene Tonne CO₂eq-Emissionen verursacht (Umweltbundesamt, 2019). «Heizungersatz mit Holzpellet-Heizungen» und «Moore wiedervernässen» sind Massnahmen mit Reduktionskosten zwischen 0 - 200 CHF/tCO₂eq. Massnahmen mit Reduktionskosten grösser als 0 CHF/tCO₂eq und kleiner als 200 CHF/tCO₂eq liefern ein zusätzliches CO₂eq-Reduktionspotential von 0.3 Mio. tCO₂eq. Wenn alle untersuchten Massnahmen mit Kosten höher als 0 CHF/tCO₂eq umgesetzt werden, entstehen gesamtwirtschaftliche Kosten von 720 Mio. CHF. Insgesamt überwiegen die Kosteneinsparungen von 1700 Mio. CHF von Massnahmen mit negativen Reduktionskosten die Zusatzkosten für teure Massnahmen also bei weitem. Wenn alle Massnahmen umgesetzt werden und das gesamte damit verbundene CO₂eq-Einsparpotential von 13.6 Mio. tCO₂eq realisiert wird, beträgt die Nettoeinsparung für die Volkswirtschaft 980 Mio. CHF.

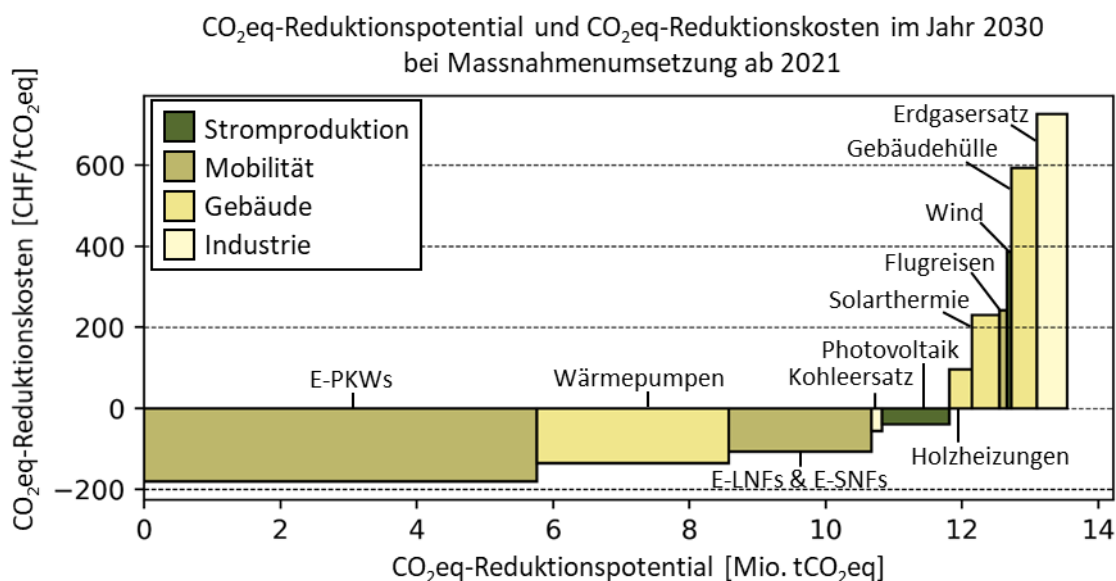


Abbildung 6. CO₂eq-Reduktionspotential und CO₂eq-Reduktionskosten im Jahr 2030 bei Umsetzung der Massnahmen ab 2021. Die Massnahme «Moore wiedervernässen» ist in der Graphik nicht gezeigt, weil das Potential zu klein für einen sichtbaren Balken ist.

Tabelle 2. Übersicht über das CO₂eq-Reduktionspotential [Mio. tCO₂eq/Jahr] und die CO₂eq-Reduktionskosten [CHF/tCO₂eq] im Jahr 2030, wenn die Massnahmen ab 2021 umgesetzt werden.

#	Massnahme	CO ₂ eq-Reduktionspotential [Mio. tCO ₂ eq/Jahr]	CO ₂ eq-Reduktionskosten [CHF/tCO ₂ eq/Jahr]
M1	Neue PKWs batterieelektrisch («E-PKWs»)	5.76	-181
M2	Neue Leicht- und Schwerlastnutzfahrzeuge batterieelektrisch («E-LNFs & E-SNFS»)	2.09	-226
M3	Ersatz inländischer Flugreisen durch Zugreisen («Flugreisen»)	0.11	242
G1.1	Neue Heizungen zu 90 % Wärmepumpen («Wärmepumpen»)	2.81	-136
G1.2	Neue Heizungen zu 10 % Holzpellet-Heizungen («Holzheizungen»)	0.33	95
G2	Unterstützung existierender fossiler Heizsysteme durch Solarthermie «Solarthermie»	0.40	230
G3	Gebäudehülle sanieren «Gebäudehüllen»	0.37	594
I1	Ersatz von Erdgas für Prozesswärme durch Biomethan («Erdgasersatz»)	0.44	726
I2	Ersatz von Kohle in Zementindustrie durch Ersatzbrennstoffe («Kohleersatz»)	0.15	-56
S1	Ausbau Photovoltaik («Photovoltaik»)	0.99	-39
S2	Ausbau Windenergie («Wind»)	0.06	386
L1	Wiedervernässung von Hochmooren («Moore»)	0.02	118
	Total	13.6	118

Die Annahmen über die Entwicklung des Öl-, Gas-, Kohle- und Strompreises bis 2030 sowie der Zins- und Diskontierungssatz beeinflussen die Ergebnisse massgeblich. Daher wird im Unterkapitel 3.3 in einer Sensitivitätsanalyse geklärt, welchen Einfluss diese Faktoren auf die CO₂eq-Reduktionskosten haben. In Kapitel 4 wird für einzelne Massnahmen eine detailliertere Sensitivitätsanalyse für Energiepreise präsentiert und es werden zudem Annahmen, welche nur einzelne Massnahmen beeinflussen, analysiert und diskutiert.

3.2 Einfluss des Umsetzungszeitpunkts

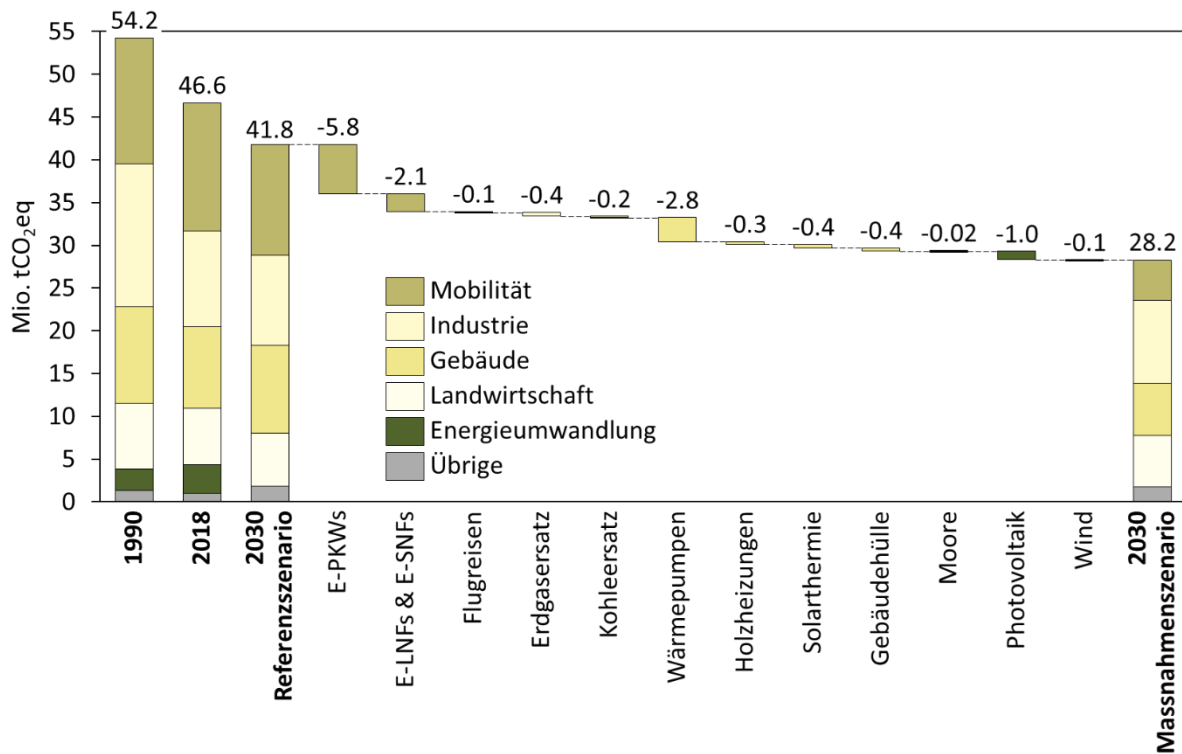
Die Schweiz stiess im Jahr 1990 innerhalb der Landesgrenzen 54.2 Mio. tCO₂eq aus (BAFU, 2020b). Dieser Wert konnte bis 2018 um 14 % auf 46.6 Mio. tCO₂eq reduziert werden (BAFU, 2020b) (siehe Abbildung 7). Für das Referenzszenario wird bis 2030 eine weitere Reduktion der jährlichen CO₂eq-Emissionen um 10 % verglichen mit 2018 auf 41.8 Mio. tCO₂eq prognostiziert (Schweizerischer Bundesrat, 2017) (siehe Unterkapitel 2.3).

Bei Umsetzung des Massnahmenpakets gemäss Tabelle 1 ab dem Jahr 2021 könnten die CO₂eq-Emissionen im Jahr 2030 hingegen um weitere 13.6 Mio. tCO₂eq auf 28.2 Mio. tCO₂eq reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion um 39 % verglichen mit 2018 und die Schweiz wäre damit dem Netto-Null-Ziel einen grossen Schritt näher als im Referenzszenario. Andererseits wird auch ersichtlich, dass trotz der Umsetzung der Massnahmen im Jahr 2030 immer noch ein jährlicher Ausstoss von 28.2 Mio. tCO₂eq auf Schweizer Boden zu erwarten ist und daher zusätzliche Massnahmen nötig sind, um das Netto-Null-Ziel zu erreichen.

Abbildung 7a zeigt das CO₂eq-Reduktionspotential für die einzelnen Massnahmen und Sektoren. Die untersuchten Massnahmen können vor allem den CO₂eq-Ausstoss in den Sektoren Mobilität und Gebäude reduzieren. In den Sektoren Industrie sowie Landwirtschaft ist das Reduktionspotential hingegen gering und in diesen Sektoren sind weitere Massnahmen nötig für eine signifikante Reduktion der Emissionen. Ausserdem wird mit dieser Art der Darstellung des Reduktionspotentials noch deutlicher ersichtlich als in der Reduktionskostenkurve (Abbildung 6a), wie gross das Potential der Massnahme «Neue PKWs ausschliesslich batterieelektrisch» im Vergleich zu den anderen Massnahmen ist. Sie hat einen Anteil von 43 % am Potential des gesamten Massnahmenpakets. Die anderen zwei Massnahmen mit grossem Potential sind «Heizungersatz durch Wärmepumpen» und «Neue LNFs und SNFs ausschliesslich batterieelektrisch», welche einen Anteil von 21 % respektive 15 % beitragen.

Wenn das Massnahmenpaket gemäss Tabelle 1 hingegen erst ab dem Jahr 2030 umgesetzt würde, werden in den nächsten Jahren weiterhin fossil betriebene PKWs, LNFs, SNFs und Heizungen gekauft, welche weit über 2030 zum CO₂eq-Ausstoss in der Schweiz beitragen werden. Wird erst im Jahr 2030 damit angefangen PKWs, Liefer- und Lastwagen und Heizungen die am Ende ihrer Lebensdauer angekommen sind, konsequent mit Strom basierten Technologien zu ersetzen, ist das Reduktionspotential des gesamten Massnahmenpakets im Jahr 2030 mit 2.1 Mio. tCO₂eq unbedeutend klein und der CO₂eq-Ausstoss der Schweiz bleibt hoch (Abbildung 7). Für die grösstmögliche Wirkung der untersuchten Massnahmen ist es daher von zentraler Wichtigkeit, dass mit der Umsetzung so früh wie möglich begonnen wird und die dafür erforderlichen politischen Massnahmen und Anreize so bald wie möglich beschlossen werden.

a)



b)

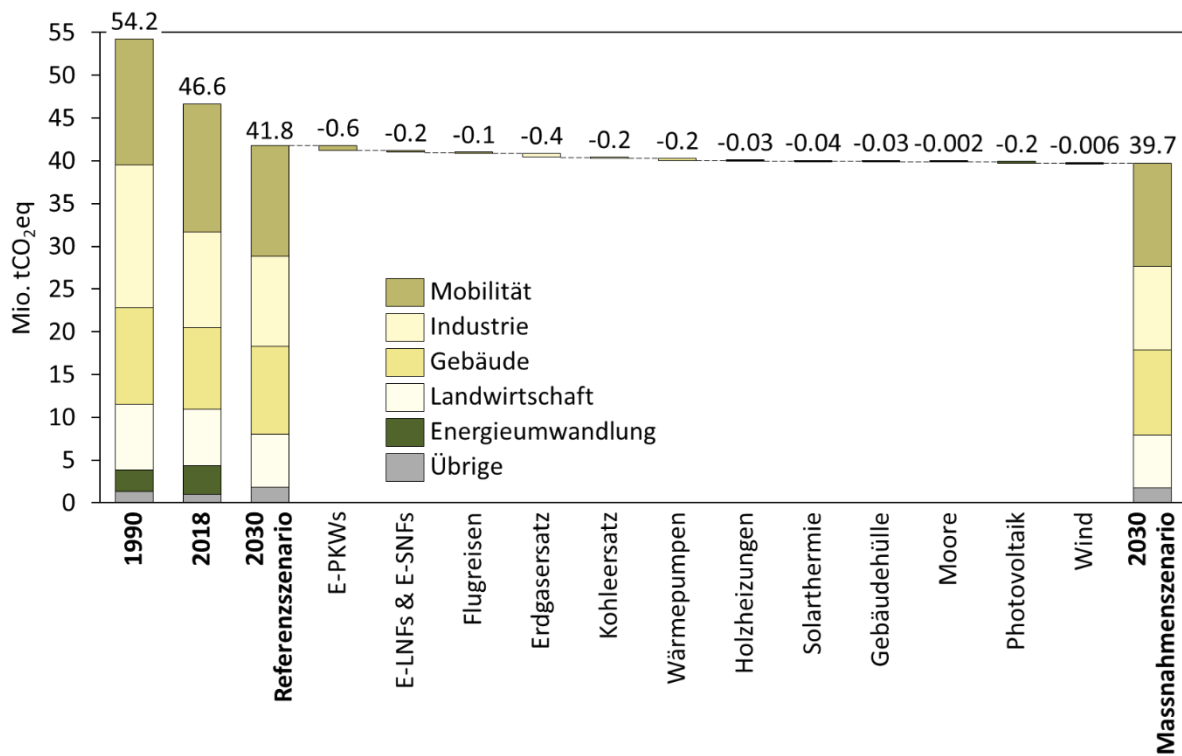


Abbildung 7. CO₂eq-Reduktionspotential der Massnahmen im Jahr 2030 a) bei Umsetzung ab 2021 bis 2030 und b) bei Umsetzung erst im Jahr 2030. Zum Vergleich ist der inländische CO₂eq-Ausstoss im Jahr 1990, 2018 und im Referenzszenario für 2030 gezeigt. Daten für 1990 und 2018: (BAFU, 2020b), Daten für das Referenzszenario 2030: (Schweizerischer Bundesrat, 2017).

3.3 Sensitivitätsanalyse für sektorenübergreifende Parameter

Die Energiepreise, der CO₂eq-Emissionsfaktor von Strom sowie der Zins- und Diskontsatz sind Einflussfaktoren, welche sektorenübergreifend die meisten der untersuchten Massnahmen beeinflussen. Im folgenden Unterkapitel wird analysiert, inwiefern sich das CO₂eq-Reduktionspotential und die Reduktionskosten der untersuchten Massnahmen ändert, wenn die Annahmen, welche Abbildung 6 zu Grunde liegen und sektorenübergreifend relevant sind, variiert werden.

Die Kostendifferenz zwischen Referenzfall und Massnahme ist für alle untersuchten Massnahmen im Mobilitäts-, Gebäude- und Industriesektor vom Preis für fossile Energieträger abhängig. Im Ausland wird zum Teil aus fossilen Energieträgern Strom produziert. Der Strompreis wurde in unserer Studie aber unabhängig vom Preis fossiler Energie angenommen, da Stromimporte weniger als 30 % des Schweizer Strommix ausmachen (Messmer & Frischknecht, 2016) und gemäss den Energieperspektiven des Bundes bis 2030 sinken werden (Prognos, 2013). Der Strompreis beeinflusst die Massnahmen im Bereich Stromproduktion und jene Massnahmen im Mobilitäts- und Gebäudesektor, welche mit Stromverbrauch zusammenhängen. Dies sind batterieelektrische Fahrzeuge und der Ersatz fossiler Heizungen durch Wärmepumpen. Abbildung 8 - 11 zeigen die Reduktionskostenkurve berechnet auf Grund veränderter Annahmen für Energiepreise, Abbildung 12 für einen erhöhten Stromemissionsfaktor und Abbildung 13 zeigt die Resultate mit variierten Annahmen für Zins- und Diskontsatz. Tabelle 3 enthält die Zusammenstellung der Parameter für diese sektorenübergreifende Sensitivitätsanalyse. Die Resultate der Sensitivitätsanalyse sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 3. Parameter der sektorenübergreifenden Sensitivitätsanalyse. Variation der Annahmen für das Jahr 2030.

	Rohöl [\$/Barrel]	Erdgaspreis [\$/MBtu]	Strompreis [Rp/kWh]	Strom Emissionsfaktor [gCO ₂ /kWh]	Zins- und Diskontsatz
2018	68	7.6	18.4	97.4	0.5 %
Basisannahmen 2030	88 +29% zu 2018	8 +5% zu 2018	18.4	50.1	0.5 %
Preis Öl/Gas 0% zu 2018	68	7.6	-	-	-
Preis Öl/Gas -30% zu 2018	48	5.3	-	-	-
Strompreis -30% zu 2018	-	-	12.8 ⁷	-	-
Strompreis +30% zu 2018	-	-	23.9 ⁷	-	-
Strom Emissionsfaktor	-	-	-	501	-
Zins/Diskontrate	-	-	-	-	3 %

Der Rohölpreis betrug 2018 in Europa durchschnittlich 68 \$/Barrel und der Erdgaspreis 7.6 \$/MBtu (IEA, 2019). Die International Energy Agency (IEA) prognostiziert, dass der Preis für Rohöl bis 2030 um 29 % auf 88 \$/Barrel und für Erdgas um 5 % auf 8.0 \$/MBtu steigen wird (IEA, 2019). Für Benzin, Diesel, Heizöl, Kerosin und Kohle wurde eine Preisentwicklung analog zu Rohöl angenommen, für Erdgas als Treibstoff und zum Heizen wurde die Preisentwicklung analog zum Erdgaspreis angenommen. Die Gestehungskosten für Strom betragen 2018 in der Schweiz durchschnittlich 7.4 Rp/kWh und die Stromnetzskosten 11.0 Rp/kWh (ElCom, 2019). Die Stromkosten wurden bis 2030 als konstant angenommen.

⁷ Für diese Sensitivitätsanalysen wurde angenommen, dass sowohl der Stromnetzpreis als auch die Stromgestehungskosten um 30 % reduziert respektive erhöht sind.

Dies sind unsere Basisannahmen, welche den in Abbildung 6 gezeigten Resultaten zu Grunde liegen.

3.3.1 Stagnierende Rohöl- und Erdgaspreise

Falls der Rohölpreis bis ins Jahr 2030 nicht zunimmt gegenüber dem Jahr 2018 hat dies folgende Auswirkung auf die Reduktionskostenkurve (Abbildung 8): Dieselben 5 Massnahmen wie mit den Basisannahmen führen zu volkswirtschaftlichen Einsparungen und die restlichen 7 zu Mehrkosten gegenüber den Referenzfällen. Die drei Massnahmen mit grossem Reduktionspotential («E-PKWs», «E-LNFs und E-SNFs» und «Wärmepumpen») bieten allerdings kleinere Kosteneinsparungen, denn in diesem Fall haben sie einen kleineren Energiekostenvorteil verglichen mit den Basisannahmen. Die Reihenfolge der Massnahmen bezüglich der Reduktionskosten ändert unerheblich. Einzig die Massnahme «E-LNFs und E-SNFs» ist mit CO₂eq-Reduktionskosten von -13 CHF/tCO₂eq finanziell weniger lukrativer als die Massnahmen «Photovoltaik» und «Kohleersatz». Die Stromproduktionsmassnahmen sind nicht abhängig vom Rohölpreis, wie oben bereits erwähnt. Die restlichen Massnahmen im Gebäudesektor, inländische Flugreisen ersetzen und Erdgasersatz haben etwas erhöhte Reduktionskosten, weil die Energiekosten für den Referenzfall tiefer sind (Tabelle 4). Insgesamt sind trotz kleineren Energiekostenvorteile der Massnahmen mit grossem Potential volkswirtschaftliche Einsparungen von 815 Mio. CHF möglich, was die Mehrkosten von teuren Massnahmen von 785 Mio. CHF knapp überwiegt (Tabelle 5).

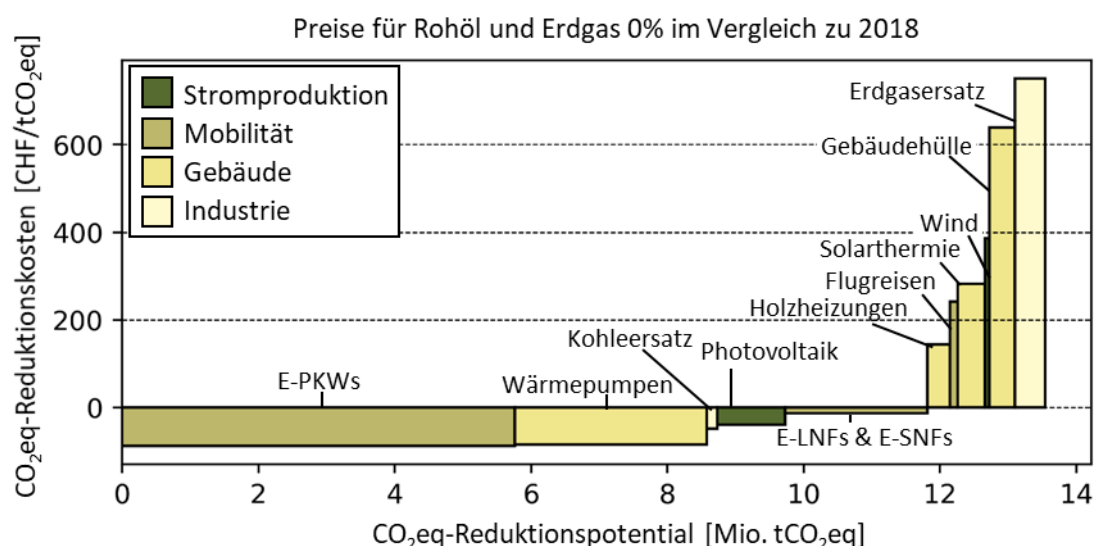


Abbildung 8. Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionspotential und CO₂eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit stagnierendem Rohölpreis und Erdgaspreis verglichen zu Preisen im Jahr 2018.

3.3.2 Abnahme des Rohöl- und Erdgaspreises im Vergleich zu 2018

Eine Abnahme des Rohölpreises um 30 % auf 48 \$/Barrel im Jahr 2030, statt eine Zunahme um 30 % auf 88 \$/Barrel wie von der IEA prognostiziert, entspricht einer Reduktion des Rohölpreises von 45 % gegenüber unseren Basisannahmen. Die grosse Änderung der Treib- und Brennstoffpreise hat einen erheblichen Einfluss auf die Reduktionskostenkurve. Wenn der Ölpreis in Zukunft stark abnimmt, schwindet der Energiekostenvorteil der Massnahmen «E-PKWs», «E-LNFs und E-SNFs» und «Wärmepumpen» und diese haben Reduktionskosten nahe null oder generieren nun Mehrkosten. Ein geringerer Öl- und Erdgaspreis führt dazu, dass sich die Reihenfolge der Massnahmen bezüglich der Reduktionskosten stärker ändert. «Photovoltaik» ist in diesem Fall die Massnahme mit den grössten finanziellen Einsparungen pro Tonne CO₂eq. Die Massnahme «E-PKWs» ist mit CO₂eq-Reduktionskosten 10 CHF/tCO₂eq nun teurer als die Massnahme «Wärmepumpen», welche Reduktionskosten

von -4 CHF/tCO₂eq hat (Tabelle 4). Dies ist damit zu erklären, dass die Energiekosten bei E-PKW's einen grösseren Anteil an den Vollkosten ausmachen als bei Wärmepumpen.

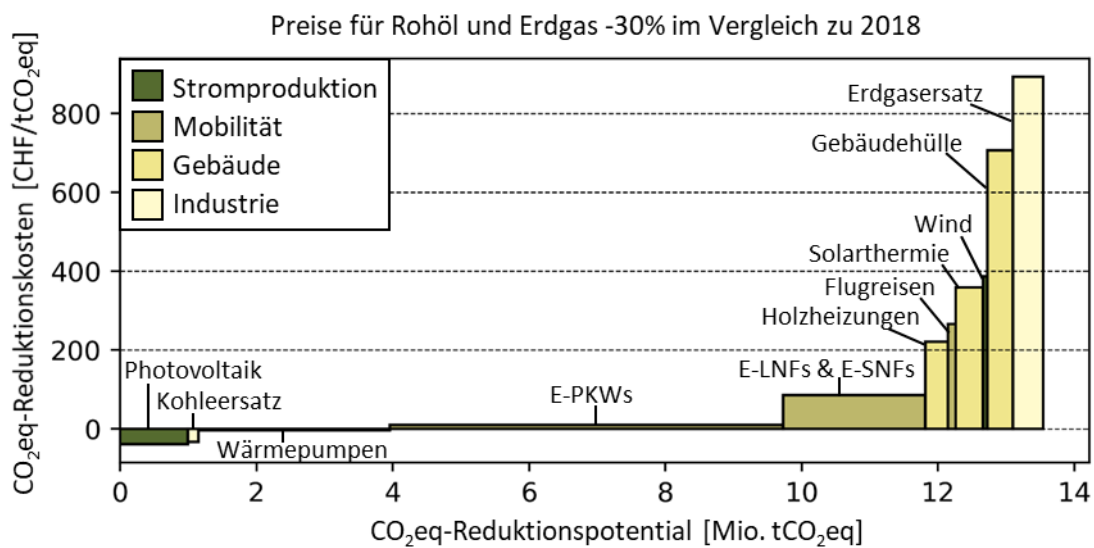


Abbildung 9. Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionspotential und CO₂eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit um 30 % reduziertem Rohölpreis und Erdgaspreis verglichen zu Preisen im Jahr 2018.

3.3.3 Abnahme des Strompreises im Vergleich zu 2018

Ein um 30 % reduzierter Strompreis gegenüber den Basisannahmen (12.8 Rp/kWh statt ein konstanter Preis von 18.4 Rp/kWh bis 2030) hat zur Folge, dass E-PKW's und E-LKW's/E-SNF's zu fahren, sowie Wärmepumpen zu betreiben, noch grössere Kosteneinsparungen gegenüber den Referenzfällen ermöglichen (Tabelle 4). Gebäudehüllen sanieren wird etwas teurer, weil die Energiekosten für Wärmepumpen im Referenzfall durch einen tieferen Strompreis abnehmen. Dadurch nehmen die Energiekostenvorteile, die eine Sanierung mit sich bringt, ab und die hohen Investitionskosten fallen mehr ins Gewicht. Bei kleineren Gestehungskosten für den Referenzstrom schwindet der Kostenvorteil von Photovoltaik gegenüber dem Referenzstrom und die Massnahme Photovoltaik führt nicht mehr zu Kosteneinsparungen, sondern zu Mehrkosten. Der Ausbau der Windenergie wird entsprechend ebenfalls teurer. Die gesamten Kosteneinsparungen, die durch die drei Massnahmen mit grossem Potential und «Kohleersatz» möglich sind, steigen auf 2'230 Mio. CHF (Tabelle 5), denn wenn der Strompreis abnimmt, profitieren die Elektromobilität und Wärmepumpen wegen des hohen Strombedarfs dieser Massnahmen besonders.

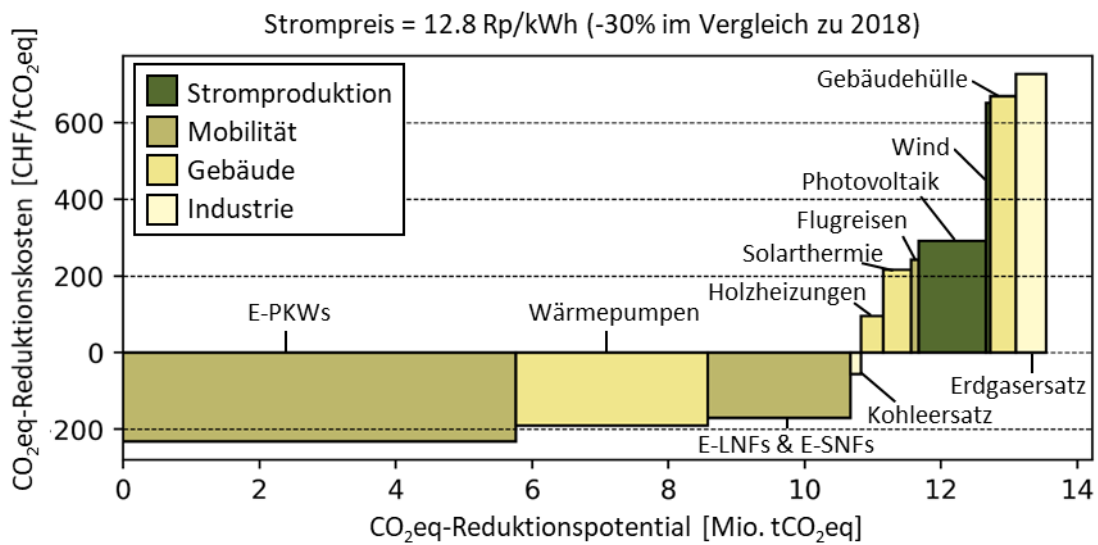


Abbildung 10. Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionspotential und CO₂eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit um 30 % reduziertem Strompreis verglichen zu 2018.

3.3.4 Zunahme des Strompreises im Vergleich zu 2018

Das umgekehrte Szenario zu Abbildung 10, ein höherer statt geringerer Strompreis, hat auch einen umgekehrten Einfluss auf die Reduktionskosten (Tabelle 4). Der Kostenvorteil von Photovoltaik gegenüber Strom mit höheren Gestehungskosten im Referenzfall steigt, was zu höheren Einsparungen führt. Der Ausbau von Windenergie ist aus demselben Grund kostengünstiger. Der Kostenvorteil durch Energiekosten-Einsparungen von stromverbrauchenden Technologien (elektrische Fahrzeuge, Wärmepumpen) sinkt mit 30 % höherem Strompreis, aber es ergeben sich trotzdem volkswirtschaftliche Einsparungen von insgesamt 1'145 Mio. CHF (Tabelle 5), wenn alle Massnahmen mit negativen Reduktionskosten umgesetzt werden.

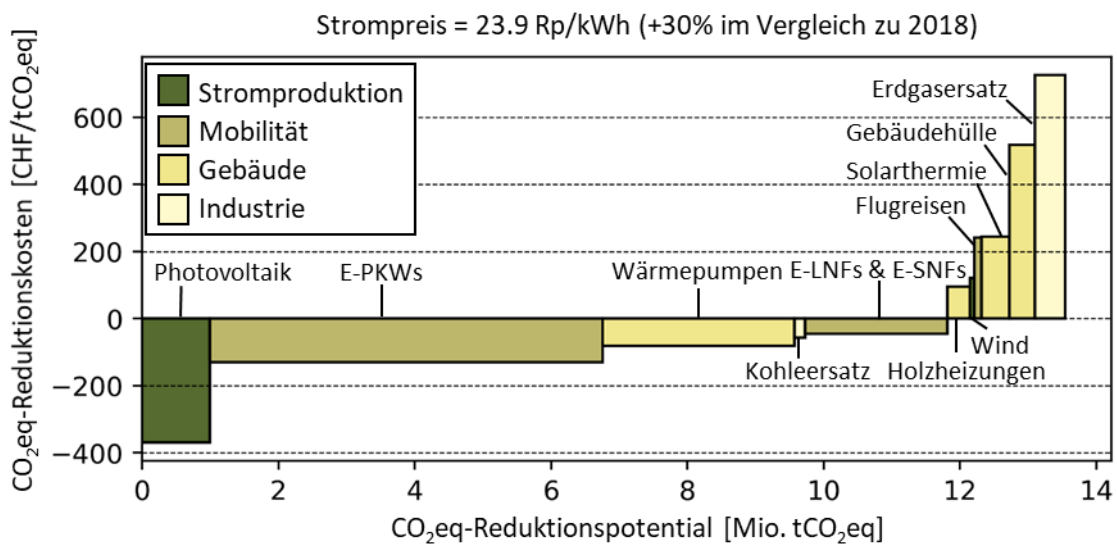


Abbildung 11. Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionspotential und CO₂eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit um 30 % erhöhtem Strompreis verglichen zu 2018.

3.3.5 Erhöhter Stromemissionsfaktor

Abbildung 12 zeigt den Einfluss auf das CO₂eq-Reduktionspotential und CO₂eq-Reduktionskosten eines um den Faktor 5 erhöhten Stromemissionsfaktor gegenüber unseren Basisannahmen. Dass der Stromemissionsfaktor im Jahr 2030 in der Schweiz auf 250 gCO₂/kWh⁸ steigt, ist zwar eher unwahrscheinlich, aber denkbar, falls sehr ungünstige politische Entwicklungen eintreten. Stromerzeugung aus fossilem Erdgas hat einen Stromemissionsfaktor von 400 gCO₂eq/kWh (WWF Schweiz, 2014). Der Stromverbrauch in der Schweiz könnte in Zukunft erheblich zunehmen und Atomkraftwerke werden in absehbarer Zeit abgestellt. Wenn Gaskraftwerke gebaut oder Kohlestrom aus dem Ausland importiert würde, könnte der Stromemissionsfaktor des Schweizer Strommix trotz des grossen Anteils an CO₂eq-freiem Strom aus Wasserkraft in Zukunft zunehmen.

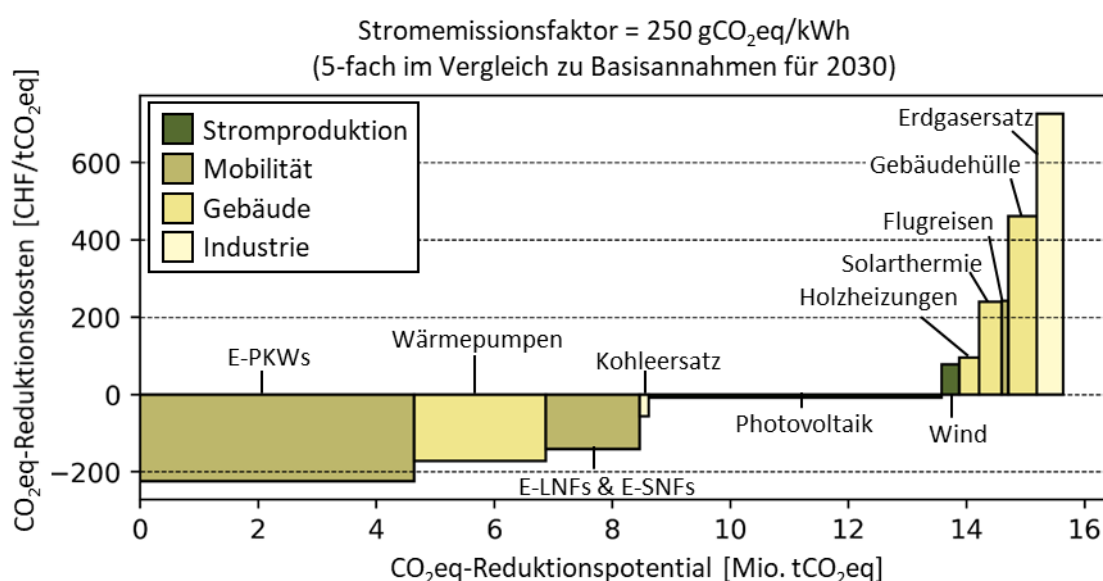


Abbildung 12. Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionspotential und CO₂eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit 5-fach erhöhtem Stromemissionsfaktor verglichen zu Basisannahmen von 50 gCO₂eq/kWh.

Ein 5-mal höher Stromemissionsfaktor verglichen zu unseren Basisannahmen hat zur Folge, dass das Reduktionspotential von Massnahmen, die viel Strom verbrauchen, erheblich abnimmt. Das Potential der drei Massnahmen «E-PKWs», «E-LNFs und E-SNFs» und «Wärmepumpen» nimmt von 10,6 Mio. tCO₂eq um 21 % auf 8,5 Mio. tCO₂eq ab. Das Reduktionspotential der Stromproduktionsmassnahmen wird allerdings massiv erhöht, wenn der Referenzstrom mehr CO₂eq pro Kilowattstunde emittiert. Da gemäss unseren Annahmen bei der Umsetzung des analysierten Massnahmenpakets mehr erneuerbarer Strom mit Photovoltaik und Wind produziert wird als die Massnahmen im Mobilitäts- und Gebäudesektor verbrauchen, steigt das gesamte CO₂eq-Reduktionspotential in Abbildung 12 insgesamt auf 15,6 Mio. tCO₂eq im Vergleich zu 13,6 Mio. tCO₂eq (Abbildung 6).

Zu Abbildung 12 ist ausserdem zu bemerken, dass ein kleineres Reduktionspotential einer Massnahme zu einer Zunahme der Reduktionskosten/-einsparungen pro Tonne CO₂eq führt. Die Balken, welche die einzelnen Massnahmen in der Reduktionskostenkurve repräsentieren, schrumpfen auf der x-Achse und wachsen dafür aber auf der y-Achse, denn die Gesamtkosten einer Massnahme gegenüber dem Referenzfall sind fix. Sie setzen sich aus den spezifischen Kosten pro Tonne CO₂eq und dem Reduktionspotential zusammen. Für Massnahmen mit hohem Stromverbrauch nimmt mit höherem Stromemissionsfaktor das CO₂eq-Reduktionspotential ab. Daher sind die Kosteneinsparungen pro

⁸ Zum Vergleich: Im Jahr 2018 emittierte die Stromproduktion in Deutschland 401 gCO₂/kWh (Umweltbundesamt, 2020).

Tonne CO₂eq (Abbildung 12) höher als mit unseren Basisannahmen (Abbildung 6). Für die Massnahmen «Photovoltaik» und «Wind» nimmt das Reduktionspotential zu, wenn bei der Stromproduktion im Referenzfall mehr CO₂eq anfällt. Daher sind die Kosteneinsparungen pro Tonne CO₂eq tiefer für den Ausbau von Photovoltaik und die Reduktionskosten pro Tonne CO₂eq für den Ausbau von Wind geringer. Dieser Umstand wird in der Sensitivitätsanalyse für Photovoltaik detaillierter diskutiert (siehe 4.5.1.2).

3.3.6 Erhöhte Zins- und Diskontrate

Um den Einfluss des Zins- und Diskontsatzes auf die Reduktionskosten nachzuvollziehen, ist es hilfreich, sich in Erinnerung zu rufen, dass die Kosten/Einsparungen einer Massnahme die Differenz zum Referenzfall darstellen. Massnahmen mit negativen CO₂eq-Reduktionskosten haben in den meisten Fällen höhere Anschaffungskosten aber kleinere Energie- und/oder Unterhaltskosten als im Referenzfall. Wenn der Zinssatz und der Diskontsatz erhöht werden, führt dies aus zwei Gründen zu kleineren Kosteneinsparungen dieser Massnahmen. Mit einem höheren Zinssatz nimmt der Anteil an jährlichen Investitionskosten inklusive Kapitalkosten (Annuität) an den Vollkosten zu und die Nettoeinsparungen (verursacht durch geringere Energie und Unterhaltskosten) sinken wegen der stärkeren Diskontierung. Massnahmen mit hohen Investitionskosten im Vergleich zu Energiekosteneinsparungen sind besonders von einem hohen Zinssatz betroffen. Dies wird vor allem ersichtlich anhand der starken Erhöhung der Reduktionskosten der Massnahme «Gebäudehülle sanieren» (Tabelle 4). Die Gestehungskosten der zwei Stromproduktionsmassnahmen «Photovoltaik» und «Windausbau» bestehen aus Investitions- und Unterhaltskosten. Wenn Kapitalkosten zunehmen, steigen die Gestehungskosten erheblich, daher steigen auch die Reduktionskosten dieser beiden Massnahmen. Erdgasersatz und Holzpellet-Heizungen sind die einzigen Massnahmen, welche billiger werden mit einer höheren Diskontrate. Beim Ersatz von Erdgas fallen keine Investitionskosten an. Die höheren Gestehungskosten von Biomethan verglichen zu Erdgas fallen bei einer hohen Diskontrate weniger ins Gewicht. Da die Energiekosten für Holzpellets höher sind als für fossile Brennstoffe profitiert die Massnahme «Holzheizungen» ebenfalls von einer höheren Diskontrate.

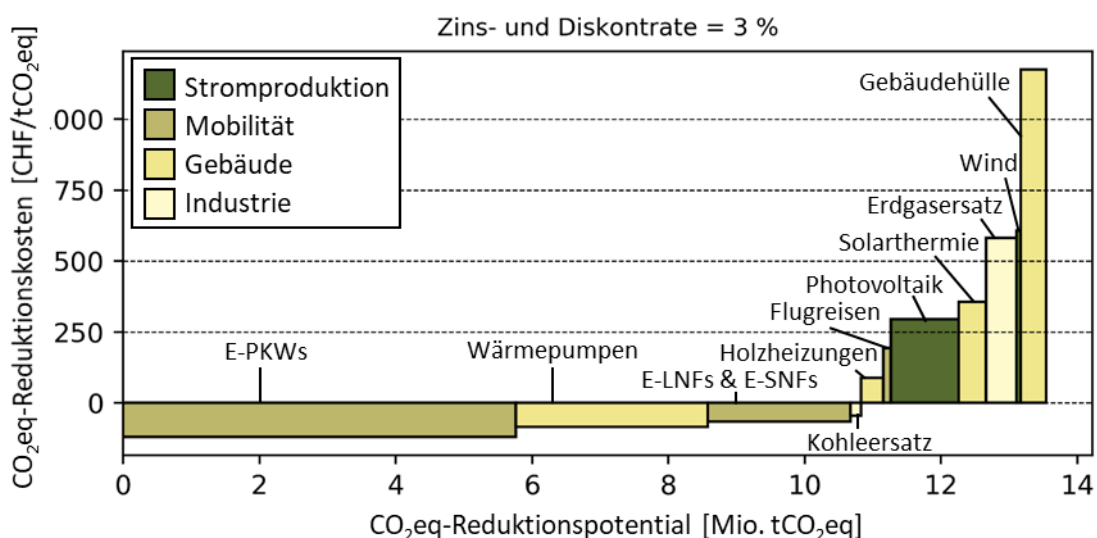


Abbildung 13. Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionspotential und CO₂eq-Reduktionskosten der Massnahmen mit einem Zins- und Diskontsatz von 3 % anstelle von 0.5 %.

3.3.7 Zusammenfassung sektorenübergreifende Sensitivitätsanalyse

Die Annahme, dass der Rohölpreis in Zukunft um 30 % steigen wird, beeinflusst die Resultate massgeblich. Die drei Massnahmen welche 80 % des Reduktionspotentials stellen («E-PKWs», «E-LNFs und

E-SNFs» und «Wärmepumpen»), sind bestimmend dafür, ob grosse Mengen CO₂eq-Emissionen eingespart werden können und gleichzeitig volkswirtschaftliche Einsparungen möglich sind. Mit unseren Basisannahmen, aber auch mit stagnierendem Rohölpreis, beträgt das Reduktionspotential, welches mit volkswirtschaftlichen Einsparungen ausgeschöpft werden kann, 11.8 Mio. tCO₂eq oder 87 % des Potentials des gesamten Massnahmenpakets. Nur wenn der Rohölpreis bei gelichbleibendem Strompreis bis 2030 erheblich sinkt (z.B. um 30 %), schrumpft das Reduktionspotential mit volkswirtschaftlichen Einsparungen ebenfalls erheblich auf 4.0 Mio. tCO₂eq (Tabelle 5).

Tabelle 4. Sektorenübergreifende Sensitivitätsanalyse: CO₂eq-Reduktionskosten.

Massnahme	Basis- annahmen	Rohöl- und	Rohöl- und	Strompreis	Strompreis	Diskont- / Zinssatz = 3 %
		Erdgaspreis 0 % im Vergleich zu 2018	Erdgaspreis -30 % im Vergleich zu 2018	-30 % im Vergleich zu 2018	+30 % im Vergleich zu 2018	
CO ₂ eq-Reduktionskosten [CHF/tCO ₂ eq]						
E-PKWs	-181	-87	10	-232	-130	-120
E-LNFs & E-SNFS	-108	-13	85	-170	-45	-67
Flugreisen	218	242	266	212	225	175
Wärmepumpen	-136	-85	-4	-191	-81	-84
Pelletheizungen	95	144	221	95	95	89
Solarthermie	230	282	358	216	245	356
Gebäudehüllen	594	639	706	669	518	1175
Erdgasersatz	726	751	892	726	726	582
Kohleersatz	-56	-48	-34	-56	-56	-45
Photovoltaik	-39	-39	-39	291	-369	296
Wind	386	386	386	651	121	607
Moore	118	118	118	118	118	156

Tabelle 5. Sektorenübergreifende Sensitivitätsanalyse: Totale Massnahmenkosten.

Massnahme	Basis- annahmen	Rohöl- und	Rohöl- und	Strompreis	Strompreis	Diskont- / Zinssatz = 3 %
		Erdgaspreis 0 % im Vergleich zu 2018	Erdgaspreis -30 % im Vergleich zu 2018	-30 % im Vergleich zu 2018	+30 % im Vergleich zu 2018	
Totale Massnahmenkosten [Mio. CHF]						
E-PKWs	-1042	-504	57	-1336	-748	-690
E-LNFs & E-SNFS	-226	-26	177	-356	-95	-139
Flugreisen	25	27	30	24	25	20
Wärmepumpen	-383	-239	-12	-538	-228	-237
Pelletheizungen	31	47	73	31	31	29
Solarthermie	93	114	145	87	99	144
Gebäudehüllen	222	239	264	251	194	440
Erdgasersatz	323	334	397	323	323	259
Kohleersatz	-9	-7	-5	-9	-9	-7
Photovoltaik	-39	-39	-39	288	-366	293
Wind	23	23	23	39	7	37
Moore	2	2	2	2	2	3
Einsparungen	-1698	-815	-56	-2239	-1445	-1073
Mehrkosten	718	785	1166	1043	680	1222
Netto	-981	-30	1110	-1196	-765	148
Potential mit Reduktionskosten < 0 CHF/tCO ₂ eq [Mio. tCO ₂ eq]						
	11.8	11.8	4.0	10.8	11.8	10.8

4 Sektorenanalyse

In diesem Kapitel werden die Massnahmen der verschiedenen Sektoren ausführlich beschrieben. Unterkapitel 4.1 beschreibt den Mobilitätssektor, 4.2 den Gebäudesektor, 4.3 den Industriesektor, 4.4 den Land- und Forstwirtschaftssektor und 4.5 den Energiesektor (Stromproduktion). Für jede Massnahme wird beschrieben, was die wichtigsten Annahmen sind. Des Weiteren werden das Reduktionspotential und die Reduktionskosten mit den Basisannahmen kommentiert und eine Sensitivitätsanalyse zeigt auf, wie stark einzelne Annahmen die Resultate beeinflussen.

4.1 Mobilitätssektor

Der Verkehrssektor trug im Jahr 2018 mit 32 % am meisten zu den CO₂eq-Emissionen in der Schweiz bei (BAFU, 2020b). Personenwagen (PKWs) waren für 74 % und Liefer- und Lastwagen für 21 % der Emissionen verantwortlich (BAFU, 2020b). Infrac (2017) prognostiziert, dass im Jahr 2030 rund 2.1 Mio.tCO₂eq weniger im Verkehrssektor emittiert wird als 2018, obwohl die Fahrleistung jährlich um 0.7 % zunimmt. Die CO₂eq-Reduktion im Referenzszenario für 2030 ist hauptsächlich auf PKWs mit geringerem Treibstoffverbrauch und auf einen erhöhten Anteil an elektrischen PKWs zurückzuführen (Infrac, 2017). Im Bereich Mobilität auf der Strasse wurden in der vorliegenden Studie die Massnahmen «Neue PKWs ausschliesslich elektrisch» und «neue LKWs ausschliesslich elektrisch» analysiert. Eine weitere Massnahme im Mobilitätssektor ist «Inländische Flüge durch Zug ersetzen».

4.1.1 Neuwagen ausschliesslich batterieelektrisch (E-PKWs)

PKWs, welche ihre Lebensdauer erreicht haben, werden ab dem Jahr 2021 ausschliesslich mit neuen batterieelektrischen PKWs ersetzt. Es wird nicht damit gerechnet, dass PKWs ersetzt werden, obwohl sie ihre Lebensdauer noch nicht erreicht haben.

4.1.1.1 Allgemeine Annahmen

Der Bestand an Personenwagen in der Schweiz stieg in den letzten 10 Jahren von 4 Mio. im Jahr 2010 auf 4.7 Mio. im Jahr 2019 (BFS, 2020e). Das jährliche Wachstum des Bestands sank in diesen Jahren von 2 % auf 0.5 %. Das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) prognostiziert, dass in den nächsten Jahren die Fahrleistung der Personenwagen jährlich um 0.7 % zunimmt (ARE, 2016). Basierend auf dieser Prognose nehmen wir an, dass auch der Bestand an Personenwagen um 0.7 % zunehmen wird. Die Ersatzrate von PKWs betrug in den letzten 10 Jahren durchschnittlich 5.8 % (BFS, 2020d, 2020e), und die durchschnittliche Lebensdauer eines Personenwagen 17 Jahre. Wir gehen davon aus, dass auch in Zukunft jährlich 5.8 % des Bestandes ersetzt werden. Insgesamt wird der Anteil Neuwagen am Bestand in den nächsten Jahren somit 6.5 % betragen, wobei der grösste Teil der Neuwagen alte Autos ersetzen wird und rund jeder neunte Neuwagen zum Wachstum des Bestands beitragen wird.

Wenn im Jahr 2021 mit der Umsetzung der Massnahme «Ausschliesslich batterieelektrische Neuwagen» angefangen wird, beträgt 2030 der Anteil an E-PKWs am Personenwagenbestand 63 %. Ein Schweizer Auto legte im Jahr 2017 auf Schweizer Strassen durchschnittlich 11'000 km zurück (BFS, 2019a, 2020e). Die jährliche Fahrleistung nimmt mit zunehmendem Alter ab (Wietschel, 2019). Daher nehmen wir für Neuwagen eine grössere jährliche Fahrleistung von 15'000 km⁹ an und gehen davon

⁹ Wietschel (2019) gibt jährliche Fahrleistungen von 20'000 km für neue Mittelklassewagen und 30'000 km für neue Oberklassenagen an. Unsere Annahme von einer kleineren Fahrleistung von 15'000 km basiert auf der Tatsache, dass die Anzahl durchschnittlich jährlich gefahrene Kilometer über die Lebensdauer pro

aus, dass die Fahrleistung über die Lebensdauer linear abnimmt und im Durchschnitt über die gesamte Lebensdauer 11'000 km beträgt. Wegen der grossen Anzahl an Neuwagen, die über 10 Jahre gekauft werden (3.1 Mio. Stück in den Jahren 2021 - 2030) und weil durchschnittlich rund 2 tCO₂eq-Emissionen pro Jahr mit einem elektrischen Neuwagen gegenüber einem Benziner eingespart werden können, ergibt sich für diese Massnahme das grösste CO₂eq-Reduktionspotential aller untersuchten Massnahmen. Es beträgt 5.8 Mio. tCO₂eq¹⁰ im Jahr 2030 und trägt zu 43 % des gesamten Potentials aller analysierten Massnahmen bei. Aus diesem Grund ist diese Massnahme nachfolgend ausführlicher beschrieben als andere Massnahmen und die Sensitivitätsanalyse ist detaillierter.

In der Einleitung (Abschnitt 1.2) wurde definiert, dass in der Kostenkurve nur Massnahmen berücksichtigt werden, die auf technologischen Veränderungen beruhen und keine Nutzenänderungen beinhalten. Das Umsteigen von fossil betriebenen Fahrzeugen auf Elektroautos ist eine Massnahme, die zum heutigen Zeitpunkt eventuell von einigen Autokäuferinnen als Nutzenminderung betrachtet werden könnte, weil Elektroautos heute eine kleinere Reichweite als Benzin/Diesel-PKW's haben und die Batterieladung länger dauert als Benzin oder Diesel zu tanken. Die Reichweite hängt von der Batteriekapazität und dem Stromverbrauch pro Kilometer ab und beträgt gemäss einem Test des Allgemeinen Deutschen Automobil-Clubs (ADAC), welcher im Frühjahr 2020 für 20 aktuelle Modelle durchgeführt wurde, je nach E-Automodel ca. 100 – 450 km (ADAC, 2020b). In diversen Studien wurde aber prognostiziert, dass in den nächsten Jahren die Kosten für Batterien weiter sinken werden (BNEF, 2019; EBP, 2020; UBS, 2017) und Elektroautos effizienter werden (BNEF, 2019; Wietschel, 2019). Beide Faktoren führen zu grösseren Reichweiten. Bei zunehmender Verbreitung von E-Autos wird auch die Ladeinfrastruktur von Schnellladestationen ständig ausgebaut werden. In gewissen Bereichen liefern E-Autos auch eine Nutzensteigerung. Sie müssen seltener gewartet werden und viele Autofahrer schätzen das Fahrgefühl und besonders die direkte Beschleunigung. Daher gehen wir davon aus, dass ein Umsteigen auf die Elektromobilität insgesamt keine erheblichen Nutzenänderung darstellt.

In Abschnitt 2.2 wurde erläutert, wie die Systemgrenzen für unsere Analyse definiert sind. Mit Ausnahme der Stromproduktion werden in unserer Analyse nur direkte Emissionen berücksichtigt, die in der Schweiz anfallen. Dies bedeutet, dass das CO₂eq-Reduktionspotential berechnet wird, indem nur die CO₂eq-Emissionen während des Betriebs zwischen elektrisch und fossil betriebenen Autos verglichen werden. Die CO₂eq-Emissionen, die mit der «grauen Energie» für die Gewinnung von Rohmaterialien und für die Herstellung der Autos und der Batterien assoziiert sind, werden in diesem Bericht nicht berücksichtigt, weil diese Emissionen hauptsächlich im Ausland anfallen. Eine von EnergieSchweiz veröffentlichte Ökobilanz von Personenwagen, welche graue Emissionen berücksichtigt, kommt zum Ergebnis, dass mit Schweizer Strommix betriebene Batteriefahrzeuge heute im Durchschnitt 150 gCO₂eq/km gegenüber einem Benzinauto einsparen, wenn die Emissionen für beide Antriebsarten über den ganzen Lebenszyklus inklusive Herstellung aller Autobestandteile berücksichtigt werden (Bauer, 2020). Wenn derselbe Stromemissionsfaktor wie in der Studie von EnergieSchweiz verwendet wird, ergibt unsere Analyse 174 gCO₂eq/km Einsparungen. Weil die grauen Emissionen im Zusammenhang mit der Herstellung der Batterie in unserer Analyse vernachlässigt wird, überschätzen wir das CO₂eq-Einsparpotential um rund 15 %. Es ist allerdings zu erwarten, dass zukünftige Batterien mit weniger Rohstoffen, effizienter und mit einem höheren Anteil an erneuerbaren Energien hergestellt werden. Dies hätte zur Folge, dass der Anteil an grauen Emissionen an den gesamten Lebenszyklusemissionen eines E-PKW bis 2030 sinken würde.

Personenwagen in der Schweiz kleiner als in Deutschland ist. Der Einfluss dieser Annahme auf die Resultate wird in der Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 4.1.1.6 anhand von Abbildung 16 diskutiert.

¹⁰ Weil im Referenzfall auch ein gewisser Anteil an Neuwagen batterieelektrisch angenommen wird (siehe A. 1. 3), ist das Potential der Massnahme kleiner als das Produkt der jährlichen Emissionseinsparungen pro Neuwagen und Anzahl Neuwagen.

In den letzten Jahren sind die Preise für E-PKWs vor allem dank tieferen Batteriepreisen stark gesunken. Daher hat das Interesse am Thema Elektromobilität nicht nur aus Lufthygienischen- und Klimaschutzgründen, sondern auch aus wirtschaftlichen Überlegungen zugenommen. Zahlreiche Studienautoren haben in den letzten Jahren die Lebenszykluskosten von E-PKWs mit denen von PKWs mit Verbrennungsmotoren verglichen (Palmer et al., 2018; Propfe et al., 2012; UBS, 2017; Wietschel, 2019). Die Lebenszykluskosten in diesen Studien beinhalten grundsätzlich dieselben Elemente wie in unserer Studie. Es sind Anschaffungs-, Energie- und Unterhaltskosten. Infrastrukturkosten für Tankstellen und Ladestationen werden in unserer Analyse jedoch nicht berücksichtigt.

4.1.1.2 Anschaffungskosten

Die meisten Studienautoren analysieren die Lebenszykluskosten aus Konsumentensicht, weshalb alle Kosten inklusive Steuern und Subventionen berücksichtigt werden und für die Anschaffungspreise reale Verkaufspreise angenommen werden. In unserer Studie werden die volkswirtschaftlichen Kosten analysiert. Daher nehmen wir an, dass die Anschaffungskosten den Herstellungskosten entsprechen. Im Jahr 2017 machte gemäss einer Studie der Bank UBS der Autohersteller Chevrolet mit dem Verkauf des elektrischen Modells *Chevrolet Bolt* Verluste (UBS, 2017), weil der Verkaufspreis unter den Herstellungskosten lag, wenn indirekte Kosten für Forschung und Entwicklung berücksichtigt werden. Es ist davon auszugehen, dass diese Verluste mit höheren Verkaufspreisen für Autos mit Verbrennungsmotoren quer subventioniert wurden. Daher repräsentieren Herstellungskosten die volkswirtschaftlichen Kosten besser als Verkaufspreise.

Erste Exemplare des *Chevrolet Bolt* wurden Ende 2016 in den USA produziert und verkauft. In Europa wird dasselbe Fahrzeug von Opel unter dem Namen *Opel Ampera-e* vertrieben. Die UBS-Studie präsentiert Resultate von Analysten, welche das Elektroauto *Chevrolet Bolt* in seine Einzelteile zerlegten und auf Grund der Komponenten des Autos dessen direkten und indirekten Herstellungskosten schätzten (UBS, 2017). Zudem präsentiert sie einen Vergleich der Herstellungskosten für ein vergleichbares Auto mit Verbrennungsmotor (VW-Golf). Die UBS-Studie kommt zum Schluss, dass die Kosten für den Autohersteller für den elektrischen *Chevrolet Bolt* um 67 % höher waren als für den VW-Golf. Diese Mehrkosten entstanden vor allem durch hohe Batterie- sowie Forschungs- und Entwicklungskosten. Die Kosten für den elektrischen Antriebsstrang des Elektroautos werden bereits für das Jahr 2017 billiger geschätzt als für den Verbrennungsmotor (UBS, 2017). Die Herstellungskosten von Verbrennungsmotoren werden gemäss verschiedenen Studien in Zukunft teurer. Wegen verschärften CO₂-Flottenemissionsgrenzwerten, welche aufwendigere technische Lösungen erfordern, werden die Kosten für den Verbrennungsmotor steigen (Gnann, 2015; ICCT, 2019). Diverse Studien prognostizieren, dass sich die Batteriekosten in den nächsten 10 - 15 Jahren halbieren werden (BNEF, 2019; EBP, 2020; UBS, 2017). Die UBS-Studie prognostiziert einen Anstieg der weltweiten Verkäufe von batterieelektrischen Fahrzeugen um einen Faktor 25 von rund 0.5 Millionen im Jahr 2016 auf 11.4 Millionen im Jahr 2025 (UBS, 2017). Durch den Anstieg der Verkäufe entstehen Skaleneffekte, welche vor allem zu geringeren Forschungs- und Entwicklungskosten pro Auto führen. Pro verkauften *Chevrolet Bolt* rechnet die UBS im Jahr 2025 mit 10-Mal tieferen Forschungs- und Entwicklungskosten als im Jahr 2016. Die Kosten für den *Chevrolet Bolt* ohne Batterie sinken gemäss UBS bis 2025 hauptsächlich durch diese Skaleneffekte um 32 % und die gesamten Herstellungskosten inklusive Batterie werden im Jahr 2025 nicht mehr erheblich teurer sein als für ein vergleichbares Auto mit Verbrennungsmotor (VW-Golf). Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen andere Studien, welche prognostizieren, dass die Kosten-Parität zwischen E-PKWs und PKWs mit Verbrennungsmotor innerhalb dieses Jahrzehnts (2020 – 2030) erreicht wird (BNEF, 2017; ICCT, 2019; Palandrani, 2019; Thielmann, 2020). Obwohl die Batteriekosten in Zukunft sinken werden, sind sie auch in den nächsten Jahren ein Kostentreiber. Ob die totalen Herstellungskosten für ein E-Auto günstiger sein werden als für ein Auto mit

Verbrennungsmotor hängt daher massgeblich von der Annahme für die Batteriegrösse ab. Dieser Faktor wird in der Sensitivitätsanalyse (Absatz 4.1.1.6) anhand von Abbildung 15 diskutiert.

Die Annahmen, welche in unserer Analyse verwendet wurden, sind im Anhang in Abschnitt A. 1. 3 zusammengefasst. Die wichtigsten Annahmen werden hier kurz erläutert.

- Für die Batterie wurde eine Batteriekapazität von 40 kWh für das Jahr 2018 und 60 kWh für das Jahr 2030 angenommen.
 - Mit einem Stromverbrauch von 18 kWh/100 km im Jahr 2018 fährt ein E-Auto mit einer 40-kWh-Batterie rund 220 km. Für neue Autos wird angenommen, dass sie effizienter werden und ihr Energieverbrauch jährlich um 2.2 % sinkt (Infras, 2017). Im Jahr 2030 reicht daher eine 60-kWh-Batterie für rund 440 km. In der Sensitivitätsanalyse (Absatz 4.1.1.6) wird diskutiert, was der Einfluss der Annahme für die Batteriegrösse auf die CO₂eq-Reduktionskosten ist.
- Wir nehmen an, dass die Batteriekosten gemäss der Prognose von BNEF (2019) von 173 CHF/kWh im Jahr 2018 auf 61 CHF/kWh im Jahr 2030 sinken werden.
- Für die Herstellungskosten eines PKW im Jahr 2018 beziehen wir uns auf die UBS-Studie (UBS, 2017).
 - Herstellungskosten E-PKW ohne Batterie = *Chevrolet Bolt* ohne Batterie
 - Herstellungskosten PKW mit Verbrennungsmotor = VW-Golf
- Für die Herstellungskosten eines PKW im Jahr 2030 nehmen wir folgendes an:
 - Wegen Skaleneffekte werden die Herstellungskosten für E-PKWs ohne Batterie sinken. Unsere Annahme ist aber konservativer als die UBS-Prognose, welche eine Reduktion um 32 % bis 2025 für den *Chevrolet Bolt* voraussagt (UBS, 2017). Gemäss BNEF (2017) führen Skaleneffekte erst bis 2030 zu einer Kostenreduktion von 20 – 30 %. Wie stark Skaleneffekte zu einer Kostenreduktion beitragen werden, hängt unter anderem vom Wachstum der E-PKW Verkäufe ab und ob Hersteller zusammenarbeiten werden, um grössere Produktionsvolumen zu erreichen. Wir nehmen an, dass die Herstellungskosten eines E-PKW ohne Batterie bis 2030 um 25 % sinken werden.
 - Herstellungskosten für PKWs mit Verbrennungsmotor werden bis 2030 konstant angenommen.
 - Mit unseren Annahmen kostet im Jahr 2030 ein E-PKW inklusive Batterie 410 CHF mehr als ein Auto mit Verbrennungsmotor. Mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 17 Jahren sind die jährlichen Anschaffungskosten eines E-PKWs 25 CHF höher als für ein Benzin/Diesel-PKW (siehe Tabelle 7).

4.1.1.3 Unterhaltskosten

Die gesamten Unterhaltskosten für ein Personenfahrzeug bestehen aus Kosten für Wartung und Reparaturen, Pflege, Versicherung, Steuern und Parkplatz. Da wir in unserer Studie gesamtwirtschaftliche Kosten untersuchen, werden Steuern nicht berücksichtigt. Pflege und Parkplatzkosten sind unabhängig vom Fahrzeugantrieb. Daher beeinflussen diese Kosten die Differenz der Unterhaltskosten für Massnahme und Referenzfall nicht und werden nicht analysiert. Versicherungskosten sind abhängig vom Wert des Fahrzeugs und sind daher nicht unabhängig vom Fahrzeugantrieb. Diese Kosten werden dennoch nicht berücksichtigt, um eine höhere Vergleichbarkeit von Massnahmen in verschiedenen Sektoren zu gewährleisten (siehe Abschnitt 2.5). In unserer Studie werden daher für die jährlichen Unterhaltskosten nur Wartungs- und Reparaturkosten (zusammengefasst unter Werkstattkosten) analysiert. Mehrere Studien haben gezeigt, dass die jährlichen Werkstattkosten von batterieelektrischen Fahrzeugen geringer sind als für Autos mit Verbrennungsmotoren (Palmer et al., 2018; Propfe et al., 2012; UBS, 2017; Wietschel, 2019). Einige Standardposten wie Ölwechsel oder Verschleissreparaturen am Auspuff fallen für Elektroautos ganz weg. Oft wird angenommen, dass auch Bremsen weniger oft

ausgewechselt werden müssen, weil regeneratives Bremsen den Verschleiss vermindert. In der Praxis hat sich aber gezeigt, dass durch die geringe Belastung vor allem die hinteren Scheibenbremsen korrodieren und daher häufig gewartet werden müssen (ADAC, persönliche Kommunikation, 31. Juli 2020). Regeneratives Bremsen schont theoretisch auch die Reifen. Andererseits führt das grössere Anfahr-Drehmoment und das höhere Gewicht des Elektroautos zu hohem Reifenverschleiss und die Reifen müssen daher gleich oft oder sogar häufiger als bei Diesel/Benzin-PKW's gewechselt werden (ADAC, persönliche Kommunikation, 31. Juli 2020).

Sowohl für Elektroautos als auch für Autos mit Verbrennungsmotoren hängen die Werkstattkosten von den jährlich gefahrenen Kilometer, dem Alter des Fahrzeugs und von der Fahrzeugklasse ab. Teure Autos haben höhere Reparaturkosten, weil teurere Ersatzteile eingesetzt werden. Ein Durchschnittswert für Werkstattkosten ist daher grundsätzlich mit grossen Unsicherheiten behaftet. Es kann nicht auf verlässliche Angaben aus der Literatur oder von Wirtschaftsanalysten zurückgegriffen werden, denn in den meisten Studien wird nicht transparent dargelegt, welche der oben genannten Kosten und Parameter für die Analyse berücksichtigt wurden. Tabelle 6 zeigt einen Vergleich zwischen Literaturangaben und eigenen Analysen basierend auf Angaben des Allgemeinen Deutschen Automobil-Clubs (ADAC, 2020a). Unsere eigenen Analysen basieren auf dem Autokostenvergleich des ADAC's (ADAC, 2020a), welcher eine umfassende Datenbank mit detaillierten Kostenangaben für fast alle erhältlichen Automarken und Modelle zur Verfügung stellt und sich dabei auf Herstellerangaben bezieht. Die durchschnittlichen Werkstattkosten werden für die ersten 60'000 km eines Neuwagens angegeben, ein Batterieersatz bei einem E-PKW und der Ersatz des Motors oder des Getriebes bei einem Auto mit Verbrennungsmotor ist darin nicht enthalten (ADAC, persönliche Kommunikation, 31. Juli 2020). Der ADAC hat einen Lebenszykluskostenvergleich zwischen verschiedenen aktuell erhältlichen Elektro-, Benzin- und Dieselaautos erstellt und dafür vergleichbare Modelle ausgewählt. Wir haben die Werkstattkosten derselben fünf E-PKW Modelle mit ihren fossilen Pendanten verglichen. Eine Übersicht über die Resultate dieser Analyse ist im Anhang in Tabelle A 6 gezeigt. Wie erwartet sind die Wartungskosten für alle Elektro-Modelle kleiner als für Verbrenner, der Reifenersatz ist für einige Elektro-Modelle hingegen teurer (Tabelle A 6). Der ADAC gibt für Reparaturkosten keine erheblichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Antrieben an (siehe Erklärungen oben). Die gesamten Werkstattkosten sind für die meisten Elektro-Modelle etwas billiger als für die Verbrenner. Im Durchschnitt über die analysierten Modelle ergibt sich aber eine kleinere Verbilligung der Werkstattkosten pro Kilometer als die Angaben aus der Literatur (Tabelle 6). Im Vergleich zur UBS-Studie sind die durchschnittlichen ADAC-Werkstattkosten für Elektroautos sogar mehr als doppelt so hoch. Erklärungen für diesen Unterschied zu finden ist auf Grund fehlender Angaben für Quellen und Annahmen seitens der UBS nicht möglich. Die UBS-Studie gibt nur an, dass kein Batterieersatz berücksichtigt wurde und eine jährliche Fahrleistung von 15'000 km angenommen wurde. Dieselben Annahmen wurden auch beim Kostenvergleich mit dem ADAC-Rechner getroffen.

Regionale Unterschiede für Werkstattkosten können nicht ausgeschlossen werden. Da in der Schweiz Arbeit grundsätzlich teurer ist als in Deutschland, fallen hierzulande arbeitsintensive Reparaturen stärker ins Gewicht. Für die Schweiz gibt es aber gemäss unseren Recherchen keine umfassenden Analysen von Werkstattkosten verschiedener Antriebsarten. Wir nehmen daher an, dass der durchschnittliche Unterschied von Werkstattkosten zwischen E-PKW's und fossil betriebenen PKW's basierend auf dem ADAC-Kostenvergleich auch in der Schweiz 1.1 Rp/km beträgt (Tabelle 6). Bei einer jährlichen Fahrleistung von 15'000 km für Neuwagen ergeben sich gemäss unseren Annahmen 1011 CHF Werkstattkosten für Benzin/Diesel-PKW's und 852 CHF für E-PKW's. Die jährlichen Einsparungen eines E-PKW's bei Werkstattkosten betragen somit 159 CHF (Tabelle 7). Wir nehmen an, dass die Werkstattkosten konstant bleiben bis ins Jahr 2030.

In der Sensitivitätsanalyse (Abschnitt 4.1.1.6, Abbildung 15) wird der Einfluss der Werkstattkosten auf die gesamten CO₂eq-Reduktionskosten der Massnahme diskutiert.

Tabelle 6. Werkstattkosten (Wartungs- und Reparaturkosten) für Autos mit Verbrennungsmotor und Elektromotor: Vergleich zwischen Literaturangaben und eigener Analyse basierend auf (ADAC, 2020a). Angaben gelten für Neuwagen (maximal 5 Jahre Haltungsdauer) und 10'000 - 15'000 km jährliche Fahrleistung.

	PKW _{Benzin/Diesel}	E-PKW	PKW _{Benzin/Diesel} - E-PKW	Kostenvorteil E-PKW vs PKW _{Benzin/Diesel}
	Rp/km	Rp/km	Rp/km	
(Propfe et al., 2012), Mittelklasse, DE	8.0	6.6	1.4	18 %
(Wietschel, 2019), Mittelklasse, DE	5.6	3.8	1.8	32 %
(Wietschel, 2019), Oberklasse, DE	8.6	5.9	2.7	31 %
(Palmer et al., 2018), Mittelklasse, UK	3.0	2.3	0.7	23 %
(UBS, 2017), Mittelklasse, DE	6.1	2.6	3.6	58 %
Eigener Vergleich basierend auf 5 E-PKW- Modellen (ADAC, 2020a), Kleinwagen/Mittelklasse, DE	6.7	5.7	1.1	16 %

4.1.1.4 Energieverbrauch und -kosten

Im Jahr 2018 betrug der Energieverbrauch pro Kilometer für Neuwagen 8.9 L / 100 km für Benzin, 7.8 L / 100 km für Diesel und 18 kWh / 100 km für Strom (Infras, 2017). Wir nehmen gemäss der Studie von Infas (2017) an, dass Effizienzsteigerungen zu einem um 2.2 % pro Jahr reduzierten Energieverbrauch bei Neuwagen aller Antriebsarten führen. Diese Annahme bedeutet, dass im Jahr 2030 sowohl fossil wie batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge 23 % weniger Energie pro Kilometer als im Jahr 2018 verbrauchen. Die Stromkosten ohne Steuern und Abgaben in der Schweiz betragen 18.4 Rp/kWh im Jahr 2018 (siehe A. 1. 2). Die Stromkosten werden bis 2030 als konstant angenommen. Im Jahr 2019 betragen die Mineralölsteuern auf Benzin und Diesel rund 45 % des Verkaufspreises (EVZ, 2019). Nach Abzug der Mineralöl- und Mehrwertsteuer betragen die Benzin- und Dieselpreise 75 Rp/L respektive 84 Rp/L (siehe A. 1. 3). Bis 2030 nehmen wir gemäss den Prognosen der IEA (2019) eine Zunahme der Preise für fossile Treibstoffe um 30 % verglichen mit 2018 an. Was der Einfluss dieser Annahme auf die CO₂eq-Reduktionskosten ist, wird in Abschnitt 4.1.1.6 in der Sensitivitätsanalyse diskutiert (Abbildung 14).

Um den Energieverbrauch und die Kosten für Strom und Treibstoffe besser vergleichen zu können, berechnen wir beides basierend auf dem Heizwert von Benzin pro Kilowattstunde. Diese Berechnung ergibt einen Benzinverbrauch von 78 kWh / 100 km im Jahr 2018. Ein Elektroauto verbrauchte im selben Jahr durchschnittlich nur einen Viertel dieser Energie für dieselbe Fahrleistung. Der Benzinpreis pro Kilowattstunde betrug 8.5 Rp. Obwohl Benzin im Vergleich zu Strom weniger als halb so teuer pro Energieeinheit war, kostete die Energie für ein Elektroauto im Jahr 2018 nur die Hälfte im Vergleich zu einem Benziner. Mit einer jährlichen Fahrleistung für Neuwagen von 15'000 km betragen die Energiekosten für ein Benzin/Diesel-PKW durchschnittlich 990 CHF im Jahr 2018. Im Jahr 2030 bleiben die Energiekosten wegen erhöhten Treibstoffpreisen hoch (981 CHF), trotz Effizienzsteigerungen, die zu einem kleineren Energieverbrauch führen. Für E-PKWs nehmen die Energiekosten gemäss unseren Annahmen dank Effizienzsteigerung und konstantem Strompreis von 496 CHF im Jahr 2018 auf 380 CHF im Jahr 2030 ab. Daher können im Jahr 2030 mit einem E-PKW verglichen mit einem fossil betriebenen PKW rund 60 % oder 601 CHF pro Jahr bei den Energiekosten eingespart werden (Tabelle 7). Während bei neuen Benziner/Diesel-PKWs die Energiekosten pro Kilometer ungefähr gleich hoch sind wie die Werkstattkosten pro Kilometer, machen bei neuen E-PKWs die Werkstattkosten rund zwei Drittel der jährlichen variablen Kosten aus und das restliche Drittel entfällt auf die Energiekosten.

Bei der Verbrennung von Benzin entstehen 266 gCO₂eq/kWh (BAFU, 2019a). Im Jahr 2018 betrug der Emissionsfaktor für Schweizer Strom 97 gCO₂eq/kWh. Benzin verursacht in der Schweiz 2.7-mal so hohe CO₂eq-Emissionen wie Strom und ein benzinbetriebener PKW braucht 4-mal mehr Energie als ein E-PKW. Insgesamt stiess ein benzinbetriebener PKW das 11-fache an CO₂eq-Emissionen pro gefahrene Strecke verglichen mit einem E-PKW aus, nämlich 206 gCO₂eq/km im Vergleich zu 18 gCO₂eq/km. Bis 2030 wird sich gemäss unseren Annahmen der Emissionsfaktor für Strom auf 50 gCO₂eq/kWh halbieren (siehe A. 1. 1). Dies hat zur Folge, dass ein Benziner sogar 22-mal mehr CO₂eq-Emissionen pro Kilometer im Vergleich zum E-PKW ausstossen wird. Der Einfluss des Stromemissionsfaktors auf das CO₂eq-Reduktionspotential und der Einfluss der Energiepreise auf die CO₂eq-Reduktionskosten wird in der Sensitivitätsanalyse ausführlich diskutiert (Abbildung 14, Abbildung 16).

4.1.1.5 Übersichtstabelle: Kosten, Energieverbrauch und CO₂eq-Ausstoss

Tabelle 7. Vergleich von Kosten, Energieverbrauch und CO₂eq-Ausstoss im Jahr 2030 von neuen batterieelektrischen PKWs und fossil betriebenen PKWs.

	E-PKW	PKW _{fossil}	E-PKW - PKW _{fossil}
Annuität [CHF/ Jahr]	1451	1426	25
Unterhaltskosten [CHF/ Jahr]	852	1011	-159
Energiekosten [CHF/ Jahr]	380	981	-602
Total [CHF/ Jahr]	2682	3418	-736
Energieverbrauch [kWh/ 100 km]	13.8	59.4	-45.7
CO ₂ eq-Emissionen [gCO ₂ eq/km]	7	158	-151

4.1.1.6 CO₂eq-Reduktionspotential und -kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Die Massnahme beinhaltet den Ersatz von PKWs, welche ihre Lebensdauer erreicht haben, mit ausschliesslich batterieelektrisch betriebenen PKWs. Es wird angenommen, dass sie ab 2021 umgesetzt wird. Ein PKW-Ersatz vor dem Erreichen der Lebensdauer wird nicht angenommen. Mit einem CO₂eq-Reduktionspotential von 5.8 Mio. tCO₂eq im Jahr 2030 ist die Massnahme «Ausschliesslich batterieelektrische Neuwagen» diejenige mit dem grössten CO₂eq-Einsparpotential des Massnahmenpakets gemäss Tabelle 1 und trägt rund 43 % zum gesamten Potential der technischen Massnahmen bei. Die Massnahme hat CO₂eq-Reduktionskosten von -181 CHF/tCO₂eq und ermöglicht somit von allen technischen Massnahmen, die analysiert wurden, die grössten Kosteneinsparungen pro tCO₂eq-Emissionen. Gemäss unseren Basisannahmen spart ein E-PKW, welcher im Jahr 2030 gekauft wird, pro Jahr 736 CHF (Tabelle 7). Da die Stromkosten pro Fahrleistung bedeutend geringer sind als die Treibstoffkosten und ein E-PKW im Unterhalt weniger kostet als ein konventionelles Auto, ermöglicht die konsequente Umsetzung dieser Massnahme ab 2021 mit unseren Basisannahmen eine Kosteneinsparung von 1.04 Mrd. CHF im Jahr 2030. Die finanziellen Einsparungen dieser Massnahme sind grösser als die gesamten volkswirtschaftlichen Mehrkosten, die durch andere in diesem Bericht untersuchten Massnahmen entstehen (siehe Abschnitt 3.3.7, Tabelle 5).

In diesem Abschnitt werden die Parameter, welche die finanziellen Einsparungen/Kosten und das CO₂eq-Reduktionspotential am meisten beeinflussen, eingehend diskutiert.

Der kleinere Energieverbrauch von E-PKWs verglichen mit Benzin/Diesel-PKWs ist für den grössten Teil der Kosteneinsparungen verantwortlich. Die Kosten für Strom und Treibstoffe haben aber einen grossen Einfluss darauf wie gross die Kosteneinsparungen ausfallen. Mit unseren Basisannahmen spart ein neuer E-PKW 601 CHF an Energiekosten im Jahr 2030 verglichen mit einem Benzin/Diesel-PKW (Tabelle 7). Abbildung 14 zeigt den Einfluss der Annahmen für die Strom- und Treibstoffpreisentwicklung von 2018 – 2030 auf die CO₂eq-Reduktionskosten. Die graue Fläche hebt den Parameterbereich hervor, für den keine Kosteneinsparungen anfallen würden. Falls die Treibstoffpreise bis 2030

um 30 % gegenüber 2018 abnehmen würden, wären mit dem heutigen Strompreis von 18.4 Rp/kWh die Kosten der Massnahme etwas höher als die Kosten im Referenzfall. Ein konstanter Treibstoffpreis bis 2030 würde eine Zunahme des Strompreises um 10 Rp/kWh erlauben, ohne dass die Massnahme zu volkswirtschaftlichen Zusatzkosten führen würde. Auf der anderen Seite zeigt Abbildung 14 auch die Auswirkung eines tieferen Strompreises auf die Kosteneinsparungen der Massnahme gegenüber dem Referenzfall. Wenn zum Beispiel die Preise für fossile Treibstoffe wie von der IEA (2019) prognostiziert bis 2030 um 30 % zunehmen und gleichzeitig der Strompreis auf 9 Rp/kWh halbiert würde, könnte pro Tonne vermiedenes CO₂eq 50 % mehr volkswirtschaftliche Kosten eingespart werden (270 CHF/tCO₂eq) verglichen mit unseren Basisannahmen (181 CHF/tCO₂eq).

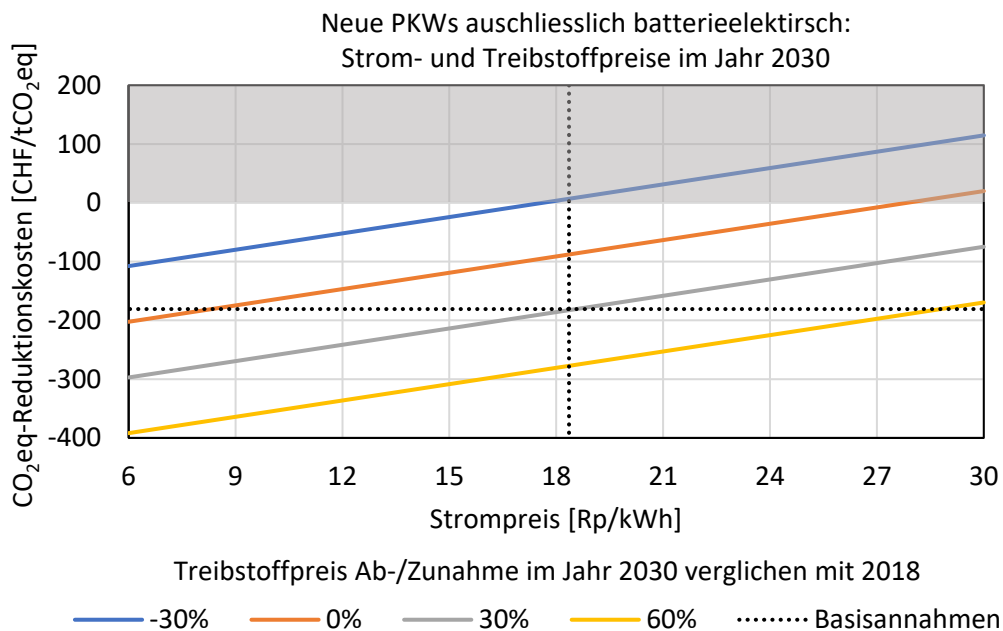


Abbildung 14. Neue PKWs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq Reduktionskosten in Abhängigkeit des Strompreises und der Treibstoffpreise im Jahr 2030. Die gestrichelten Linien zeigen unsere Basisannahmen: Strompreis = 18.4 Rp/kWh, 30 % Zunahme Treibstoffpreise zwischen 2018 - 2030 (Benzinpreis = 0.96 CHF/L, Dieselpreis = 1.08 CHF/L), CO₂eq-Reduktionskosten = -181 CHF/tCO₂eq. Die graue Fläche zeigt den Parameterbereich mit positiven CO₂eq-Reduktionskosten.

Die Werkstatt- und Anschaffungskosten für E-PKWs verglichen zu Benzin/Diesel-PKWs sind weitere Faktoren, welche die Kosteneinsparungen der Massnahme massgeblich beeinflussen. Die Anschaffungskosten für ein E-PKW sind heute hauptsächlich wegen hohen Batteriekosten höher als für einen vergleichbaren Benzin/Diesel-PKW. Bis ins Jahr 2030 werden die Batteriekosten zwar erheblich sinken, aber dies garantiert nicht unbedingt kleinere Anschaffungskosten, weil stattdessen grössere Batterien verbaut werden könnten. Unsere Basisannahmen sind eine 40-kWh-Batterie im Jahr 2018 und eine lineare Zunahme der Batteriekapazität bis im Jahr 2030 auf eine 60-kWh-Batterie, welche eine Reichweite von 435 km bieten wird (siehe Abschnitt 4.1.1.2). Die Werkstattkosten werden für alle Antriebsarten als konstant über die Zeit angenommen, wobei ein Benzin/Diesel-PKW gemäss unseren Basisannahmen 1.1 Rp/km höhere Werkstattkosten hat als ein E-PKW (Tabelle 6).

Abbildung 15 zeigt den Einfluss der Werkstattkostendifferenz und der zukünftigen Reichweite eines E-PKWs auf die CO₂eq-Reduktionskosten. Die Massnahme würde zu volkswirtschaftlichen Mehrkosten gegenüber dem Referenzfall führen, wenn Autos mit sehr grosser Reichweite (> 726 km) gekauft und die Werkstattkosten für E-PKWs teuer wären als für Benzin/Diesel-PKWs. Diese Entwicklung ist aber sehr unwahrscheinlich. Eine Reichweite von 726 km wäre mehr als 3-mal so gross als unsere Annahme für die durchschnittliche Reichweite von 220 km im Jahr 2018. Eine ausgebaute Ladeinfrastruktur wird

vermutlich dazu führen, dass in Zukunft wenig E-PKWs mit viel grösserer Reichweite nachgefragt werden. Optimierte Reifen und Bremsen für E-PKWs werden vermutlich dazu führen, dass die Werkstattkosten sinken und die Einsparungen bei E-PKWs gegenüber Benzin/Diesel-PKWs in Zukunft grösser sein werden. Falls die Angaben der UBS-Studie realitätsnahe wären und ein E-PKW bei den Werkstattkosten pro Kilometer tatsächlich 3.6 Rp/km gegenüber einem Benzin/Diesel-PKW einsparen würde (UBS, 2017), wären mit einer 40-kWh-Batterie im Jahr 2030 doppelt so hohe CO₂eq-Reduktionskosten möglich (360 CHF/tCO₂eq statt 180 CHF/tCO₂eq) als mit unseren Basisannahmen. Eine Änderung der Werkstattkostendifferenz um 1.5 Rp/km hat mit rund 80 CHF/tCO₂eq denselben Einfluss auf die Reduktionskosten wie die Änderung der Batteriekapazität um 40 kWh.

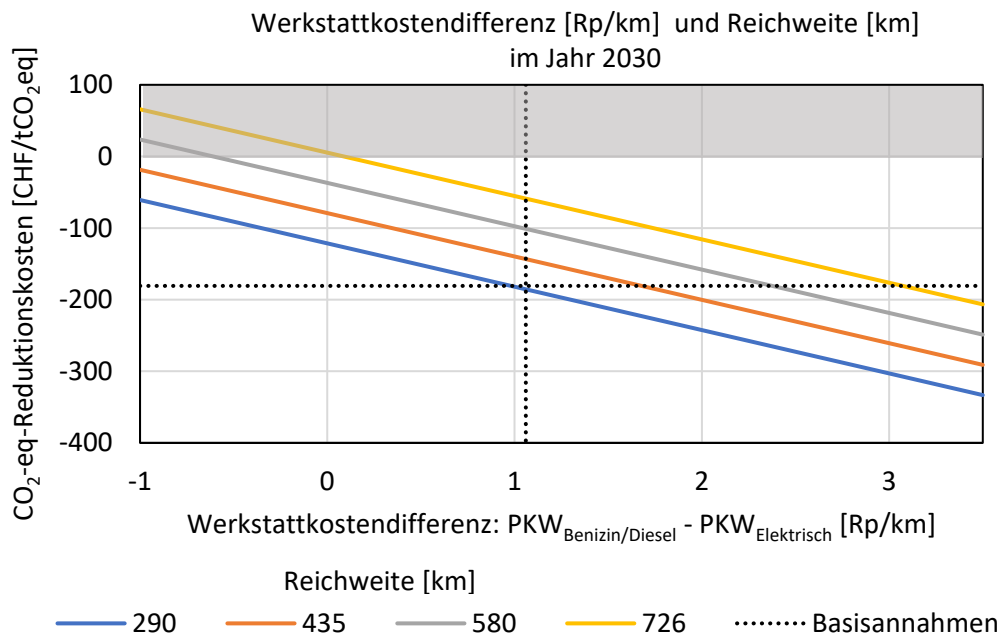


Abbildung 15. Neue PKWs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit der Werkstattkostendifferenz zwischen Benzin/Diesel-PKWs und E-PKWs für 4 verschiedene Batteriekapazitäten (40, 60, 80 und 100 kWh) im Jahr 2030. Mit einem prognostizierten Stromverbrauch von 13.8 kWh/100 km betragen die Reichweiten 290, 435, 580 und 726 km. Die gestrichelten Linien zeigen unsere Basisannahmen: Werkstattkostendifferenz = 1.1 Rp/km, Batteriekapazität = 60 kWh, Reduktionskosten = -181 CHF/tCO₂eq. Die graue Fläche zeigt den Parameterbereich mit positiven CO₂eq-Reduktionskosten.

Die zwei wichtigsten Parameter, welche das CO₂eq-Reduktionspotential der Massnahme beeinflussen, sind der Stromemissionsfaktor und die jährliche Fahrleistung von Neuwagen (Abbildung 16). Gestützt auf Prognosen der Energieperspektiven des Bundes (Prognos, 2013) beinhalten unsere Basisannahmen, dass sich der Stromemissionsfaktor von rund 100 gCO₂eq/kWh im Jahr 2018 auf 50 gCO₂eq/kWh im Jahr 2030 halbieren wird (siehe A. 1. 1). Falls der Emissionsfaktor über die nächsten 12 Jahre jedoch konstant bliebe, wäre das CO₂eq-Reduktionspotential der Massnahme um 0.28 Mio. tCO₂eq reduziert. Dies scheint ein kleiner Unterschied zu sein im Vergleich zum gesamten Reduktionspotential der Massnahme von 5.8 Mio. tCO₂eq. Vergleicht man den Wert aber mit dem Reduktionspotential anderer Massnahmen (Tabelle 2) fällt auf, dass 0.28 Mio. tCO₂eq ein nicht zu vernachlässigendes Einsparpotential ist, welches an anderen Orten nur mit beträchtlichen volkswirtschaftlichen Mehrkosten zu erreichen ist. Ein um den Faktor 5 auf 250 gCO₂eq/kWh erhöhter Stromemissionsfaktor bedeutet vergleichbare CO₂eq-Emissionen pro Kilowattstunde für Strom und Benzin. Da ein E-PKW aber rund 4-mal weniger Energie pro Kilometer verbraucht als ein fossilbetriebener PKW (siehe 4.1.1.4), könnten mit E-PKWs trotzdem noch CO₂eq-Emissionen eingespart werden. Das CO₂eq-Reduktionspotential würde in diesem Fall um 20 % gegenüber den Basisannahmen abnehmen.

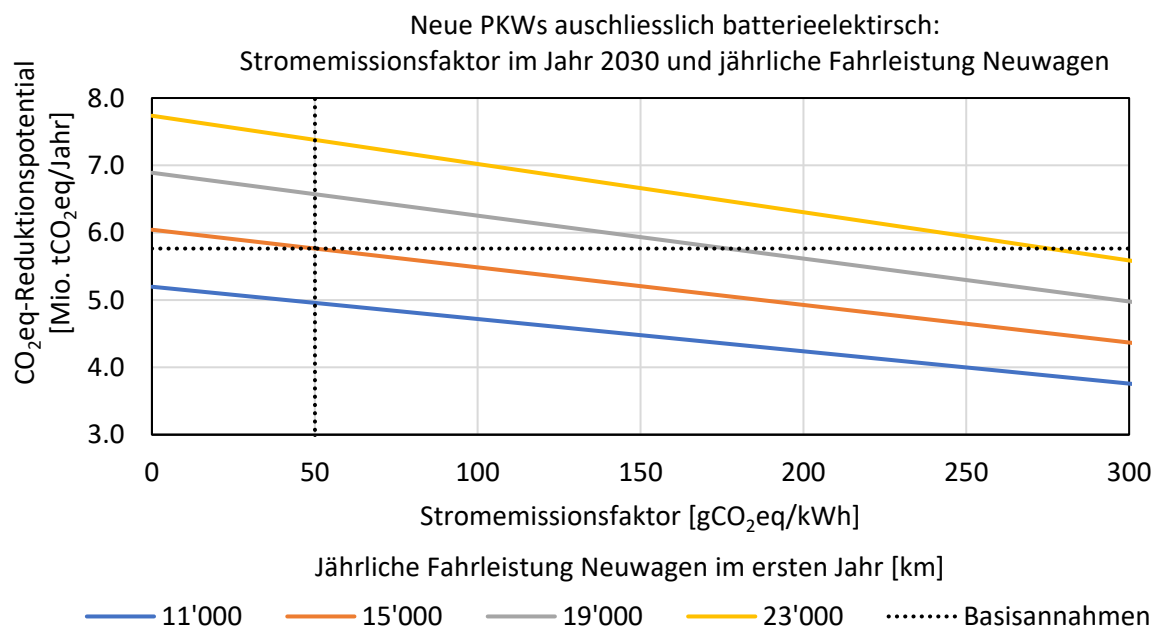


Abbildung 16. Neue PKWs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionspotential in Abhängigkeit des Stromemissionsfaktors im Jahr 2030 und für 4 verschiedene Annahmen zur jährlichen Fahrleistung von Neuwagen (11'000, 15'000, 19'000 und 23'000 km). Die gestrichelten Linien zeigen unsere Basisannahmen: Stromemissionsfaktor = 50 gCO₂eq/kWh, jährliche Fahrleistung = 15'000 km, CO₂eq-Reduktionspotential = 5.8 Mio. tCO₂eq.

Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung von allen Schweizer PKWs kann mit den Angaben des Bundesamts für Statistik berechnet werden und beträgt 11'000 km (BFS, 2019a, 2020e). Die jährliche Fahrleistung von Neuwagen ist aber höher als die durchschnittliche Fahrleistung der gesamten Fahrzeugflotte. Es wird angenommen, dass die jährliche Fahrleistung linear über die Zeit abnimmt und ein Auto im Durchschnitt über seine gesamte Lebensdauer pro Jahr 11'000 km fährt (siehe 4.1.1.1). Wenn eine 53 % höhere Fahrleistung von Neuwagen angenommen wird (23'000 km/Jahr anstatt 15'000 km/Jahr) hat dies eine Erhöhung des CO₂eq-Reduktionspotentials um 28 % zur Folge. Der Zusammenhang ist nicht linear, weil angenommen wird, dass die Massnahme ab dem Jahr 2021 umgesetzt wird und daher sind die ältesten E-PKWs im Jahr 2030 bereits 9 Jahre alt. Nach rund 9 Jahren ist der Durchschnittswert der jährlichen Fahrleistung über die gesamte Lebensdauer von 11'000 km erreicht, unabhängig von der Annahme für die jährliche Fahrleistung von Neuwagen im ersten Jahr.

Der Stromverbrauch zeigt die gleiche Abhängigkeit von der jährlichen Fahrleistung eines Neuwagens wie das Reduktionspotential, da beide Werte linear von der gesamten jährlichen Fahrleistung aller analysierten PKWs abhängen (Anzahl Neuwagen, die im Zeitraum 2021 – 2030 erworben werden). Wird eine jährliche Fahrleistung von 23'000 km/Jahr anstatt 15'000 km/Jahr für Neuwagen angenommen, hat dies ein um 28 % erhöhter Stromverbrauch zur Folge (Abbildung 17). Der Stromverbrauch aller elektrischen Neuwagen beträgt mit unseren Basisannahmen bereits 5.7 TWh/Jahr. Im Referenzszenario beträgt die Bruttostromnachfrage der Schweiz im Jahr 2030 72 TWh (Prognos, 2013). Dies bedeutet eine Erhöhung des Strombedarfs durch E-PKWs um rund 8 % und zeigt, wie wichtig der Ausbau der erneuerbaren Stromproduktions-Kapazitäten ist. Nur wenn Strom vorhanden ist, der nicht mit fossilen Energieträgern produziert wird, kann das gesamte CO₂eq-Reduktionspotential der Massnahme von 5.8 Mio. tCO₂eq entsprechend unseren Basisannahmen, ausgeschöpft werden.

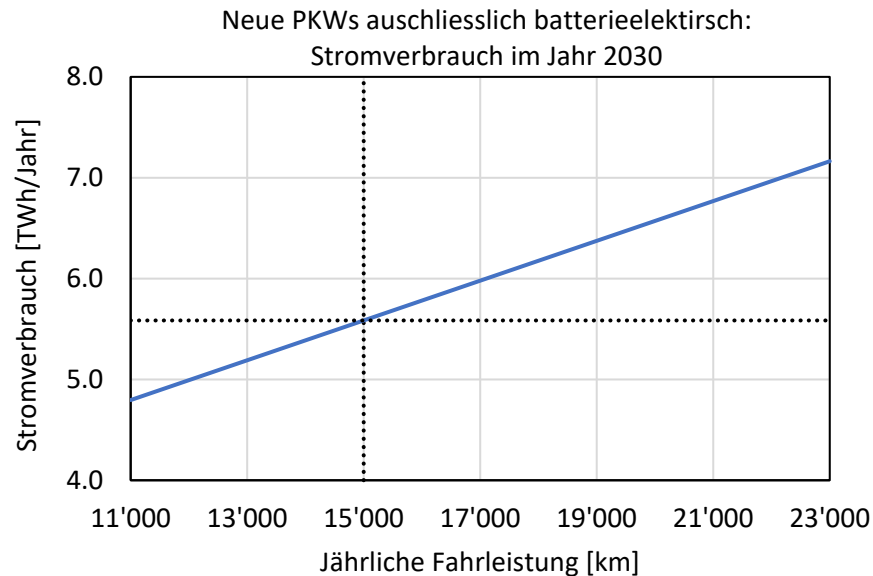


Abbildung 17. Neue PKWs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für Stromverbrauch in Abhängigkeit der jährlichen Fahrleistung von Neuwagen im ersten Jahr. Die gestrichelten Linien zeigen unsere Basisannahmen: Jährliche Fahrleistung = 15'000 km, Stromverbrauch = 5.7 TWh/Jahr.

4.1.2 Neue Leichtnutzfahrzeuge (LNFs) und Schwerlastnutzfahrzeuge (SNFs) ausschliesslich elektrisch

Ein leichtes Nutzfahrzeug (LNF) hat ein Gesamtgewicht von weniger als 3.5 t und ein schweres Nutzfahrzeug (SNF) hat ein Gesamtgewicht von mehr als 3.5 t (BFS, 2019a). Wie bei den PKWs nehmen wir für diese Massnahme an, dass ab dem Jahr 2021 ein Fahrzeug, welches seine Lebensdauer erreicht hat, mit einem batterieelektrischen Fahrzeug ersetzt wird. Mit einem vorzeitigen Ersatz wird nicht gerechnet.

4.1.2.1 Allgemeine Annahmen

Der Bestand an in der Schweiz zugelassenen LNFs nahm in den letzten 10 Jahren durchschnittlich um 3.5 % zu und wuchs von 280'000 im Jahr 2010 auf 390'000 im Jahr 2019 (BFS, 2020c). Der Bestand von SNFs wuchs jährlich nur um 0.6 % und insgesamt von 50'000 (2010) auf 53'000 (2019). Die Ersatzrate von LNFs und SNFs war über die letzten Jahre durchschnittlich mit rund 6 % (BFS, 2020d, 2020c) sehr ähnlich wie die von PKWs, und für die durchschnittliche Lebensdauer von LNFs und SNFs ergeben sich ebenfalls 17 Jahre. Wir nehmen an, dass auch in Zukunft jährlich 6 % des Bestandes von LNF und SNF ersetzt werden und die Wachstumstrends der letzten Jahre für beide Transporttypen bis 2030 fortgesetzt werden. Wenn ab 2021 ausschliesslich batterieelektrische Transportfahrzeuge gekauft werden, beträgt 2030 der Anteil an elektrischen Fahrzeugen am Bestand 77 % für LNF und 64 % für SNF. Ein LNF legte im Jahr 2017 auf Schweizer Strassen durchschnittlich 12'000 und somit nicht viel mehr Kilometer als ein PKW zurück (BFS, 2019e, 2020c). Ein SNF legte hingegen durchschnittlich mit 42'500 km jährlich eine viel grössere Strecke als PKWs und LNFs zurück (BFS, 2019e, 2020c).

4.1.2.2 Annahmen zu Kosten

Alle Annahmen sind in im Anhang in Abschnitt A. 1. 3 zusammengefasst. Hier wird kurz auf die wichtigsten Annahmen eingegangen und Tabelle 8 zeigt einen Vergleich zwischen den jährlichen Kosten von batterieelektrischen und fossil betriebenen Transportern.

- Für den Betrieb aller elektrischen Fahrzeuge wurde mit denselben Stromkosten von 18.4 Rp./kWh gerechnet (siehe A. 1. 2). Es wurde nicht berücksichtigt, dass an gewissen Ladestationen die Stromnetzkosten günstiger sind.

- Die Annahmen für Batteriekosten von LNF und SNF sind dieselben wie für Personenwagen: lineare Abnahme von 173 CHF/kWh im Jahr 2018 auf 61 CHF/kWh im Jahr 2030 (BNEF, 2019).
- Für ein E-LNF nehmen wir auch dieselben Reichweiten im Jahr 2018 und 2030 wie für E-PKWs an. Mit einem Stromverbrauch von 28 kWh / 100 km (2018) und 23.4 kWh / 100 km (2030) sind dafür Batteriegrößen von 60 kWh, beziehungsweise 100 kWh nötig.
- Für ein SNF rechnen wir analog zu PKWs und LNFs mit einer Zunahme der Batteriegrösse in 12 Jahren um 50 % von 240 kWh (2018) auf 360 kWh (2030). Dies ergibt Reichweiten von 280 km, beziehungsweise 500 km.
- Wir nehmen an, dass sich die Herstellungskosten für die elektrischen LNFs (ohne Batterie) und fossilbetriebenen LNFs analog zu denen von PKWs entwickeln. Die Batteriekosten werden in einem zweiten Schritt addiert.
- Die Herstellungskosten für elektrische SNFs ohne Batterie werden äquivalent zu den Herstellungskosten von dieselbetriebenen SNFs angenommen. Die Batteriekosten werden in einem zweiten Schritt addiert.
- Die Unterhaltskosten werden für E-LNFs und E-SNFs analog zu PKWs um 15 % günstiger als für fossil betriebene Fahrzeuge angenommen. Der Einfluss dieser Annahme auf die Reduktionskosten wird in der Sensitivitätsanalyse diskutiert (Abbildung 19).
- Um die Lebensdauer einer Batterie eines Elektrofahrzeuges zu bestimmen, können Hersteller noch nicht auf viele Erfahrungswerte zurückgreifen. Wir nehmen an, dass der Kapazitätsverlust nach 200'000 km mehr als 20 % beträgt und die Batterie gewechselt wird. PKWs und LNFs fahren während ihrer Lebensdauer nicht mehr als 200'000 km und sind daher nicht von einem teuren Batterieersatz betroffen. Ein SNF fährt diese Strecke in knapp 5 Jahren. Wir nehmen daher durchschnittlichen Kosten für den Batterieersatz von 18 Rp/km an basierend auf einer Batteriegrösse von 300 kWh und Batteriekosten von 117 CHF/kWh. Der Einfluss der Annahme für die Batterielebensdauer auf die Reduktionskosten wird in der Sensitivitätsanalyse diskutiert (Abbildung 19).

Tabelle 8. Vergleich von Kosten, Energieverbrauch und CO₂eq-Ausstoss im Jahr 2030 zwischen neuen batterieelektrischen LNFs und SNFs und Diesel betriebenen LNFs und SNFs.

	E-LNF	LNF _{Diesel}	E-LNF – LNF _{Diesel}	E-SNF	SNF _{Diesel}	E-SNF – SNF _{Diesel}
Annuität [CHF/Jahr]	1'621	1'445	175	10'577	9'226	1'351
Unterhaltskosten [CHF/Jahr]	2'550	3'000	-450	11050	13000	-1'950
Energiekosten [CHF/Jahr]	530	915	-385	5'641	11'808	-6'166
Batterieersatz [CHF/Jahr]	-	-	-	7'476	-	7'476
Total [CHF/a]	4'701	5'360	-660	34'744	34'034	711
Energieverbrauch [kWh/100km]	24	77	-53	72	254	-181
CO ₂ eq-Emissionen [gCO ₂ eq/km]	12	204	-192	36	670	-634

4.1.2.3 CO₂eq-Reduktionspotential und -kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Bei konsequenter Umsetzung der Massnahme ab 2021 ergibt sich im Jahr 2030 ein CO₂eq-Reduktionspotential von 2.1 Mio. tCO₂eq. Dies ist das drittgrösste Potential von den in dieser Studie analysierten technischen Massnahmen. Von den total 2.1 Mio. tCO₂eq-Reduktionspotential entfällt etwas mehr als die Hälfte auf LNFs (1.1 Mio. tCO₂eq) und die restlichen 1 Mio. tCO₂eq auf SNFs. Die neuen LNFs und SNFs, welche über den Zeitraum 2021 – 2030 gekauft werden, legen im Jahr 2030 insgesamt 7 Mrd. km zurück. Dies ist 6-mal weniger als die neuen PKWs, welche im selben Zeitraum gekauft werden, im Jahr 2030 zurücklegen. Trotzdem beträgt das Reduktionspotential der elektrischen Transportfahrzeuge mehr als ein Drittel des Potentials von E-PKWs. Dies liegt insbesondere daran, dass der Dieserverbrauch von SNFs mit 26 L / 100 km mehr als 4-mal so hoch ist, wie der Dieserverbrauch eines PKWs (6 L / 100 km). Der Treibstoffverbrauch von LNFs ist um einen Drittel höher im Vergleich zu PKWs.

Die CO₂eq-Reduktionskosten für diese Massnahmen betragen -108 CHF/tCO₂eq. Wenn das ganze Potential ausgeschöpft würde, wären volkswirtschaftliche Einsparungen von 226 Mio. CHF im Jahr 2030 möglich. Wie bei Personenwagen sind auch für Transporter die jährlichen Einsparungen hauptsächlich von den Energiepreisen beeinflusst (Abbildung 18). Falls die Treibstoffpreise bis 2030 nicht um 30 % gegenüber 2018 zunehmen, sondern konstant bleiben, sind mit dem heutigen Strompreis von 18.4 Rp/kWh die Kosten der Massnahme gleich gross wie die Kosten im Referenzfall. Wenn Treibstoffpreise in Zukunft abnehmen, muss auch der Strompreis sinken, damit die Massnahme nicht zu volkswirtschaftlichen Mehrkosten führt. Falls die Treibstoffpreise wie von der IEA (2019) prognostiziert bis 2030 um 30 % steigen und gleichzeitig der Strompreis sinkt, sind grössere Einsparungen möglich. Eine Halbierung des Strompreises auf 9 Rp/kWh hätte eine Verdoppelung der Einsparungen pro Tonne CO₂eq zur Folge.

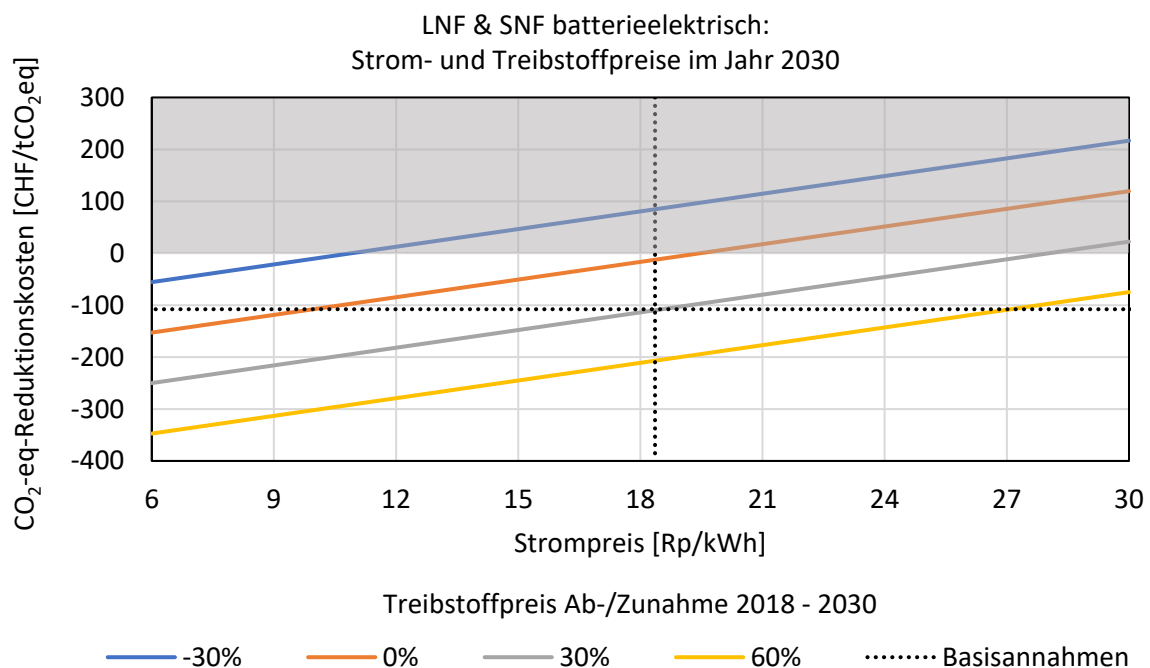


Abbildung 18. Neue LNFs & SNFs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq Reduktionskosten in Abhängigkeit des Strompreises und der Treibstoffpreise im Jahr 2030. Die gestrichelten Linien zeigen unsere Basisannahmen: Strompreis = 18.4 Rp/kWh, 30 % Zunahme Treibstoffpreise zwischen 2018 - 2030 (Benzinpreis = 0.96 CHF/L, Dieselpreis = 1.08 CHF/L), CO₂eq-Reduktionskosten = -108 CHF/tCO₂eq. Die graue Fläche zeigt den Parameterbereich mit positiven CO₂eq-Reduktionskosten.

Wie Tabelle 8 zeigt, führt gemäss unseren Basisannahmen ein neues E-LNF zu Einsparungen gegenüber einem fossilbetriebenen LNF. Ein E-SNF bedeutet jedoch Mehrkosten im Vergleich zu einem Diesel-SNF und dies hauptsächlich wegen dem teuren Batterieersatz. Annahmen über die Werkstattkosten beeinflussen die CO₂eq-Reduktionskosten ebenfalls massgeblich. Abbildung 19 zeigt den Einfluss der Batterielebensdauer eines SNF auf die CO₂eq-Reduktionskosten. Ein SNF fährt im Durchschnitt jährlich 42'500 km. Über die 17 Jahre Lebensdauer ergibt dies insgesamt 720'000 km. Daher ist mit grosser Wahrscheinlichkeit ein Batterieersatz während der Lebensdauer des Fahrzeuges nötig. Wenn die Batterie schon nach 100'000 km ersetzt werden müsste, würde dies zu erheblichen Mehrkosten für ein E-SNF gegenüber einem Diesel-SNF führen. Bei einem Werkstattkostenvorteil von 15 % und einer Batterielebensdauer von 200'000 km führt die gesamte Massnahme nur nicht zu Mehrkosten gegenüber dem Referenzfall, weil E-LNFs die Mehrkosten der E-SNFs durch Einsparungen bei den Energiekosten kompensieren. Falls die Batterie aber ihre Kapazität für 400'000 km aufrecht erhielt, könnten die Werkstattkosten für elektrische Transporter bis zu 5 % höher sein als für fossilbetriebene Transporter, ohne dass die Massnahme Mehrkosten generieren würde.

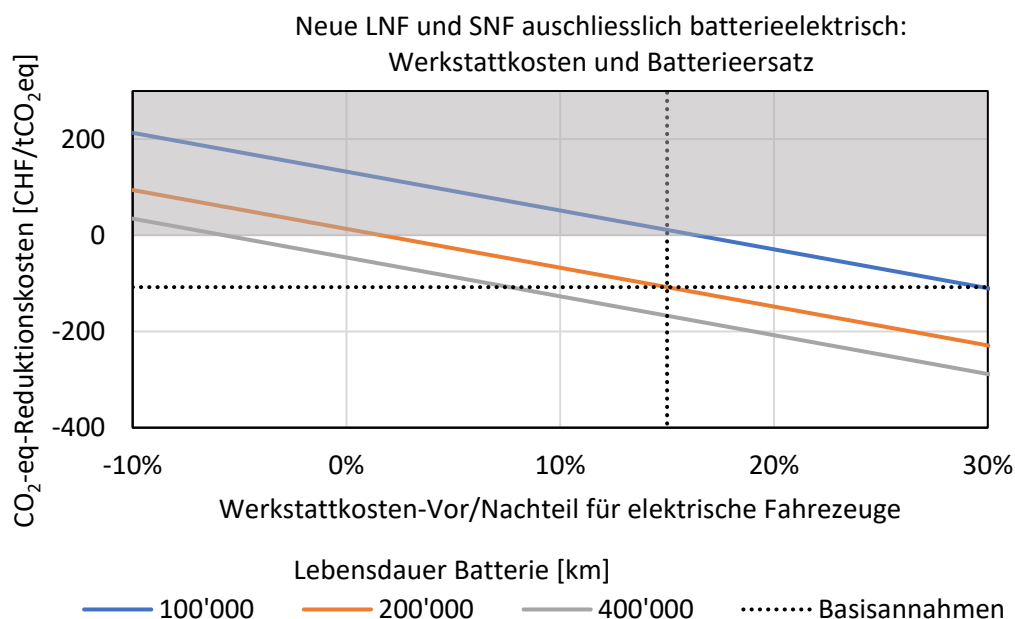


Abbildung 19. Neue LNFs & SNFs batterieelektrisch: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit des Werkstattkosten-Vorteil bzw. Nachteil für E-LNF und E-SNF gegenüber fossil betriebenen Fahrzeugen mit drei verschiedenen Annahmen für die Batterielebensdauer eines E-SNFs (100'000, 200'000, 400'000 km). Die gestrichelten Linien zeigen unsere Basisannahmen: Werkstattkosten-Vorteil = 15 %, Batterielebensdauer = 200'000 km, Reduktionskosten = -108 CHF/tCO₂eq. Graue Fläche zeigt Parameterbereich mit positiven Reduktionskosten.

4.1.3 Inlandflüge durch Zugreisen ersetzen

In der Schweiz wurden im Jahr 2018 158 Mio. Personenkilometer mit dem Flugzeug innerhalb der Landesgrenzen zurückgelegt (BFS, 2020b). Da die typisch geflogenen Strecken in der Schweiz kurz sind (z.B. Genf – Zürich oder Zürich – Basel) und das Zugnetz in der Schweiz gut ausgebaut und getaktet ist, nehmen Zugreisen in der Regel nicht erheblich viel mehr Zeit in Anspruch als Inlandflüge. Deshalb schätzen wir die Nutzenänderung, die bei der Umsetzung dieser Massnahme entstehen könnten, als sehr gering ein und stufen die Massnahme nicht als Suffizienz-Massnahme ein. Für Auslandflüge ist die Situation hingegen anders: Eine Zug- statt Flugreise an dieselbe Destination bedeutet für die meisten Strecken eine erheblich längere Reisedauer und daher wird die Reduktion von internationalen Flugreisen als Suffizienz-Massnahme in Kapitel 5 diskutiert.

4.1.3.1 Annahmen

Für den Referenzfall nehmen wir an, dass die Zahl an im Inland geflogenen Personenkilometer bis ins Jahr 2030 konstant bei 158 Mio. Personenkilometer pro Jahr bleibt. Für die Berechnung des CO₂eq-Reduktionspotential dieser Massnahme nehmen wir an, dass es im Jahr 2030 keine Inlandflüge mehr gibt und die gesamten Personenkilometer statt im Flugzeug mit dem Zug zurückgelegt werden. Es wird zudem angenommen, dass der Umsetzungszeitpunkt das Potential dieser Massnahme im Jahr 2030 nicht beeinflusst, da der Ausbau der Zuginfrastruktur unwesentlich durch die zusätzlichen Personenkilometer beeinflusst wird. Ein Flugkilometer im Inland verursacht in Österreich laut dem Österreichischen Umweltbundesamt 720 gCO₂eq/Pkm¹¹ (VCÖ, 2020). Da die Schweiz eine ähnlich grosse Landfläche wie Österreich hat und davon ausgegangen werden kann, dass die Auslastung von Inlandflügen sowie andere Parameter, welche die Emissionen beeinflussen (z.B. Grösse der Flugzeuge, Kerosinverbrauch) vergleichbar sind, nehmen wir diese Zahl als Grundlage für unsere Berechnungen.

¹¹ Das Österreichische Umweltbundesamt verwendet für die Bilanzierung einen Radiative Forcing Index (RFI-Faktor) von 2.7. Der RFI-Faktor gibt an, um wieviel höher die Erwärmungswirkung durch den Eintrag der Treibhausgase in hoher Flughöhe ist als die reine CO₂eq-Emission.

Ein Personenkilometer im Zug in der Schweiz mit dem Strommix der SBB verursacht gemäss dem Grundlagebericht zum Ökobilanzierungs-Tool «Mobiltool» (Tuchs Schmid & Halder, 2010) 8 gCO₂eq/Pkm. Die Kosten pro Personenkilometer im Zug betragen gemäss Bundesamt für Statistik 44 Rp/Pkm (BFS, 2019d). Für die Personenkilometer im Flugzeug werden vom BFS 13 Rp/km angegeben (BFS, 2019d). Diese Zahl wurde aber mit dem Halbstreckenprinzip¹² berechnet und ist ein Durchschnittswert für alle Flüge (Langstrecken- und Kurzstreckenflüge, die in der Schweiz starten oder landen). Inlandflüge verursachen höhere Personenkilometerkosten, weil sowohl der Start und die Landung in der Schweiz stattfinden und weil die Kilometerkosten generell für kurze Strecken höher sind als für Langstrecken. Zum Beispiel führt der hohe Treibstoffverbrauch beim Start und ein höherer Fixkostenanteil für Infrastruktur zu höheren Kilometerkosten. Daher nehmen wir doppelte Kilometerkosten von 26 Rp/km für Inlandflüge an.

4.1.3.2 CO₂eq-Reduktionspotential und -kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Gemäss unseren Basisannahmen kann mit der Massnahme pro Jahr 0.11 Mio. tCO₂eq eingespart werden mit Kosten von 218 CHF/tCO₂eq. Das CO₂eq-Reduktionspotential beträgt nur 0.8 % des Potentials des gesamten technischen Massnahmenpakets und die Massnahme ist somit auf dem drittletzten Platz in der Rangliste des jährlichen Reduktionspotentials der analysierten Massnahmen.

Sowohl die Kostenannahmen wie auch die Annahmen für die CO₂eq-Reduktion sind mit Unsicherheiten behaftet. Unsere Annahmen für die Kosten der Zugpersonenkilometerkosten basieren zum Beispiel auf Durchschnittswerten für alle Schweizer Zugstrecken. Es könnte sein, dass gut frequentierte Strecken zwischen Zürich, Genf und Basel um einiges billiger als durchschnittliche Zugstrecken sind, weil der Fixkostenanteil für Infrastruktur bei gut ausgelasteten Strecken kleiner ist. Auch die Kosten für die Flugkilometer hängen wie oben bereits diskutiert von vielen Faktoren ab und es ist möglich, dass wir sie unter- oder überschätzen. Daher zeigt Abbildung 20 eine breite Spannweite für die Differenz der Personenkilometerkosten für die beiden Verkehrsmittel.

Zudem werden die CO₂eq-Reduktionskosten und das CO₂eq-Reduktionspotential massgebend von den Annahmen für die CO₂eq-Emissionen eines Flugpersonenkilometers beeinflusst. Wie oben bereits diskutiert, hängt dieser Parameter von der Auslastung und Effizienz des Flugzeugs ab und konnte nicht spezifisch für Inlandflüge in der Schweiz ermittelt werden. Ausserdem konnte die Wissenschaft noch nicht abschliessend klären mit welchem RFI-Faktor die direkten CO₂eq-Emissionen multipliziert werden müssen, um die Klimawirkung von CO₂eq in höheren Luftschichten mit den Emissionen in Bodennähe vergleichen zu können. Falls dieser Faktor vom österreichischen Umweltbundesamt überschätzt wird, könnte der tatsächliche Emissionsfaktor für Flugpersonenkilometer tiefer sein als unsere Basisannahme. Abbildung 20 zeigt die CO₂eq-Reduktionskosten berechnet mit 50 % kleinerem beziehungsweise 50 % grösserem Emissionsfaktor gegenüber unserer Basisannahme von 720 gCO₂eq/Pkm. Da die Emissionen von Zugreisen verschwindend klein sind gegenüber den Flugemissionen (mit unseren Basisannahmen einen Faktor 100 kleiner) sind das Reduktionspotential und somit auch die Reduktionskosten linear abhängig vom Emissionsfaktor für Flugpersonenkilometer. Falls zum Beispiel eine höhere Auslastung den CO₂eq-Ausstoss pro Personenkilometer im Flugzeug halbiert verglichen zu unseren Basisannahmen, hat dies eine Verdoppelung der Reduktionskosten von rund 220 CHF/tCO₂eq auf 440 CHF/tCO₂eq zur Folge.

¹² Das Halbstreckenprinzips wird bei Flügen vom und ins Ausland angewendet. Für die Schweiz fallen nur die Kosten für den Start oder die Landung eines Fluges an.

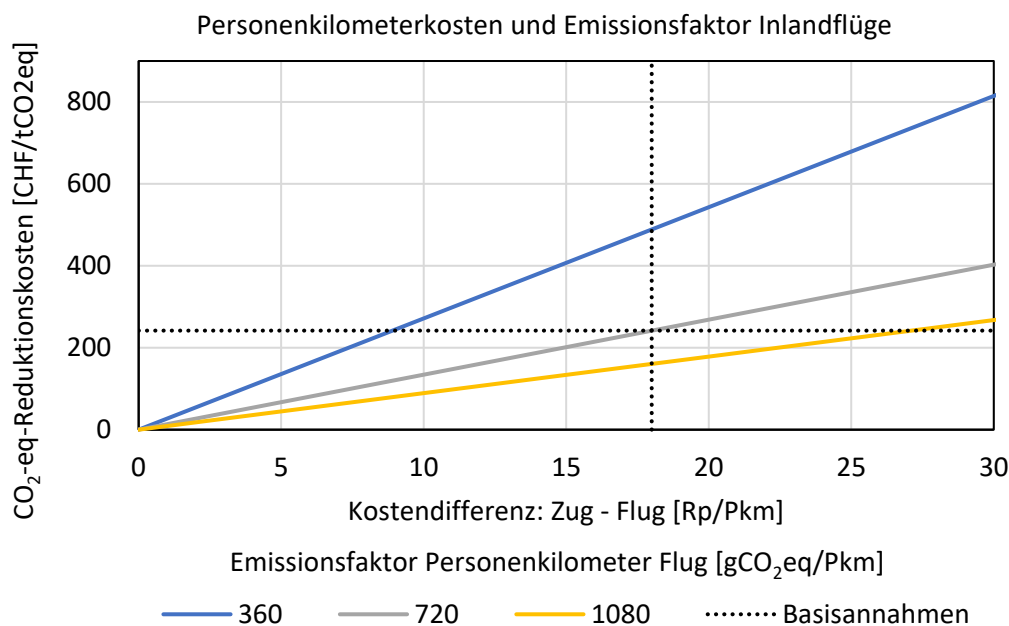


Abbildung 20. Inlandflüge durch Zugreisen ersetzen: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit der Differenz zwischen Zug- und Flugpersonenkilometerkosten und für verschiedene Annahmen für den CO₂eq-Emissionsfaktor der Flugpersonenkilometer: -50 %, und +50 % gegenüber Basisannahmen von 720 gCO₂eq/Pkm.

4.2 Gebäudesektor

Der Gebäudesektor emittierte im Jahr 2018 mit 25 % nach dem Verkehrssektor am zweitmeisten Treibhausgas in der Schweiz. 2018 betragen die CO₂eq-Emissionen aus dem Gebäudesektor 11.2 Mio. tCO₂eq, wovon mit 7.7 Mio. tCO₂eq rund zwei Drittel auf Privathaushalte und mit 3.5 Mio. tCO₂eq ein Drittel auf den Dienstleistungssektor entfielen (BAFU, 2020b). Der Haupttreiber der CO₂eq-Emissionen aus dem Gebäudesektor ist die Bereitstellung von Raumwärme, welche rund zwei Drittel der gesamten Endenergienachfrage und rund 85 % der Wärmenachfrage im Gebäudesektor stellt und mehrheitlich durch die fossilen Brennstoffe Heizöl und Erdgas bereitgestellt wird (Prognos, 2013). Andere CO₂eq-Quellen sind die Warmwasserbereitung, Beleuchtung, Kochherde und andere Haushaltsgeräte und die Haustechnik. Aus diesem Grund zielen die hier analysierten Massnahmen auf die Reduktion der CO₂eq-Emissionen durch die Bereitstellung von Raumwärme ab. Die Warmwasserversorgung wird nicht analysiert, da ihr CO₂eq-Reduktionspotential im Vergleich zur Raumwärme klein ist. Sie macht nur rund 15 % der Wärmenachfrage im Gebäudesektor aus und wird im Vergleich zur Raumwärme mehrheitlich mit nicht fossilen Energieträgern produziert (BFS, 2017a).

Dank politischer Instrumente, welche zu verbesserter Dämmung der Gebäudehüllen und grösserer Verbreitung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Warmwasserbereitstellung führten, konnten die CO₂eq-Emissionen des Gebäudesektors zwischen 1990 und 2018 um rund einen Drittel gesenkt werden (BAFU, 2020b), obwohl die Energiebezugsfläche im gleichen Zeitraum um 40 % stieg (BFE, 2019a). Die Energiebezugsfläche ist die gesamte Fläche eines Gebäudes, welche beheizt oder klimatisiert wird. Die rückläufige Entwicklung der CO₂eq-Emissionen aus dem Gebäudesektor zeigt sich auch im Referenzszenario für 2030. Der Schweizerische Bundesrat prognostiziert, dass die CO₂eq-Emissionen für Privathaushalte und den Dienstleistungssektor von 11.2 Mio. tCO₂eq auf 10.5 Mio. tCO₂eq abnehmen wird (Schweizerischer Bundesrat, 2017).

In vorliegendem Bericht werden 4 Massnahmen im Gebäudesektor analysiert: «Heizungersatz mit erneuerbaren Heizsystemen (Wärmepumpe oder Holzpellet-Heizung)», «Unterstützung fossiler

Heizsysteme mit Solarthermie» und «Gebäudehülle sanieren». Beim Heizungsersatz wird im Massnahmenfall ab 2021 keine neue fossile Heizung mehr eingebaut. Für den Heizungsersatz werden zwei verschiedene Heizsysteme untersucht. Nicht an allen Standorten ist es wirtschaftlich eine Wärmepumpe zu installieren. In den Bergen zum Beispiel ist es im Winter so kalt, dass eine Luftwärmepumpe nicht sehr effizient ist und nicht überall ist es möglich, Grundwasser zu nutzen oder Erdwärmesonden zu installieren. An diesen Standorten wird mit Vorteil auf ein anderes erneuerbares Heizsystem zurückgegriffen. Daher nehmen wir an, dass 90 % der ausgedienten Heizsysteme, welche im Referenzfall mit neuen fossilen Heizungen ersetzt würden, mit Wärmepumpen und die restlichen 10 % mit neuen Pelletheizungen ersetzt werden. Mit einer mittleren Lebensdauer eines Heizsystems von 25 Jahren (WWF Schweiz, 2016) werden pro Jahr 4 % der Heizsysteme ersetzt. Eine detaillierte Übersicht über alle Annahmen und Berechnungsgrundlagen für die 4 Massnahmen im Gebäudesektor inklusive Quellenangaben ist im Anhang in A. 1. 4 zu finden.

4.2.1 Heizungsersatz mit 90 % Wärmepumpen

Bei Umsetzung der Massnahme werden ab 2021 90 % der ausgedienten Heizsysteme, welche im Referenzfall mit neuen fossilen Heizungen ersetzt würden, mit Wärmepumpen ersetzt.

4.2.1.1 Annahmen

Der Anteil Wärmepumpen am Heizungsbestand kann durch diese Massnahme von 18 % im Jahr 2018 auf 47 % im Jahr 2030 erhöht werden. Im Referenzfall wächst zwar der Anteil Wärmepumpen an neuen Heizungen von 20 % (2018) auf 40 % (2030), aber im Jahr 2030 werden immer noch 50 % der neuen Heizungen fossil betrieben und Wärmepumpen werden nur 24 % des Heizungsbestandes ausmachen (TEP Energy & Ecoplan, 2019). Wird die Massnahme ab 2021 umgesetzt, wird verhindert, dass über die 10 Jahre zwischen 2021 - 2030 insgesamt rund 300'000 neue Ölheizungen und 210'000 neue Gasheizungen installiert werden. Bei einem durchschnittlichen jährlichen Wärmebedarf von 23.1 MWh pro Gebäude (BFE, 2019d) würden diese neuen fossilen Heizsysteme im Jahr 2030 3.3 Mio. tCO₂eq emittieren.

Wärmepumpen entziehen einem Umgebungsmedium (Luft, Wasser oder das Erdreich) Wärme und geben diese als Nutzwärme in Gebäuden ab. Als Antriebsenergie wird Strom verbraucht. Eine Wärmepumpe kann mit einer Einheit Antriebsenergie mehrere Einheiten Nutzwärme liefern. Das Verhältnis zwischen über das Jahr abgegebener Nutzenergie und aufgenommener Antriebsenergie wird als Jahresarbeitszahl (JAZ) bezeichnet. Verschiedene Wärmepumpensysteme stellen je nach Wärmequelle Nutzwärme unterschiedlich effizient bereit. Wärmepumpen mit Erdwärmesonden zum Beispiel haben eine höhere Jahresarbeitszahl als Luft/Wasser-Wärmepumpen, was sich positiv auf die Energiekosten auswirkt. Bohrungen im Erdreich führen hingegen zu grösseren Investitionskosten. Basierend auf der Prognose von TEP Energy¹³ (2019) nehmen wir an, dass der Anteil Erdwärmesonden bei neu installierten Wärmepumpen bis 2030 linear auf 25 % steigt und die restlichen 75 % Luft/Wasser-Wärmepumpen sein werden. Sowohl die durchschnittlichen Anschaffungskosten von Wärmepumpen wie auch die Jahresarbeitszahlen wurden in unserer Analyse basierend auf den Anteilen der zwei Wärmepumpensysteme mit dem gewichteten Durchschnitt berechnet. Als Grundlage für eine Prognose über die Entwicklung der Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen stützen wir uns auf eine Studie des Bundesamts für Energie (BFE, 2019e). Wir nehmen an, dass der gewichtete Durchschnitt der JAZ für beide Wärmepumpentypen linear von 3.5 im Jahr 2018 auf 4.3 im Jahr 2030 zunimmt.

¹³ TEP Energy (2019) prognostiziert für das Jahr 2030 die Marktanteile der verschiedenen Wärmepumpensysteme. Der Marktanteil für Wärmepumpen, welche das Grundwasser als Wärmequelle verwenden wird mit 7 % angegeben. In unserer Studie wird dieses System auf Grund seines geringen Marktanteils nicht berücksichtigt.

Die Massnahme «Heizungersatz durch Wärmepumpen» hat bei den Kosten ähnliche Merkmale wie die Massnahmen zur Elektromobilität. Wärmepumpen sind bei der Anschaffung teurer als fossil betriebene Heizsysteme (WWF Schweiz, 2016), die jährlichen Energiekosten sind aber wegen der hohen Effizienz bei der Umwandlung von Umgebungswärme und Strom in Nutzwärme deutlich kleiner und auch beim Unterhalt kann gespart werden. Wie in Tabelle 9 ersichtlich, sind die Kostenvorteile von Wärmepumpen vor allem gegenüber Ölheizungen beträchtlich. Es sei daran erinnert, dass Tabelle 9 die volkswirtschaftlichen Kosten zeigt und Steuern und Subventionen abgezogen wurden. Diese Angaben spiegeln daher nicht die tatsächlich realisierbaren Einsparungen für Hauseigentümer wider, welche in ein neues Heizsystem investieren.

Tabelle 9. Kostendifferenz zwischen einer Wärmepumpe und einem fossilen Heizsystem im Jahr 2030. Investitions- und Unterhaltskosten berechnet basierend auf (WWF Schweiz, 2016) als gewichteter Durchschnitt für 57 % Einfamilienhäuser und 43 % Mehrfamilienhäuser (BFS, 2019c). Alle Angaben ohne MWST, Mineralölsteuer, CO₂-Abgabe, andere Steuern und Subventionen.

	Wärmepumpe - Ölheizung	Wärmepumpe - Gasheizung
Annuität [CHF/ Jahr]	420	670
Unterhaltskosten [CHF/ Jahr]	-730	-210
Energiekosten [CHF/ Jahr]	-970	-740
Total [CHF/ Jahr]	-1290	-280
Energieverbrauch pro Wärmeeinheit [kWh/kWh _{th}]	-0.82	-0.82
Emission pro Wärmeeinheit [gCO ₂ eq/kWh _{th}]	-254	-191

Im Jahr 2018 verbrauchten alle installierten Wärmepumpen in der Schweiz gemäss unseren Annahmen 2.9 TWh Strom. Während der Referenzfall zu einer Erhöhung des Strombedarfs im Jahr 2030 um nur 0.7 TWh führt, beträgt im Massnahmenfall der zusätzliche Strombedarf im Jahr 2030 für den Betrieb von neuen Wärmepumpen 2.1 TWh.

4.2.1.2 CO₂eq-Reduktionspotential und -kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Verglichen mit dem Referenzfall spart die Massnahme «Heizungersatz durch Wärmepumpen» 2.8 Mio. tCO₂eq im Jahr 2030 und hat somit das zweitgrösste CO₂eq-Reduktionspotential der in dieser Studie analysierten technischen Massnahmen. Beim Ersatz von ausgedienten Heizungen mit Wärmepumpen statt fossil betriebenen Heizungen sind mit unseren Basisannahmen im Jahr 2030 Kosteneinsparungen von 136 CHF/tCO₂eq möglich. Diese Einsparungen sind über die gesamte Lebensdauer der Heizung realisierbar, weil die Energie- und Unterhaltskosten für Wärmepumpen geringer sind als für Öl- und Gasheizungen (siehe Tabelle 9). Die konsequente Umsetzung dieser Massnahme ab 2021 ermöglicht verglichen mit dem Referenzfall volkswirtschaftliche Kosteneinsparungen von insgesamt 383 Mio. CHF im Jahr 2030. Wenn die Massnahme später umgesetzt wird, ist der Anteil Wärmepumpen am Heizungsbestand und daher auch die jährlichen Kosteneinsparungen im Jahr 2030 kleiner.

Die geringeren Energiekosten von Wärmepumpen sind mit unseren Basisannahmen für den grössten Teil der Einsparungen verantwortlich. Abbildung 21 zeigt den Einfluss des Heizöl- und Strompreises im Jahr 2030 auf die CO₂eq-Reduktionskosten. Selbst wenn der Preis für Rohöl bis 2030 nicht wie von der IEA (2019) prognostiziert um 30 % zunimmt, ist es sehr unwahrscheinlich, dass die Massnahme zu Mehrkosten gegenüber dem Referenzfall führt. Wenn der Ölpreis gegenüber 2018 um 30 % sinken würde, müsste gleichzeitig der Strompreis um 30 % steigen, damit die CO₂eq-Reduktionskosten positiv wären. Auf der anderen Seite sind grössere Ersparnisse pro Tonne vermiedenes CO₂eq möglich, falls der Strompreis bis 2030 sinkt.

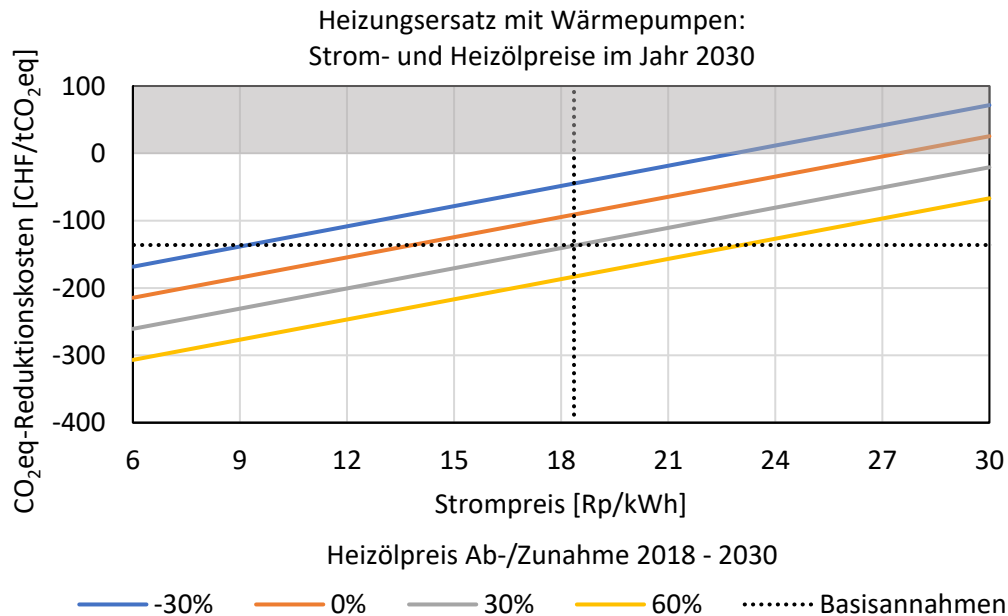


Abbildung 21. Heizungersatz mit Wärmepumpen: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit des Strompreises und des Heizölpreises im Jahr 2030. Die gestrichelten Linien zeigen unsere Basisannahmen: Strompreis = 18.4 Rp/kWh, 30 % Zunahme Heizölpreis zwischen 2018 – 2030 = 62 Rp./L, CO₂eq-Reduktionskosten = -136 CHF/tCO₂eq. Die graue Fläche zeigt den Parameterbereich mit positiven CO₂eq-Reduktionskosten.

Das CO₂eq-Reduktionspotential der Massnahme hängt hauptsächlich vom Stromverbrauch und dem Emissionsfaktor für Strom ab (Abbildung 22). Gemäss den Prognosen, die unseren Basisannahmen zu Grunde liegen, wird sich der Stromemissionsfaktor von rund 100 gCO₂eq/kWh im Jahr 2018 auf 50 gCO₂eq/kWh im Jahr 2030 halbieren (siehe A. 1. 1). Falls dies nicht der Fall wäre und der Emissionsfaktor konstant bliebe, hätte dies keinen grossen Einfluss auf das Reduktionspotential. Falls aber der Anteil an fossil betriebenen Technologien wie Kohle- oder Gaskraftwerke bei der Stromproduktion im In- oder Ausland in Zukunft steigt und dadurch der Stromemissionsfaktor erheblich zunimmt, führt dies zu einem stark verminderten CO₂eq-Reduktionspotential. Zehnmal höhere Emissionen pro Kilowattstunde Strom führen zu einer Verminderung des Potentials um einen Faktor 2. Eine Gasheizung mit einem Jahresnutzungsgrad von 95 % verursacht 210 gCO₂eq pro Kilowattstunde Nutzwärme (BAFU, 2019a). Mit einer JAZ von 4.3 verbraucht eine Wärmepumpe zur Bereitstellung von einer Kilowattstunde Nutzwärme nur 0.23 kWh Strom und produziert daher sogar mit einem Stromemissionsfaktor von 500 gCO₂eq/kWh pro Kilowattstunde Nutzwärme 95 gCO₂eq weniger Emissionen als die Gasheizung. Mit einem Stromemissionsfaktor von 50 gCO₂eq/kWh beträgt die Emissionsdifferenz zwischen Gasheizung und Wärmepumpe pro Wärmeinheit 191 gCO₂eq (siehe Tabelle 9). Die durchschnittliche JAZ der installierten Wärmepumpen beeinflusst das CO₂eq-Reduktionspotential nur erheblich, wenn der Stromemissionsfaktor hoch ist. Der durch die Massnahme verursachten Stromverbrauch ist hingegen erheblich beeinflusst durch die Entwicklung der JAZ über die nächsten Jahre. Wenn die JAZ bis 2030 linear zunimmt und verglichen zu 2018 insgesamt um 60 % steigt, brauchen die zwischen 2021 – 2030 neu installierten Wärmepumpen 20 % weniger Strom, als wenn die JAZ konstant bliebe.

Wegen der langen Lebensdauer von Heizungen kann bis 2030 ein kleinerer Anteil fossil betriebener Technologie ersetzt werden als im Bereich Mobilität. Deswegen ist es für diese Massnahme umso wichtiger, dass sie bald umgesetzt wird. Neue fossile Heizsysteme einzubauen bedeutet, dass diese für die nächsten 25 Jahren hohe CO₂eq-Emissionen verursachen werden. Ein vorzeitiger Ersatz von neuen Heizungen wäre um vieles teurer, als wenn nur Heizungen mit Wärmepumpen ersetzt werden, welche ihre Lebensdauer schon erreicht haben.

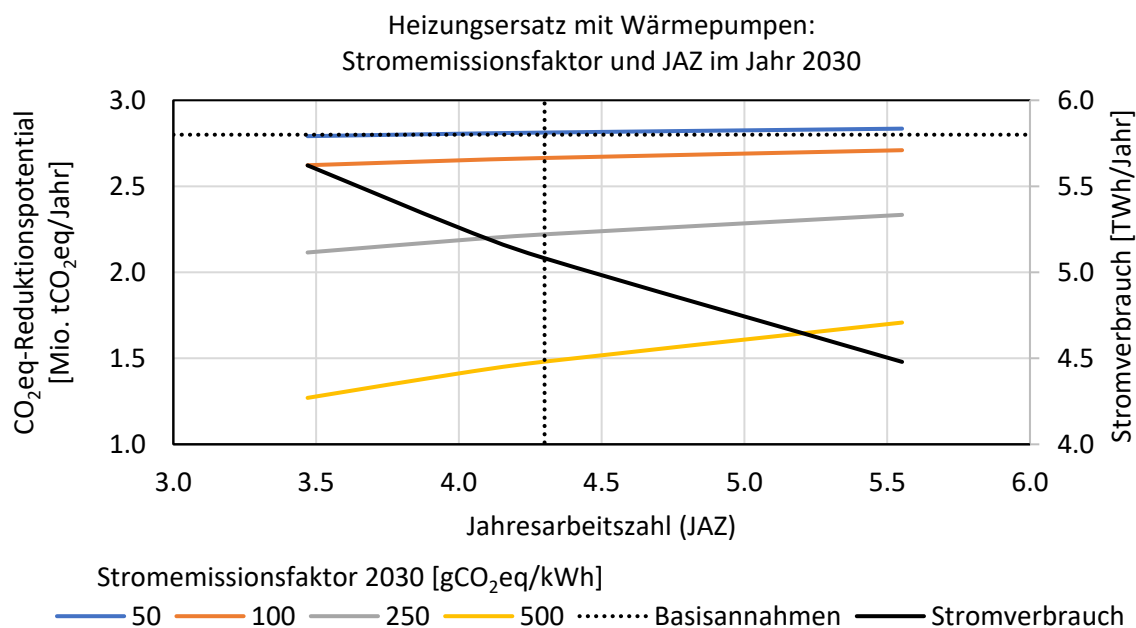


Abbildung 22. Heizungsersatz mit Wärmepumpen: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionspotential und Stromverbrauch im Jahr 2030 in Abhängigkeit der durchschnittlichen JAZ von Wärmepumpen bei linearer Zunahme der JAZ ab dem Jahr 2018. Das CO₂eq-Reduktionspotential ist für vier verschiedene Stromemissionsfaktoren gezeigt. Die gestrichelten Linien zeigen unsere Basisannahmen: Stromemissionsfaktor = 50 gCO₂eq/kWh, JAZ = 4.3, CO₂eq-Reduktionspotential = 2.8 tCO₂eq, Stromverbrauch = 5.1 TWh.

4.2.2 Heizungsersatz mit 10 % Holzpellet-Heizungen

An gewissen Standorten wird mit Vorteil auf ein anderes erneuerbares Heizsystem als eine Wärmepumpe zurückgegriffen (siehe 4.2). Daher wird angenommen, dass 10 % der ausgedienten Heizungen, welche im Referenzfall mit fossilen Heizsystemen ersetzt würden, mit neuen Holzpellet-Heizungen ersetzt werden. Über die Jahre 2021 – 2030 entspricht dies rund 33'000 Öl- und 23'000 Gasheizungen.

4.2.2.1 Annahmen

Holzpellet-Heizungen sind in der Anschaffung etwas günstiger als Wärmepumpen, aber teurer als Öl- und Gasheizungen (siehe A. 1. 4). Unterhaltskosten sind nur billiger im Vergleich zu Öl- aber nicht zu Gasheizungen. Die Kosten für Holzpellets sind teurer als die Gas- und Heizölkosten. Daher führt diese Massnahme nicht zu Kosteneinsparungen (Tabelle 10). Für den Emissionsfaktor von Pellet-Verfeuerung nehmen wir gemäss BAFU 0 gCO₂eq/kWh an (BAFU, 2019a).

Tabelle 10. Kostendifferenz zwischen einer Holzpellet-Heizung und einem fossilen Heizsystem im Jahr 2030. Investitions- und Unterhaltskosten berechnet basierend auf (WWF Schweiz, 2016) als gewichteter Durchschnitt für 57 % Einfamilienhäuser und 43 % Mehrfamilienhäuser (BFS, 2019c). Alle Angaben ohne MWST, Mineralölsteuer, CO₂-Abgabe, andere Steuern und Subventionen.

	Holzpellet - Ölheizung	Holzpellet - Gasheizung
Annuität [CHF/ Jahr]	170	430
Unterhaltskosten [CHF/ Jahr]	-130	360
Energiekosten [CHF/ Jahr]	130	390
Total [CHF/ Jahr]	170	1180

4.2.2.2 CO₂eq-Reduktionspotential und -kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Da wir annehmen, dass nur 10 % der ausgedienten Heizungen, welche im Referenzfall mit fossilen Heizungen ersetzt würden, im Massnahmenfall mit Holzpellet-Heizungen ersetzt werden, hat diese Massnahme mit 0.33 Mio. tCO₂eq im Vergleich zu Wärmepumpen ein eher bescheidenes CO₂eq-

Reduktionspotential. Die CO₂eq-Reduktionskosten betragen 95 CHF/tCO₂eq. Der Heizungsersatz mit Wärmepumpen hat kleinere Reduktionskosten (-136 CHF/tCO₂eq) als der Ersatz mit Holzpellet-Heizungen. Wenn die Preise für fossile Brennstoffe um 60 % zunehmen würden verglichen zu 2018 oder der Holzpellet-Preis um 30 % abnähme, wären die totalen jährlichen Kosten für Holzpellet-Heizungen geringer als für fossile Heizsysteme und die Massnahme hätte negative CO₂eq-Reduktionskosten.

4.2.3 Unterstützung fossiler Heizsysteme mit Solarthermie

Wegen der langen Lebensdauer von Heizungen von 25 Jahren wird trotz konsequentem Heizungsersatz ab 2021 mit Wärmepumpen oder Holzpellet-Heizungen im Jahr 2030 noch ein Anteil von 37 % der Heizsysteme fossil betrieben. Bei der Massnahme «Unterstützung fossiler Heizsysteme mit Solarthermie» werden fossile Heizsysteme, die nach 2005 installiert wurden (und somit mit einer Lebensdauer von 25 Jahren 2030 noch in Betrieb sein werden), mit einer Solarthermieanlage unterstützt. Die Solarthermieanlage liefert 15 % des Wärmebedarfs (WWF Schweiz, 2016).

4.2.3.1 Annahmen

Es wird angenommen, dass jährlich auf 3 % des Gebäudebestands eine Solarthermieanlage installiert wird, aber nur auf Gebäuden, welche ein fossiles Heizungssystem haben. Im Jahr 2030 wäre auf 30 % des Gebäudebestands eine Solarthermieanlage installiert. Da der Bestand an fossilen Heizungen nach Umsetzung der Massnahmen «Heizungsersatz mit Wärmepumpen oder Holzpellet-Heizungen» im Jahr 2030 immer noch 37 % beträgt, wären mit dieser Annahme 81 % der fossilen Heizsystemen mit einer Solarthermieanlage unterstützt.

4.2.3.2 CO₂eq-Reduktionspotential und -kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Die Massnahme hat im Jahr 2030 ein CO₂eq-Reduktionspotential von 0.4 Mio. tCO₂eq mit Kosten von 230 CHF/tCO₂eq. Die Investitionskosten überwiegen die Kosteneinsparungen durch geringeren fossilen Energieverbrauch. Damit sich die Investition lohnt, müssten die Preise für fossile Brennstoffe im Jahr 2030 um einen Faktor 2.2 höher sein als im Jahr 2018. Eine Solarthermieanlage ist aber nicht nur sinnvoll um CO₂eq-Emissionen zu vermindern. Nachdem fossile Heizsysteme ihre Lebensdauer erreicht haben und mit Wärmepumpen oder Holzpellet-Heizungen ersetzt werden, kann die Solarthermieanlage weiterhin Warmwasser erzeugen und die Heizung unterstützen. Damit kann der Strombedarf von Wärmepumpen reduziert werden.

4.2.4 Gebäudehülle sanieren

Für die Massnahme «Gebäudehüllen sanieren» wird angenommen, dass jährlich sowohl im Referenzfall als auch im Massnahmenfall 1.2 % des Gebäudebestands saniert wird (Prognos, 2013). Im Jahr 2018 betrug der durchschnittliche Wärmebedarf pro Gebäude 23.1 MWh/Jahr (BFE, 2019d). Im Massnahmenfall verringert die Sanierung den Wärmebedarf pro Gebäude auf 7.3 MWh/Jahr, was der GEAK-Effizienzklasse A entspricht. Für den Referenzfall nehmen wir an, dass sich der Sanierungsstandard über die Zeit linear verbessert und im Jahr 2050 ebenfalls ein Wärmebedarf von 7.3 MWh/Jahr pro Gebäude erreicht wird. Im Jahr 2030 beträgt somit der Wärmebedarf 17.1 MWh/Jahr pro Gebäude nach einer Sanierung im Referenzfall.

4.2.4.1 Annahmen

Wenn sich der Heizungsbestand wie im Referenzfall für das Jahr 2030 prognostiziert entwickelt, beträgt das jährliche CO₂eq-Reduktionspotential einer Gebäudehüllensanierung 0.60 Mio. tCO₂eq und die CO₂eq-Reduktionskosten 311 CHF/tCO₂eq. Dies sind höhere CO₂eq-Reduktionskosten als für die Massnahmen «Heizungsersatz mit Wärmepumpen oder Holzpellet-Heizungen» und «fossile Heiz-

systeme mit Solarthermie unterstützen» berechnet wurde. Daher wurde das CO₂eq-Reduktionspotential der Gebäudehüllensanierung nicht für die Referenzfälle berechnet, sondern für den Fall, dass die genannten Massnahmen bereits umgesetzt sind. Im Referenzfall, d.h. ohne Umsetzung der Massnahme Heizungsersatz, wird ein Anteil von fossil betriebenen Heizungen von 56 % für das Jahr 2030 prognostiziert. Wenn alle neuen Heizungen ab 2021 Wärmepumpen oder Holzpellet-Heizungen sind, beträgt der Anteil von Öl- und Gasheizungen im Jahr 2030 hingegen «nur» 37 %. Durch die Installation von Solarthermieanlagen bei 81 % der Gebäude mit fossilen Heizsystemen verbrauchen diese 15 % weniger fossile Energie. Insgesamt führen diese Massnahmen zu einer Reduktion der CO₂eq-Emissionen des Gebäudesektors von 3.5 Mio. tCO₂eq. Dies bedeutet, dass die Bereitstellung von Wärme nach Umsetzung der Massnahmen «Heizungsersatz» und «Solarthermie» weniger CO₂eq intensiv ist und Gebäudehülle sanieren weniger CO₂eq-Emissionen spart, als wenn die Wärmebereitstellung hauptsächlich auf fossilen Energieträgern basieren würde. Zu beachten ist hier, dass energetische Gebäudesanierungen neben den tieferen Energiekosten auch deutlichen Komfortgewinn bringen. Dies sind insbesondere auch Lärmschutz, sommerlicher Überhitzungsschutz, weniger Durchzug und bei gleicher Komforttemperatur höhere Luftfeuchtigkeit im Winter. Die finanziellen Einsparungen, welche durch diese Nebennutzen entstehen, werden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Es wird angenommen, dass jährlich sowohl im Referenz- als auch im Massnahmenfall 1.2 % des Gebäudebestands (d. h. 1.2 % der Energiebezugsfläche aller Schweizer Gebäude) energetisch voll saniert werden (Prognos, 2013). Im Massnahmenfall wird der jährliche Wärmebedarf eines durchschnittlichen Gebäudes nach einer Sanierung um 15.8 MWh von 23.1 MWh auf 7.3 MWh reduziert und entspricht danach mit einem Wärmebedarf von 25 kWh/m² der GEAK-Effizienzklasse A. Im Referenzfall bietet die Sanierung eine Reduktion des Wärmebedarfs auf 17.1 MWh/Jahr (siehe A. 1. 4). Dies bedeutet, dass im Massnahmenfall der Wärmebedarf um rund 10 MWh/Jahr mehr reduziert wird als im Referenzfall. Wir schätzen die Investitionskosten im Massnahmenfall auf 90'000 CHF (ergieheld, 2020). Dies ergibt 5'700 CHF/MWh Wärmebedarf-Reduktion. Diese Kosten sind abgeschätzt für die Annahme, dass bei einer Sanierung die Fassade, das Dach, die Kellerdecke und die Fenster besser gedämmt werden. Für die Lebensdauer einer Gebäudehüllensanierung nehmen wir 50 Jahre an. Damit ergeben sich jährliche Investitionskosten pro Wärmebedarf-Reduktion von 129 CHF/MWh (Tabelle 11). Die hohen Investitionskosten überwiegen die Kosteneinsparungen durch geringere Energiekosten nach der Sanierung.

Tabelle 11. Kostendifferenz pro Gebäudehüllensanierung zwischen Massnahmen- und Referenzfall im Jahr 2030 für 10 MWh/Jahr mehr Wärmebedarf-Reduktion.

	Massnahme - Referenz
Annuität [CHF/Jahr]	1'247
Energiekosten [CHF/ Jahr]	-635
Total [CHF/ Jahr]	621

4.2.4.2 CO₂eq-Reduktionspotential und Kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Nach Umsetzung der anderen Massnahmen im Gebäudebereich beträgt das CO₂eq-Reduktionspotential der Gebäudehüllensanierung noch 0.37 Mio. tCO₂eq und die Reduktionskosten betragen 594 CHF/tCO₂eq. Das Reduktionspotential hängt linear von der Sanierungsrate ab. Falls die Sanierungsrate auf 3 % erhöht wird, entspricht dies einer 2.5-mal erhöhten Sanierungsrate gegenüber der Prognose von 1.2 % der Energieperspektive (Prognos, 2013). Mit einer Sanierungsrate von 3 % würde daher das Reduktionspotential der Massnahme ebenfalls um einen Faktor 2.5 von 0.37 Mio. tCO₂eq auf 0.94 Mio. tCO₂eq zunehmen.

Die CO₂eq-Reduktionskosten sind unabhängig von der Sanierungsrate und blieben konstant bei 594 CHF/tCO₂eq. Die CO₂eq-Reduktionskosten hängen hingegen von der Annahme ab, welche Mehr-

kosten bei einer Sanierung anfallen, um den jährlichen Wärmebedarf eines Gebäudes zu reduzieren (Abbildung 23). Unsere Basisannahme beinhaltet Investitionskosten von 5'700 CHF/MWh (ergibt eine Annuität von 129 CHF/MWh*Jahr). Falls wir diese Kosten überschätzen und sie in Realität weniger als die Hälfte betragen (rund 2'800 CHF/MWh), ermöglicht die Massnahme insgesamt Kosteneinsparungen, weil Einsparungen durch geringere Energiekosten die Investitionskosten überwiegen.

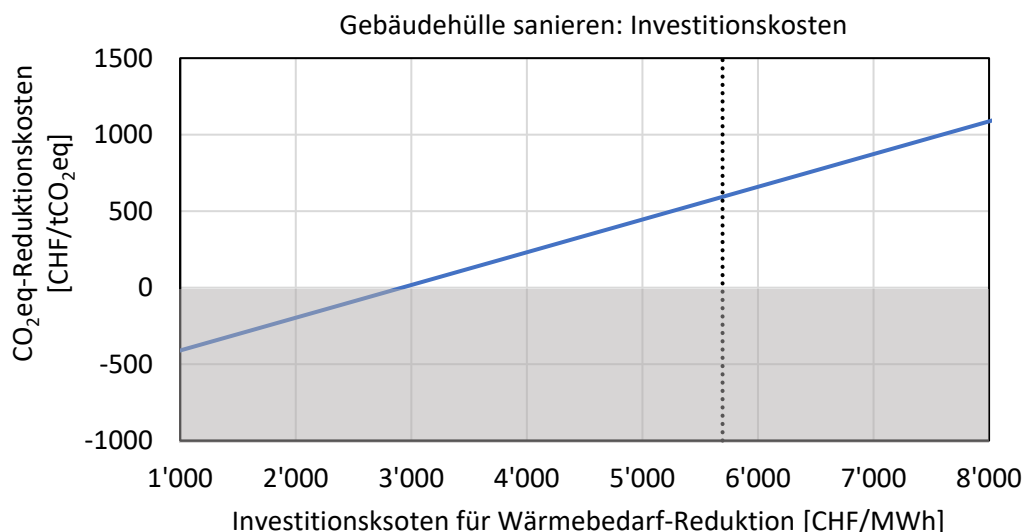


Abbildung 23. Gebäudehüllen sanieren: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit der Mehrkosten, welche für einen geringeren jährlichen Wärmebedarf investiert werden müssen. Die gestrichelte Linie zeigt unsere Basisannahme von 5'700 CHF/MWh mit CO₂eq-Reduktionskosten von 594 CHF/tCO₂eq. Die graue Fläche zeigt den Parameterbereich mit negativen CO₂eq-Reduktionskosten.

Eine Gebäudehüllensanierung hat, wie Solarthermie, nicht nur Potential, um CO₂eq-Emissionen einzusparen, welche von fossilen Heizsystem verursacht werden. Ein reduzierter Wärmebedarf führt auch zu geringerem Strombedarf von Wärmepumpen. Da im Winter grundsätzlich weniger Strom mit Wasserkraft und Photovoltaik produziert werden kann, ist es umso wichtiger den Strombedarf im Winter zu reduzieren, damit weniger teure Stromspeicher gebaut werden müssen. Die hierdurch eingesparten volkswirtschaftlichen Kosten werden in dieser Studie nicht erfasst.

4.3 Industriesektor

Im Jahr 2018 emittierte der Industriesektor 9.6 Mio. tCO₂eq und trug somit 21 % zum CO₂eq-Austoss der Schweiz bei. Zu rund der Hälfte stammten diese Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger und Verbrennung von Abfällen (Kehricht- und Sondermüllverbrennungsanlagen, alternativer Brennstoff in industriellen Feuerungen) für die Bereitstellung von Prozesswärme (BAFU, 2020b). Die andere Hälfte waren prozessspezifische Emissionen, und entstanden zum Beispiel beim Kalzinierungsprozess bei der Herstellung von Zement (BAFU, 2020b), durch Kältemaschinen oder durch Leckagen in SF₆-Isolatoren. Der Industriesektor hatte im Jahr 2018 einen Gesamtenergieverbrauch von 150 PJ (BFE, 2019b). Der grösste Teil (41 %) wurde durch Elektrizität bereit gestellt, Erdgas lieferte 26 %, Heizöl 10 % und Kohle 3 % des Energiebedarfs (BFE, 2019b).

In diesem Bericht wurden die Massnahme «Erdgasersatz durch Biomethan» analysiert, weil sie relativ einfach und zeitnahe umsetzbar ist, wenn bald mit dem Ausbau der Kapazitäten zur Herstellung von Biomethan begonnen wird. Die Massnahme «Kohleersatz in der Zementindustrie» wurde untersucht, weil sie ebenfalls einfach umsetzbar und zudem kostengünstig ist.

4.3.1 Erdgas für Prozesswärme in der Industrie durch Biomethan ersetzen

Biomethan könnte auch im Gebäudesektor fürs Heizen, im Mobilitätssektor für den Antrieb von Autos mit Gasmotoren oder für die Stromproduktion verwendet werden. Aber es ist sinnvoller, Biomethan dort zu verwenden, wo es am aufwändigsten und teuersten wäre, eine andere Option einzusetzen. Für die Stromproduktion und im Mobilitäts- und Gebäudesektor kann hingegen – wie die CO₂eq-Reduktionskostenkurve dieser Studie zeigt (Abbildung 6) – mit anderen Massnahmen kostengünstig CO₂eq-Emissionen eingespart werden. Biomethan für das Heizen und Autofahren zu verwenden, wäre teurer als der Ersatz von fossilen Heizsystemen mit Wärmepumpen und der Ersatz von Benzin/Diesel-PKWs mit E-PKWs.

4.3.1.1 Annahmen

Im Industriesektor wurde 2018 insgesamt 10.9 TWh Methan verbraucht (BFE, 2019b), hauptsächlich für die Bereitstellung von Prozesswärme. Gemäss dem Energieperspektive Szenario POM wird die Nachfrage nach Methan im Industriesektor bis 2030 auf 9.7 TWh sinken (Prognos, 2013). Im Jahr 2018 war 1 % des Methans im Gasnetz Biomethan (BFE, 2019b). In unserer Analyse wird davon ausgegangen, dass das maximale in der Schweiz nachhaltig verfügbare Potential an Biomasse aus der Landwirtschaft und erneuerbaren Abfällen zu Biomethan umgewandelt, ins Erdgasnetz eingespeist und für den Ersatz von Erdgas zur Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie verwendet wird. Eine Studie, die von der Konferenz kantonaler Energiefachstellen (EnFK) in Auftrag gegeben wurde, schätzt das Potential für die Biomethanherstellung aus nachhaltig nachwachsender Biomasse auf 3.7 TWh (E-CUBE Strategy Consultants, 2018). Sobald die Kapazität an Biomethanherstellungsanlagen aufgebaut ist, kann daher jährlich knapp 40 % des im Industriesektor verwendeten Erdgases mit Biomethan ersetzt werden. Die Option zusätzlich Biomethan zu importieren, wird in dieser Studie nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass in den Nachbarländern der Schweiz die Nachfrage nach Biomethan ebenfalls steigen wird und aus dem Ausland importiertes Biomethan keinen CO₂eq-Mehrwert mehr hat, weil sich das Biogas-Produktionsland diesen bereits anrechnet.

Wenn Biomethan aus Biomasse verbrannt wird, entstehen biogene Emissionen. Das bedeutet, es wird nicht mehr CO₂ freigesetzt als die Pflanze oder das Tier während des Wachstums aus der Atmosphäre oder Nahrungsmitteln aufgenommen hat. Bei der Vergärung von Biomasse zu Biomethan entweicht aber ein Teil des produzierten Methans in die Atmosphäre. Diese Emissionen sind nicht biogen und tragen zu einer erhöhten Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre bei. Der in dieser Studie verwendete Emissionsfaktor von 21.9 tCO₂eq/TJ stammt aus einer Ökobilanzstudie des Vergärwerks Zürich-Werdhölzli (Zah & Del Duce, 2015). Der Emissionsfaktor von Erdgas beträgt 56.3 tCO₂eq/TJ (BAFU, 2019a). Dies bedeutet, dass beim Ersatz von Erdgas durch Biomethan 60 % der CO₂eq-Emissionen eingespart werden. Die Herstellungskosten für Biomethan von 15.8 Rp./kWh wurden auf Grund von Angaben von der EnFK-Studie (E-CUBE Strategy Consultants, 2018) und des Bundesamtes für Energie (BFE, 2019c) berechnet (siehe A. 1. 5). Der Erdgaspreis betrug im Jahr 2018 nach Abzug von Steuern 6.1 Rp./kWh (BFS, 2020a). Wir nehmen an, dass der Erdgaspreis gemäss den Prognosen der IEA (2019) bis 2030 um 5 % auf 6.4 Rp./kWh zunimmt. Für diese Massnahme fallen keine Investitionskosten an, beziehungsweise sind die Investitionskosten für neue Biogasanlagen in den Herstellungskosten inklusiv.

4.3.1.2 CO₂eq-Reduktionspotential und -kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Wenn das gesamte nachhaltig in der Schweiz verfügbare Biomasse-Potential ausgeschöpft wird, um Biomethan für die Bereitstellung von Prozesswärme zu verwenden, ergibt dies gemäss unseren Basisannahmen ein CO₂eq-Reduktionspotential von 0.44 Mio. tCO₂eq pro Jahr mit Reduktionskosten von 726 CHF/tCO₂eq. Somit ist diese Massnahme die teuerste von den in diesem Bericht analysierten Massnahmen (Tabelle 2).

Wie oben erwähnt, werden die Kosten der Massnahme nur von zwei Parametern bestimmt: Biomethan-Herstellungskosten und Erdgaspreis. Die CO₂eq-Reduktionskosten sind linear abhängig von der Differenz dieser beiden Preise. So lange die Herstellung von Biomethan teurer als Erdgas ist, entstehen durch die Massnahme volkswirtschaftliche Mehrkosten. Die Herstellungskosten für die Produktion von Biomethan in der Schweiz wurden in unseren Basisannahmen als konstant angenommen. Es könnte sein, dass der Bau von vielen Biogasanlagen in der Schweiz und Europa zu Skalen- und Lerneffekten führen wird und daher auch die Kosten von Biogas-Anlagen in Zukunft sinken werden. Falls sich die Herstellungskosten für Biomethan (inklusive Kosten für die Einspeisung von Biomethan ins Gasnetz) bis 2030 halbieren würden (von 15.8 Rp/kWh auf 7.9 Rp/kWh), wäre Biomethan nur noch 1.5 Rp/kWh teurer als Erdgas. Die Differenz zwischen Erdgas- und Biomethanpreis wäre somit 6.5-mal kleiner und die tCO₂eq-Reduktionskosten würden um denselben Faktor auf 115 CHF/tCO₂eq sinken. Die heutigen Herstellungskosten beruhen aber auf Biomasse-Potential, welches einfach zugänglich ist. Wenn in Zukunft das gesamte Biomasse-Potential zur Biomethanproduktion ausgenutzt wird, könnte dies eventuell auch zu höheren Substratkosten und somit höheren Herstellungskosten führen.

Das CO₂eq-Reduktionspotential hängt davon ab, wieviel Treibhausgase bei der Herstellung von Biomethan entstehen. Wie bereits oben erwähnt, entstehen bei der Verbrennung von Biomethan nur biogene CO₂eq-Emissionen. Das Bundesamt für Umwelt nimmt daher einen Emissionsfaktor von 0 tCO₂eq/TJ für Biomethan an und befreit Anlagenbetreiber, die Biomethan statt Erdgas verwenden, von der CO₂-Abgabe (BAFU, 2020c). Wenn wir in unserer Studie einen Emissionsfaktor von 0 tCO₂eq/TJ anstelle von 21.9 tCO₂eq/TJ annehmen würden, ergäbe dies ein CO₂eq-Einsparpotential von 0.73 Mio. tCO₂eq und die CO₂eq-Reduktionskosten wären mit 444 CHF/tCO₂eq um 40 % kleiner. Da aber bei der Herstellung von Biomethan ein Teil des Methans in die Atmosphäre entweicht und Methan eine stärkere Klimawirkung als CO₂ hat, berechnen Ökobilanzstudien (Stolz, & Frischknecht, 2017; Zah & Del Duce, 2015) einen Emissionsfaktor der nicht gleich null ist. Um konservativ zu rechnen, beziehen wir uns in unseren Basisannahmen auf eine Ökobilanz (Zah & Del Duce, 2015).

Trotz der hohen Reduktionskosten im Vergleich zu anderen Massnahmen gilt der Ersatz von Erdgas mit Biomethan als eine der vielversprechendsten Optionen um die Emissionen zu reduzieren, die bei der Bereitstellung von Prozesswärme entstehen. Alternativ könnten zum Beispiel synthetische Brennstoffe eingesetzt werden. Dies würde aber bis 2030 mit grosser Wahrscheinlichkeit wegen den hohen Herstellungskosten für synthetische Gase (Hunke, 2018) zu noch höheren Kosten führen als der Ersatz durch Biomethan.

4.3.2 Kohle in der Zementindustrie durch alternative Brennstoffe ersetzen

Um die hohen Temperaturen zu erreichen, welche bei der Herstellung von Zement nötig sind, wird in Zementwerken Kohle verbrannt. Bereits heute wird nicht die ganze Wärme durch die Verbrennung von Kohle generiert. Ein Teil der Wärme entsteht durch die Verbrennung von Ersatzbrennstoffen. Diese Ersatzbrennstoffe sind Abfälle wie Altöl, Klärschlamm, Tiermehl/Tierfett, organische Lösungsmittel, Kunststoffabfälle, Altreifen oder Holzabfälle (BAFU, 2019b). Zementwerke müssen nichts für die Abfälle bezahlen, sondern sie erhalten sogar eine Vergütung, die um die 100 CHF/Tonne beträgt (Bütler, 2019).

4.3.2.1 Annahmen

Der Anteil an Ersatzbrennstoffen liegt heute bei 65 % (CemSuisse, persönliche Kommunikation, Mai 2020). Wir nehmen an, dass der Anteil im Referenzfall bis 2030 auf 70 % und im Massnahmenfall auf 100 % zunehmen wird. Da in Zukunft mehr Ersatzbrennstoffe nachgefragt werden, nehmen wir zudem an, dass die Vergütung für die Verbrennung von Abfällen abnehmen wird und im Jahr 2030 die Vergütung nur noch ausreicht, um Logistik, Zwischenlagerung und Aufbereitung der Abfälle zu entschädigen.

Die Massnahme generiert trotzdem auch im Jahr 2030 keine direkten Kosten, sondern nur Einsparungen, weil die Kosten für Kohle entfallen. Allfällige Investitionskosten für Rauchgasanlagen für die Reinigung der verschmutzten Abluft, welche bei der Verbrennung von Abfällen entsteht, werden in unserer Analyse nicht berücksichtigt. Die Menge an Zement, welche in der Schweiz hergestellt wird, sowie die dafür benötigte Brennstoffmenge werden über die Zeit als konstant angenommen.

4.3.2.2 *CO₂eq-Reduktionspotential und -kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse*

Die Massnahme hat im Jahr 2030 ein CO₂eq-Reduktionspotential von 0.1 Mio. tCO₂eq mit Reduktionskosten von -56 CHF/tCO₂eq. Diese Einsparungen gegenüber dem Referenzfall entstehen mit der Annahme, dass der Kohlepreis bis 2030 um 30 % steigt. Der Kohlepreis hat aber keinen grossen Einfluss auf die Einsparungen. Falls er um 30 % sinkt, betragen die Einsparungen immer noch 49 CHF/tCO₂eq. Die Vergütung für die Verbrennung von Abfällen hat einen grösseren Einfluss auf die Einsparungen. Wenn diese auch im Jahr 2030 noch 100 CHF/Tonne beträgt und der Kohlepreis gegenüber 2018 um 30 % steigt, spart die Massnahme 161 CHF/tCO₂eq.

4.4 Land- und Forstwirtschaftssektor

Die Treibhausgasemissionen aus dem Land- und Forstwirtschaftssektor betragen im Jahr 2018 6.6 Mio. tCO₂eq und somit 15 % zu den totalen Treibhausgasemissionen der Schweiz bei (BAFU, 2020b). Aus der Landwirtschaft stammt der grösste Anteil der Treibhausgase Methan und Lachgas, welche eine grössere Klimawirkung als CO₂ haben. Das globale Erwärmungspotential von Methan ist 25-mal und jenes von Lachgas 289-mal grösser als das Erwärmungspotential von CO₂ bei einem Betrachtungshorizont von 100 Jahren (BAFU, 2015). Methan entsteht vor allem bei der Rindviehhaltung, welche für rund die Hälfte der Emissionen aus der Landwirtschaft verantwortlich ist (BAFU, 2020d, 2020d). Lachgas entsteht bei der Hofdüngerbewirtschaftung und hauptsächlich auf landwirtschaftlichen Nutzflächen durch biologische Abbauprozesse (BAFU, 2020d). Wälder können CO₂-Quellen oder -Senken sein. Mit zunehmendem Alter des Waldes nimmt die Senkfunktion ab, da absterbende Bäume CO₂ freisetzen (BAFU, 2006). Die Nutzung von Holz für Gebäude, Möbel und andere Gegenstände ist eine längerfristige CO₂-Senke. Holz anstelle von fossilen Brennstoffen zu verwenden, bedeutet CO₂-Emissionen zu reduzieren, da nur so viel CO₂ frei gesetzt wird, wie die Bäume während ihres Wachstums aufgenommen haben (BAFU, 2006).

In dieser Studie haben wir uns im Bereich Land- und Forstwirtschaft auf eine Massnahme mit gut erforschtem Potential und Kosten fokussiert. Dies ist die Massnahme «Wiedervernässung von Hochmooren». Die CO₂eq-Emissionen, welche in drainierten Hochmooren entstehen und in die Atmosphäre entweichen sind momentan nicht in der Schweizer CO₂-Statistik enthalten (BAFU, 2018a) und Massnahmen, welche diese Emissionen verhindern, können gemäss der CO₂-Verordnung vom 30. November 2012 momentan nicht angerechnet werden, um die Schweizer Klimaziele zu erreichen (Paul & Schellenberger, 2015). Die Begründung für diesen Beschluss war die mangelnde Datenlage, um die Klimawirkung einer Wiedervernässungs-Massnahme sicher zu stellen (Paul & Schellenberger, 2015). Inzwischen gibt es aber einen Standard auf dessen Grundlage eine Emissionsreduktion für die freiwillige Kompensation über Myclimate oder über die South Pole Group möglich ist (Gubler, 2017a), und es wird davon ausgegangen, dass in Zukunft Wiedervernässungs-Massnahmen auch bei den nationalen Klimazielen angerechnet werden können.

4.4.1 Wiedervernässung von Hochmooren

Wenn Böden wassergesättigt sind, können Moore entstehen. In diesen Böden werden abgestorbene Pflanzenreste oft nur unvollständig zersetzt und es entsteht Torf. Je nach Nährstoffgehalt und Vegetationstyp wird das Moor als Flach- oder Hochmoor bezeichnet. Ein Hochmoor entsteht an nassen Standorten mit genügend Niederschlägen und gemässigten Temperaturen und weist ein besonders hohes

Torfwachstum auf (Klaus, 2007). Torf kann als Brennstoff verwendet werden und daher wurden ab dem 18. Jahrhundert viele Hochmoore abgetorft. Zudem wurden viele Hochmoore mittels Entwässerungsgräben trockengelegt, um sie für die Landwirtschaft nutzbar zu machen.

Erst seit Annahme der Rothenthurm-Initiative 1987 («Eidgenössische Volksinitiative zum Schutz der Moore») ist der Schutz von Hochmooren in der Bundesverfassung verankert. Hochmoore dürfen nicht mehr für Landwirtschaft oder Torfabbau genutzt werden. Der Moorschutz wurde den Kantonen übertragen, welche bei jeder sich bietenden Gelegenheit Regenerationsmassnahmen ergreifen sollten. Trotzdem ist heute ein grosser Teil der Hochmoorflächen in schlechtem Zustand (Klaus, 2007). In einem intakten Hochmoor hemmt der hohe Wasserstand die Zersetzung des organischen Materials, so dass von einer permanenten Speicherung von Kohlenstoff gesprochen werden kann (Gubler, o. J.). Zudem nehmen die Pflanzen von intakten Hochmooren bei ihrem Wachstum CO_2 aus der Atmosphäre auf und binden es im Hochmoor. Die Funktion von Torfböden als Kohlenstoffspeicher und -senke kehrt sich aber in ihr Gegenteil um, sobald ein Moor entwässert wird. Dann dringt Sauerstoff in den Torfboden ein, das organische Material beginnt sich zu zersetzen und der Kohlenstoff entweicht in Form von CO_2 in die Atmosphäre (Gubler, o. J.). Diese CO_2eq -Emission kann nur gestoppt werden, indem die Torfböden wiedervernässt werden. Die 545 national geschützten Hochmoore haben eine Gesamtfläche von rund 15 km^2 . Rund zwei Drittel dieser Fläche sind entwässert und bedürfen dringend einer Wiedervernässung (Gubler, 2017a).

4.4.1.1 Annahmen

Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) definierte 2017 den Standard max.moor (Gubler, 2017b), welcher sich auf Erkenntnisse von fundierten Studien über Schweizer Hochmoore stützt und auf konservativen Annahmen beruht. Mit Hilfe dieser Annahmen kann berechnet werden, dass die Schweizer Hochmoore jährlich ca. $19'500 \text{ tCO}_2\text{eq}$ emittieren. Diese Emissionen summieren sich über die Jahre zu einem beträchtlichen Wert. Mit der Anwendung des Standards max.moor wird angenommen, dass die durchschnittliche Torfschichtdicke eines Hochmoores 50 cm beträgt und über die nächsten 50 Jahre das gesamte organische Material dieser Schicht abgebaut wird. Daher entweichen ohne Wiedervernässung in diesem Zeitraum rund $1 \text{ Mio. tCO}_2\text{eq}$ in die Atmosphäre. Wiedervernässungs-Massnahmen, die in den nächsten Jahren durchgeführt werden, verhindern diese Emissionen. Die Senkfunktion eines Hochmoors, also erneutes Wachstum der Torfschicht und somit permanente zusätzliche Speicherung von Kohlenstoff im Boden, ist für wiedervernässte Moore schwierig zu quantifizieren und wurde daher im Standard max.moor und in unserer Analyse nicht berücksichtigt.

4.4.1.2 CO_2eq -Reduktionspotential und -kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Wenn ab dem Jahr 2021 jährlich 10% der drainierten Hochmoorfläche wiedervernässt werden, ist im Jahr 2030 die gesamte drainierte Hochmoorfläche wiedervernässt und es können jährlich mindestens $19'500 \text{ tCO}_2\text{eq}$ eingespart werden. Die Massnahme hat das kleinste CO_2eq -Reduktionspotential von den in dieser Studie untersuchten Massnahmen (Tabelle 2). Wie oben bereits erwähnt, sind die Annahmen im Standard max.moor sehr konservativ und berücksichtigen keine Senkfunktion für CO_2 aus der Atmosphäre. Es ist daher nicht auszuschliessen, dass wir das Potential der Massnahme erheblich unterschätzen.

Eine Hochmoor-Wiedervernässung generiert im Jahr 2030 Reduktionskosten von $118 \text{ CHF/tCO}_2\text{eq}$. Die Reduktionskosten nehmen zu, je später die Massnahme umgesetzt wird, weil das totale CO_2eq -Reduktionspotential abnimmt, je mehr organisches Material bereits abgebaut wurde. Die Reduktionskosten wurden basierend auf einer durch die WSL durchgeführte Kostenanalyse (Gubler, 2016) berechnet. In der Kostenanalyse wurden die Kosten von 35 Wiedervernässungs-Projekten analysiert und das Ergebnis zeigte, dass für verschiedene Standorte sehr unterschiedliche Kosten anfielen (Gubler, 2016). Die

wichtigsten Faktoren, welche die Kosten beeinflussen, sind Topografie und Hydrologie, Zugänglichkeit, Grösse der wiederzuvernässenden Fläche und Planungsarbeit. Bei guter Koordination zwischen Kantonen und anderen Akteuren könnten Planungskosten in Zukunft abnehmen, weil über die Jahre mehr Erfahrung gesammelt wird. Auf der anderen Seite ist davon auszugehen, dass die einfach zu regenerierenden Hochmoore bald alle wiedervernässt sind und daher die Kosten für die Planung in Zukunft steigen werden.

4.5 Stromproduktion

Die Stromproduktion in der Schweiz basierte 2018 hauptsächlich auf Wasserkraft und Kernkraftwerken. Der Anteil an der Bruttolandeserzeugung lag für Wasserkraft bei 52 % für Kernkraftwerke bei 34 % und erneuerbare Anlagen sowie thermische Kraft- und Fernheizkraftwerke lieferten jeweils 4 % (BFS, 2020f). Direkte CO₂eq-Emissionen entstehen nur bei der Stromproduktion durch thermische Kraft- und Fernheizkraftwerke. Im Jahr 2014 betrug der Stromemissionsfaktor der Schweizer Stromproduktion 19.8 gCO₂eq/kWh (Messmer & Frischknecht, 2016). Es wird angenommen, dass dieser Wert bis 2018 konstant blieb. Da 29 % des Lieferstroms importiert wurden und Importstrom ein Emissionsfaktor von 284 gCO₂eq/kWh aufwies, betrug der Emissionsfaktor für den Schweizer Strommix 97 gCO₂eq/kWh im Jahr 2018 (siehe A. 1. 1). Für 2030 nehmen wir an, dass der Stromemissionsfaktor im Referenzfall auf 50 gCO₂eq/kWh abnehmen wird, weil der Anteil an Importstrom und der Emissionsfaktor für Importstrom abnehmen wird. Im Referenzfall wird nicht von einer erheblich erhöhten Stromnachfrage gegenüber 2018 ausgegangen (Prognos, 2013). Wenn das in diesem Bericht untersuchte technische Massnahmenpaket umgesetzt wird, führt dies durch verstärkten Einsatz von Elektromobilität und Wärmepumpen zu einem zusätzlichen Strombedarf von 9.4 TWh gegenüber dem Referenzfall. Bei der Modellierung dieser Massnahmen wurde der CO₂eq-Emissionsfaktor des Referenzfalls benutzt. Wenn der zusätzliche Strombedarf aus Stromquellen bezogen werden kann, die keine CO₂eq-Emissionen erzeugen, entsteht ein zusätzliches CO₂eq-Reduktionspotential. Dieses zusätzliche Potential wird in dieser Studie den Massnahmen «Ausbau der Photovoltaik» und «Ausbau der Windenergie» angerechnet.

Als Optionen für eine CO₂eq-arme Stromproduktion wurde der Ausbau von Photovoltaik und Windenergie untersucht. Andere erneuerbare Stromproduktionstechnologien wie Stromerzeugung aus Biomasse, Ausbau der Wasserkraft oder Geothermie wurden nicht berücksichtigt. Die Strom-Gestehungskosten betragen im Jahr 2018 in der Schweiz durchschnittlich 7.4 Rp/kWh (ElCom, 2019). Für den Referenzfall wird angenommen, dass dieser bis 2030 konstant bleibt.

4.5.1 Ausbau der Photovoltaik

Die Massnahme sieht einen massiven Ausbau der Photovoltaik-Produktionskapazitäten vor, wie im Anhang in Abschnitt A. 1. 6 in Abbildung A. 2a) gezeigt. Im Massnahmenfall wird ein Ausbau der Stromproduktion aus Photovoltaik auf 24.9 TWh/a im Jahr 2030 angenommen. Dies entspricht dem Ausbau bis 2030, welcher von Fachexperten vorgeschlagen wird (Rohrer, 2020). Es wird eine exponentielle Zunahme angenommen. Der Referenzfall basiert auf den Energieperspektiven und sieht ebenfalls ein exponentielles Wachstum vor, welches 2030 eine Produktionsmenge von rund 4 TWh/a erreicht.

4.5.1.1 Annahmen

Die Investitionskosten für eine Solaranlage in der Schweiz wurden in einer Studie von Rohrer (2020) für das Jahr 2019 analysiert. Gemäss dieser Studie betragen sie für eine Anlage auf einem Schweizer

Dach durchschnittlicher Grösse 1789 CHF/kWp¹⁴ (Rohrer, 2020). Verschiedene Studien prognostizieren für die nächsten Jahre sinkende Investitionskosten für Photovoltaikanlagen und es kann mit einer jährlichen Kostenreduktion um 3 % gerechnet werden (Rohrer, 2020). Wir berücksichtigen diese jährliche Kostenreduktion in unseren Annahmen sowohl für Investitionskosten als auch für die Unterhaltskosten und nehmen an, dass letztere von heute 0.03 CHF/kWh (Swissolar, 2020) auf 0.021 CHF/kWh sinken werden. Mit diesen Annahmen betragen die Gestehungskosten von Photovoltaikstrom 8.3 Rp/kWh im Jahr 2021 und sind somit teurer als der Referenzstrom mit Gestehungskosten von 7.4 Rp/kWh. Durch die jährliche Kostenreduktion wird Photovoltaikstrom aber ab dem Jahr 2026 billiger als der Referenzstrom sein und im Jahr 2030 werden die Gestehungskosten gemäss unseren Annahmen noch 6.8 Rp/kWh betragen.

4.5.1.2 CO₂eq-Reduktionspotential und Kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Wird die Massnahme umgesetzt, können im Jahr 2030 durch die zusätzlich erstellten Photovoltaik-Produktionskapazitäten gegenüber dem Referenzfall 1 Mio. tCO₂eq pro Jahr eingespart werden mit Kosteneinsparungen von 39 CHF/tCO₂eq. Grund für die Kosteneinsparung ist, dass die Gestehungskosten für Strom aus neu zugebauten Photovoltaikanlagen ab dem Jahr 2026 kleiner sein werden als für den Referenzstrom.

Abbildung 24 zeigt die CO₂eq-Reduktionskosten der Massnahme für veränderte Annahmen zu den Gestehungskosten und dem Emissionsfaktor des Referenzstroms.

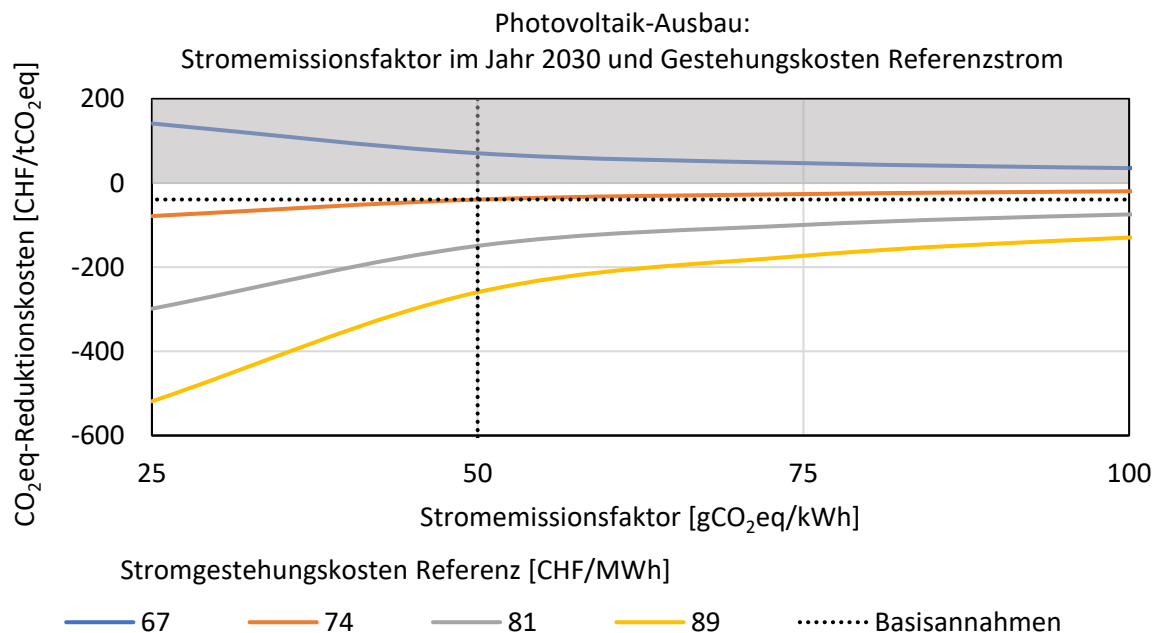


Abbildung 24. Ausbau der Photovoltaik: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit des Emissionsfaktors und für 4 verschiedene Annahmen für die Gestehungskosten des Referenzstroms im Jahr 2030 (67, 74, 81, 89 CHF/MWh). Die gestrichelten Linien zeigen unsere Basisannahmen: Stromemissionsfaktor = 50 gCO₂eq/kWh, Referenzstrom Gestehungskosten = 74 CHF/MWh, CO₂eq-Reduktionskosten = -39 CHF/tCO₂eq.

Sinken die Gestehungskosten des Referenzstroms um 10 % auf 67 CHF/MWh, sind die durchschnittlichen Gestehungskosten der im Jahr 2030 installierten Photovoltaikanlagen nicht mehr billiger und die Massnahme führt zu Mehrkosten. Ein kleinerer Emissionsfaktor hat ein kleineres Reduktionspotential zur Folge.

¹⁴ Die durchschnittlichen Kosten wurden mit dem gewichteten Durchschnitt für das Schweizer Dachflächenpotential berechnet.

Anhand von Abbildung 24 wird nochmals der Effekt einer Änderung des Reduktionspotentials auf die Kosten/Einsparungen pro Tonne CO₂eq ersichtlich, welcher bereits in Abschnitt 3.3.5 bei Abbildung 12 diskutiert wurde: Nimmt das Potential ab, werden die Reduktionskosten/Einsparungen pro Tonne CO₂eq grösser. Dies hat vor allem bei sehr kleinem Potential und grösseren Kostendifferenzen zwischen Massnahme und Referenzfall extreme Auswirkungen auf die CO₂eq-Reduktionskosten. Bei einem Emissionsfaktor für den Referenzstrom von 25 gCO₂eq/kWh führt eine Erhöhung der Gestehungskosten des Referenzstroms um 10 % zu einer Steigerung der Kosteneinsparungen um 220 CHF/tCO₂eq.

4.5.2 Ausbau der Windenergie

Das Potential für den Ausbau der Windenergie wird in den Energieperspektiven für das Jahr 2050 mit 4.3 TWh angegeben (Prognos, 2013). Wenn der Ausbau mit linearer Zubau-Rate erfolgt, beträgt im Jahr 2030 das Potential der Windenergie 1.7 TWh (siehe Abbildung A. 2). Dieses Potential nehmen wir für den Massnahmenfall an. Im Referenzfall beträgt die Windproduktionskapazität 0.25 TWh. Diese Kapazität ergibt sich durch eine lineare Extrapolation der historischen Wind-Produktionswerte der Jahre 2010 bis 2019.

4.5.2.1 Annahmen

Die Annahmen für die Kosten sind folgende: Die Investitionskosten betragen 2200 CHF/kW im Jahr 2018 und nehmen linear ab auf 2030 CHF/kW im Jahr 2030 (VSE, 2020). Die jährlichen Unterhaltskosten betragen 3 % der Investitionskosten (Suisse-Eole, o. J.-a). Im Jahr 2030 ergeben sich Unterhaltskosten von 3.8 Rp./kWh. Die Gestehungskosten betragen mit diesen Annahmen 9.6 Rp./kWh beziehungsweise 9.3 Rp./kWh für die Jahre 2018 und 2030.

4.5.2.2 CO₂eq-Reduktionspotential und Kosten mit Basisannahmen und Sensitivitätsanalyse

Das CO₂eq-Reduktionspotential des Windausbaus ist mit 60'000 tCO₂eq das zweitkleinste aller in dieser Studie untersuchten Massnahmen. Wenn der Emissionsfaktor des Referenzstroms grösser wäre, würde sich ein höheres Reduktionspotential ergeben (siehe Abbildung 12 in Abschnitt 3.3.5). Die CO₂eq-Reduktionskosten betragen 386 CHF/tCO₂eq. Die Windenergie ist im Vergleich zu den meisten anderen Massnahmen teurer.

Die Gestehungskosten für Wind sind wegen den hohen Unterhaltskosten im Vergleich zu Photovoltaik höher als Photovoltaikstrom und der Referenzstrom. Abbildung 25 zeigt den Einfluss der Unterhaltskosten auf die CO₂eq-Reduktionskosten. Wenn die Unterhaltskosten nur 1.5 % der Investitionskosten ausmachen würden, wären die Gestehungskosten für Windenergie gleich gross wie die des Referenzstroms (7.4 Rp./kWh) und die Massnahme würde keine Mehrkosten im Vergleich zum Referenzfall generieren. Bei einer Abnahme der Gestehungskosten des Referenzstroms um 10 %, wäre die Nullgrenze bei einem Anteil von 1 % für Unterhaltskosten an Investitionskosten erreicht. Bei einer Zunahme der Gestehungskosten des Referenzstroms um 20 % wäre auch mit einem Anteil von 2 % für Unterhaltskosten nicht mit Mehrkosten für Windenergie zu rechnen.

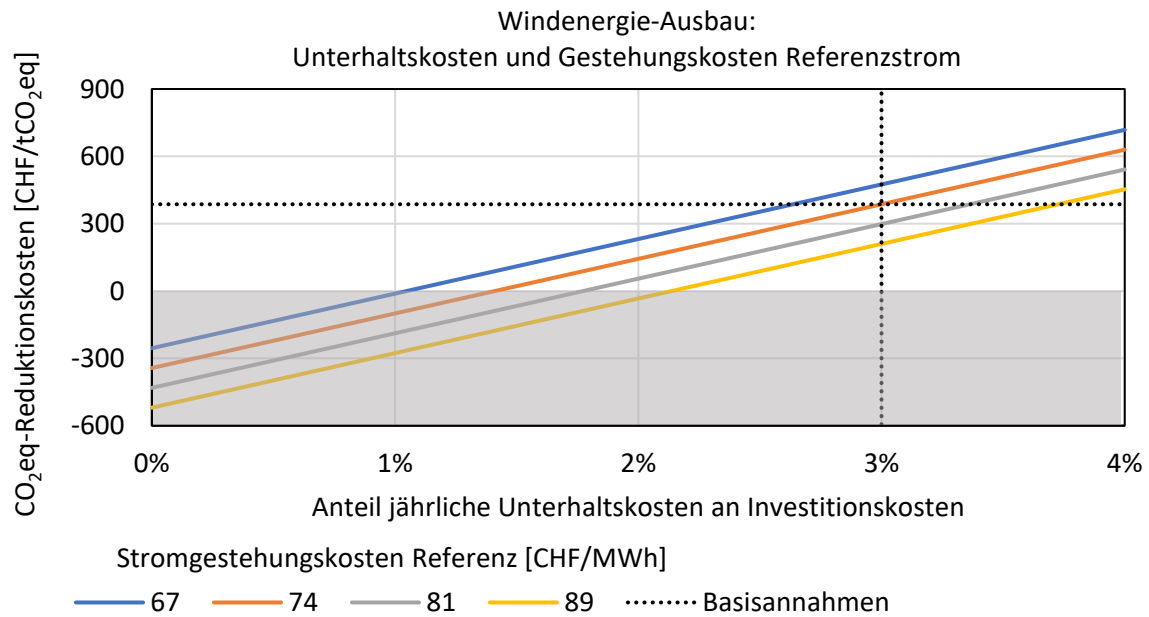


Abbildung 25. Ausbau der Windenergie: Sensitivitätsanalyse für CO₂eq-Reduktionskosten in Abhängigkeit der Unterhaltskosten für 4 verschiedene Annahmen für die Gestehungskosten des Referenzstroms im Jahr 2030 (67, 74, 81, 89 CHF/MWh). Die gestrichelten Linien zeigen unsere Basisannahmen: Jährliche Unterhaltskosten = 3 % der Investitionskosten, Referenzstrom Gestehungskosten = 74 CHF/MWh, CO₂eq-Reduktionskosten = 386 CHF/tCO₂eq.

5 Suffizienz-Massnahmen

5.1 Einleitung

Das Ziel von Suffizienz-Massnahmen ist grundsätzlich dasselbe wie bei technischen Massnahmen: Eine Reduktion der umweltschädigenden Auswirkungen von menschlichem Handeln durch weniger Ressourcen- und Energieverbrauch und Schadstoffemissionen. Technische Lösungen bieten meistens eine fast identische Alternative zu einem bereits bestehenden Angebot und decken dieselben Konsumbedürfnisse ab wie heute verwendete Technologien. Sie haben somit für die Anwender denselben Nutzen. Zum Beispiel kann mit einer Wärmepumpe auf die gleiche Raumtemperatur wie mit einem fossilen Heizsystem geheizt werden. Im Unterschied zu den technischen Massnahmen ergibt sich bei Suffizienz-Massnahmen eine Änderung des Nutzens (Fischer & Griebhammer, 2013). Ein Beispiel für eine Suffizienz-Massnahme ist die Reduktion der täglich zurück gelegten Reisedistanz mit dem Auto. Dies könnte durch verschiedene Strategien erreicht werden wie beispielsweise eine Reduktion des Arbeitswegs durch einen Umzug nahe zum Arbeitsort oder Wechsel der Arbeitsstelle, Homeoffice oder Fahrgemeinschaften. Eine kürzere Pendlerdistanz zum Arbeitsort mit dem Auto bedeutet Zeiterparnis, dafür könnte es sein, dass die neue Arbeitsstelle oder der neue Wohnort weniger attraktiv ist. Oder eine Fahrgemeinschaft zum Arbeitsort bringt eventuell einigen Personen als Zusatznutzen soziale Kontakte, dafür könnte der Verlust an Flexibilität als Nutzenminderung betrachtet werden.

Im vorliegenden Bericht wurde das CO₂eq-Reduktionspotential von sechs Suffizienz-Massnahmen in den Sektoren Gebäude, Mobilität und Landwirtschaft (Ernährung) untersucht. Im Gebäudesektor wurde die Wirkung einer kleineren beheizten Wohnfläche pro Person und tiefere Raumtemperaturen im Winter untersucht. Im Mobilitätssektor wurde eine Reduktion der jährlich gefahrenen Kilometer mit PKWs und der internationalen Flugreisen analysiert. Im Bereich Ernährung wurde quantifiziert, was die Klimaschutzwirkung einer Reduktion von Lebensmittelverlusten und die Umstellung von einer fleischhaltigen Ernährung auf eine vegetarische oder vegane Ernährung ist.

McKinsey berücksichtigte für die CO₂eq-Reduktionskostenkurve keine Massnahmen, welche eine Änderung des Nutzens beinhalten. Die Reduktionskostenkurve der vorliegenden Studie (Abbildung 6) wurde mit derselben Methodik erstellt und beinhaltet ebenfalls nur technische Massnahmen, welche dieselben Konsumbedürfnisse abdecken wie heute verwendete Technologien. Für technische Massnahmen ist es besonders interessant, aufzuzeigen, dass die volkswirtschaftlichen Lebenszykluskosten von erneuerbaren Technologien in vielen Fällen kleiner sind als diejenigen von fossil betriebenen Technologien, obwohl zum Teil höhere Investitionskosten anfallen. Die CO₂eq-Reduktionskostenkurve vergleicht die Kosteneffizienz verschiedener Massnahmen und zeigt auf, welche Massnahmen trotz hohen Investitionskosten mit Priorität gefördert werden sollten.

Um Suffizienz-Massnahmen umzusetzen, sind in den meisten Fällen keine Investitionskosten nötig und sie führen oft direkt zu Kosteneinsparungen. Die in dieser Studie untersuchten Massnahmen im Gebäude- und Mobilitätssektor und die Verhinderung von Lebensmittelverlusten sind Beispiele für Massnahmen, welche die Ausgaben für Privatpersonen und Unternehmen direkt reduzieren könnten, ohne dass dafür nennenswerte Investitionskosten anfielen. Um für diese Massnahmen auch die Kosteneffizienz pro reduzierte Tonne CO₂eq-Emissionen aufzuzeigen, müsste aber aus der ökonomischen Perspektive die Änderung des Nutzens monetär bewertet werden und dafür wären komplexe Modelle nötig. Daher wurde darauf verzichtet, die Kosteneinsparungen zu quantifizieren. Stattdessen liegt der Fokus in diesem Kapitel darauf, das CO₂eq-Reduktionspotential der verschiedenen Suffizienz-Massnahmen aufzuzeigen.

5.2 CO₂eq-Emissionen: Schweiz und Ausland

Werden nur die CO₂eq-Emission berücksichtigt, die innerhalb der Schweizer Grenzen anfallen, ergibt dies für das Jahr 2018 einen Ausstoss von 46.6 Mio. tCO₂eq oder 5.5 tCO₂eq/Kopf (siehe Unterkapitel 1.4). Wenn CO₂eq-Emission, die im Ausland durch Konsum von Schweizern verursacht werden und internationale Flugreisen berücksichtigt werden, ist der CO₂eq-Ausstoss um einen Faktor 2.6 höher. Im Jahr 2015 betrug er 116.2 Mio. tCO₂eq und rund 14 tCO₂eq/Kopf (BAFU, 2018b; BFS, 2018a).

Im Referenzszenario (Unterkapitel 2.3) sinkt der Ausstoss bezogen auf die Schweizer Grenze durch technologische Verbesserungen bis 2030 auf 41.8 Mio. tCO₂eq. Bei Umsetzung der technischen Massnahmen, die in dieser Studie analysiert wurden (Kapitel 3 – 4), kann der Ausstoss um weitere 13.6 Mio. tCO₂eq reduziert werden (Abbildung 26). Dieser Beitrag ist sehr wichtig, aber trotzdem relativ klein im Vergleich zum gesamten Ausstoss inklusive Emissionen, die im Ausland anfallen. Abbildung 26 zeigt das Reduktionspotential durch technische Massnahmen im Vergleich zu den totalen CO₂eq-Emissionen im Jahr 2018 inklusive Emissionen, die durch den Konsum ausländischer Güter und internationale Flugreisen entstanden sind. Wenn die Emissionen, welche Schweizer im Ausland verursachen, bis 2030 konstant blieben, kann das Reduktionspotential der technischen Massnahmen nur einen relativ kleinen Beitrag (16 %) dazu leisten, die totalen Emissionen zu reduzieren. Aus diesem Grund gehen wir in diesem Kapitel nicht nur auf Suffizienz-Massnahmen ein, welche Emissionen auf Schweizer Boden vermindern, sondern diskutieren auch internationale Flugreisen und Emissionen von Nahrungsmitteln aus dem Ausland.

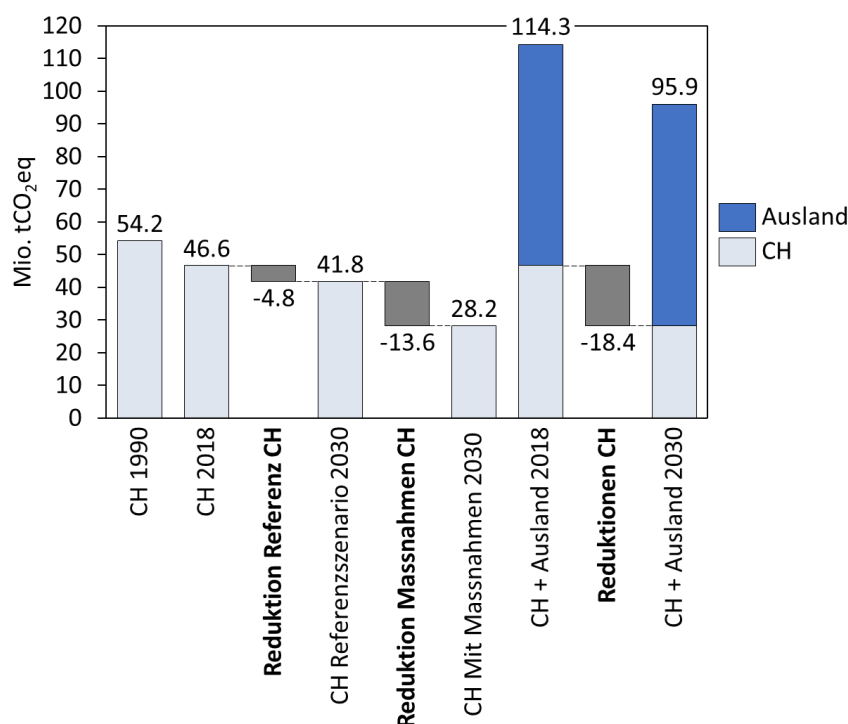


Abbildung 26. CO₂eq-Emissionen innerhalb der Schweizer Landesgrenzen im Jahr 1990, 2018 und 2030 im Vergleich zu den Reduktionspotentialen im Referenzszenario und durch zusätzliche technische Massnahmen. Zudem ist auch der totale durch Schweizer verursachte CO₂eq-Ausstoss inklusiv Konsum ausländischer Güter und internationale Flugreisen gezeigt.

5.3 Übersicht über Suffizienz-Massnahmen

Eine Übersicht über die analysierten Suffizienz-Massnahmen im Bereich Mobilität, Gebäude und Ernährung ist in Tabelle 12 gegeben. Bei dieser Analyse ziehen wir – wie oben erwähnt – die Systemgrenze nicht mehr an der Schweizer Grenze. Tabelle 12 gibt Auskunft darüber, ob die CO₂eq-

Reduktion der Massnahmen dem Schweizer Treibhausgasbudget, dem Ausland oder keinem Land angerechnet wird. Das CO₂eq-Reduktionspotential der Suffizienz-Massnahmen im Gebäude- und Mobilitätssektor werden wie für die technischen Massnahmen jeweils für das Jahr 2030 berechnet.

Tabelle 12. Übersicht über die untersuchten Suffizienz-Massnahmen.

#	Sektor	Massnahme	Wo die Emissionen anfallen
SM1	Mobilität	Reduktion der jährlichen Fahrleistung von Schweizer PKWs auf Schweizer Strassen	Schweiz
SM2	Mobilität	Reduktion von internationalen Flugreisen	CO ₂ eq-Emissionen von Flugreisen, bei denen mehrere Länder involviert sind, werden heutzutage keinem Land angerechnet sondern lediglich als Zusatzzeile nach dem Absatzprinzip im Treibhausgasinventar aufgelistet. Im Schweizer Emissionstotal sind nur Inlandflüge enthalten (BAFU, o. J.).
SG1	Gebäude	Tiefere Temperaturen in Innenräumen im Winter	Schweiz
SG2	Gebäude	Geringere Wohnfläche	Schweiz
SE1	Ernährung	Lebensmittelverluste verhindern	Schweiz / Ausland
SE2	Ernährung	Vegetarische oder vegane statt fleischhaltige Ernährung	Schweiz / Ausland

5.4 Suffizienz im Gebäudesektor

Bei den technischen Massnahmen (Unterkapitel 4.2) wurde das CO₂eq-Reduktionspotential des Raumwärmebedarfs des gesamten Gebäudebestands (Wohngebäude, Geschäfts- und Dienstleistungsgebäude) untersucht. Hier beschränken wir uns auf die Wohngebäude, welche 70 % des Gebäudebestandes ausmachen. Das CO₂eq-Reduktionspotential der Suffizienz-Massnahmen im Gebäudesektor ist davon abhängig, ob die technischen Massnahmen aus Tabelle 1 «Ersatz fossiler Heizsysteme», «Solarthermie» und «Gebäudehülle sanieren» umgesetzt werden. Deswegen wird das CO₂eq-Reduktionspotential der Suffizienz-Massnahmen jeweils ohne und mit Umsetzung der technischen Massnahmen berechnet und diskutiert.

5.4.1 Kleinere Wohnfläche pro Person

5.4.1.1 Annahmen

Die durchschnittliche Wohnfläche pro Person betrug im Jahr 2018 in der Schweiz 46 m² (BFS, 2018b). Beim Flächenbedarf pro Person gibt es erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Wohnformen und Alter der Personen. Familien und Wohngemeinschaften mit mehr als 3 erwachsenen Personen benötigen pro Person weniger Fläche als der Durchschnitt (31 m² und 36 m²). Einzelpersonenhaushalte in allen Altersklassen verfügen im Durchschnitt über 80 m² pro Person. Personen über 65 Jahre leben im Durchschnitt auf 70 m². Nur 16 % der Bevölkerung leben in Einzelhaushalten, aber diese machen mehr als ein Drittel (36 %) aller Haushalte der Schweiz aus (BFS, 2018b). Würden Einzelpersonenhaushalte ihren Flächenbedarf um ein Viertel auf 60 m² oder um die Hälfte auf 40 m² reduzieren, würde dies zu einer Abnahme der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person um 10 % respektive 30 % führen. Es wird angenommen, dass die verbrauchte Heizenergie direkt proportional zur Wohnfläche ist und daher eine Abnahme der bewohnten und beheizten Fläche pro Person um 10 % auch zu einem um 10 % verminderten Raumwärmebedarf führt.

Durch die Reduktion der Wohnfläche pro Person werden weniger Neubauten nötig und durch eine verminderte Bautätigkeit könnten grosse Mengen an «grauen Emissionen», welche bei der Herstellung

der Baumaterialien anfallen, eingespart werden. Dieser Effekt wird in der nachfolgenden Analyse nicht berücksichtigt. Zudem wird vernachlässigt, dass eine Reduktion der bewohnten Wohnfläche kurzfristig zu mehr leerstehenden Wohnungen führen würde. Leerer Wohnraum muss ebenfalls beheizt werden, um Schäden zu verhindern, aber der Wärmebedarf für leerstehende Wohnungen ist geringer als für bewohnter Wohnraum.

Der durchschnittliche jährliche Raumwärmebedarf privater Haushalte beträgt im Jahr 2030 gemäss unseren Annahmen pro Gebäude 22.4 MWh/Jahr im Referenzfall und 21.2 MWh/Jahr im Falle, dass Sanierungen auf den Standard der GEAK-Effizienzklasse A durchgeführt werden (mit der Annahme, dass ab 2021 jährlich 1.2 % des Gebäudebestandes saniert wird, siehe 4.2.4.1). Gebäudesanierungen, der Ersatz von ausgedienten fossilen Heizsystemen mit Wärmepumpen oder Holzpellet-Heizungen und die Installation von Solarthermie zur Unterstützung noch vorhandener fossiler Heizsysteme reduziert den Emissionsfaktor für die Bereitstellung von Raumwärme des durchschnittlichen Schweizer Heizsystems im Jahr 2030 von 161 gCO₂eq/kWh auf 101 gCO₂eq/kWh.

5.4.1.2 CO₂eq-Reduktionspotential

Abbildung 27a zeigt die CO₂eq-Emissionen, welche Schweizer Wohngebäude im Jahr 2030 durch die Bereitstellung von Raumwärme verursachen in Abhängigkeit der beheizten Wohnfläche pro Person. Im Referenzszenario, also ohne Umsetzung der technischen Massnahmen, welche im ersten Teil der Studie analysiert wurden, betragen die jährlichen Emissionen 6.3 Mio. tCO₂eq bei einem Wohnflächenbedarf pro Person von 46 m². Die Umsetzung der technischen Massnahmen reduziert diese Emissionen auf jährlich 3.8 Mio. tCO₂eq. Eine Reduktion der beheizten Wohnfläche um 30 % auf 32 m² pro Person ergibt ein CO₂eq-Reduktionspotential von 1.9 Mio. tCO₂eq im Referenzszenario und 1.1 Mio. tCO₂eq für den Fall, dass die technischen Massnahmen umgesetzt wurden (Abbildung 27b). Nimmt die Wohnfläche nur um 10 % ab, ergibt dies entsprechend kleinere CO₂eq-Reduktionspotentiale von 0.6 Mio. tCO₂eq respektive 0.4 Mio. tCO₂eq.

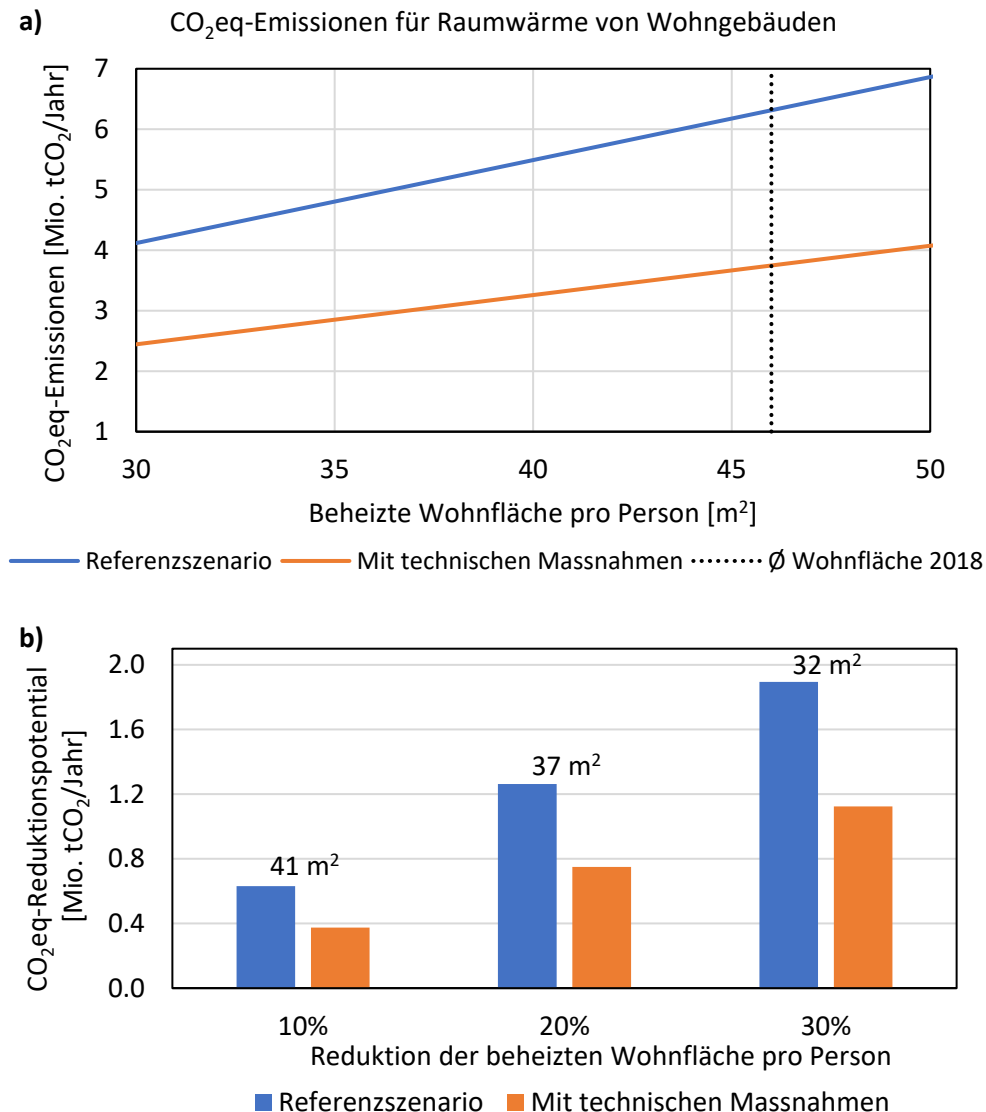


Abbildung 27. Suffizienz-Massnahme «Kleinere beheizte Wohnfläche pro Person». a) CO₂eq-Emissionen verursacht durch die Bereitstellung von Raumwärme in Schweizer Wohngebäuden im Jahr 2030 in Abhängigkeit der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person. Die schwarze gestrichelte Linie zeigt die durchschnittliche Wohnfläche pro Person im Jahr 2018 (46 m²). b) CO₂eq-Reduktionspotential im Jahr 2030 bei Reduktion der beheizten Wohnfläche pro Person.

5.4.2 Tiefere Raumtemperaturen in Innenräumen im Winter

Bei dieser Massnahme wird untersucht, wie gross das CO₂eq-Reduktionspotential durch das Einsparen von Heizenergie mit tieferen Raumtemperaturen in Innenräumen im Winter ist.

5.4.2.1 Annahmen

Als heutige Durchschnitts-Raumtemperatur in Wohngebäuden im Winter nehmen wir basierend auf einer Studie des Instituts für Solartechnik (SPF) 23 °C an (Haller, 2018). Die Studie ermittelte, weshalb neue Mehrfamilienhäuser in der Schweiz grundsätzlich mehr Heizwärme verbrauchen, als dies nach den Normen des Schweizerischen Ingenieur und Architektenverein (SIA) zu erwarten wäre. Die Norm rechnet mit einer Raumtemperatur von 21 °C und der erhöhte Heizwärmebedarf kann unter anderem damit erklärt werden, dass die tatsächlichen Raumtemperaturen höher sind. Diese Hypothese wurde an Hand eines Beispiels bestätigt, bei dem in einem Mehrfamilienhaus mit 26 Wohnungen die Durchschnittstemperatur von Innenräumen im Winter 23 °C betrug (Haller, 2018).

Wir nehmen an, dass eine Reduktion um 3 °C auf 20 °C als Suffizienz-Massnahme möglich ist. Die oben erwähnte Studie gibt an, dass 28 % weniger Heizwärme verbraucht wird, wenn die Raumtemperatur um 3 °C reduziert wird. Die nachfolgenden Resultate basieren auf dieser Angabe. In der Literatur gibt es verschiedene Angaben darüber, wie gross die Einsparung des Heizwärmebedarfs bei einer gegebenen Reduktion der Raumtemperatur ist. EnergieSchweiz gibt beispielsweise 6 % mehr Heizwärmebedarf pro Grad Celsius höherer Raumtemperatur an (EnergieSchweiz, o. J.). Dies entspricht einem rund 19 % höheren Heizwärmebedarf bei einer Differenz von 3 °C. Der Zusammenhang zwischen Raumtemperatur und Heizwärmebedarf ist vom Gebäudestandard abhängig. Für neuere, besser isolierte Gebäude ist die prozentuale Änderung des Heizwärmebedarfs für eine gegebene Änderung der Raumtemperatur tendenziell grösser (Haller et al., 2018).

5.4.2.2 CO₂eq-Reduktionspotential

Abbildung 28 zeigt die CO₂eq-Emissionen, welche Schweizer Wohngebäude im Jahr 2030 durch die Bereitstellung von Raumwärme verursachen in Abhängigkeit der beheizten Wohnfläche pro Person und für eine Raumtemperatur von 23°C (gestrichelte Linien). Zusätzlich ist dargestellt, wieviel CO₂eq-Emissionen eingespart werden, wenn die Raumtemperatur um 3 °C auf 20 °C reduziert wird. Wenn die beheizte Wohnfläche pro Person konstant bei 46 m² bleibt, kann im Referenzszenario 1.8 Mio. tCO₂eq und bei Umsetzung der technischen Massnahmen 1.1 Mio. tCO₂eq eingespart werden, indem die Temperatur in Innenräumen um 3 °C reduziert wird. Wenn die Wohnfläche pro Person sinkt, nimmt das Reduktionspotential durch geringere Raumtemperatur ab, weil für eine kleinere Wohnung weniger Heizenergie verbraucht wird. Im nächsten Abschnitt wird das Potential der Kombination der beiden Massnahmen diskutiert.

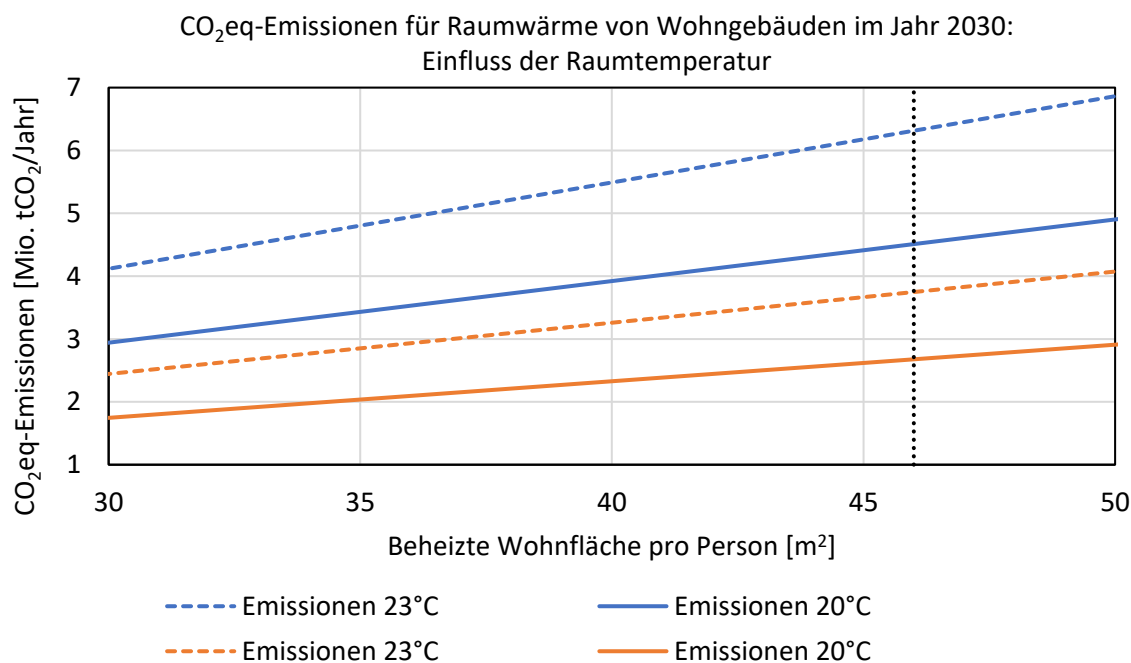


Abbildung 28. CO₂eq-Emissionen verursacht durch die Bereitstellung von Raumwärme in Schweizer Wohngebäuden im Jahr 2030 in Abhängigkeit der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person und Raumtemperatur im Winter. Die schwarze gestrichelte Linie zeigt die durchschnittliche Wohnfläche pro Person im Jahr 2018 (46 m²).

5.4.3 CO₂eq-Reduktionspotential bei Kombination der beiden Suffizienz-Massnahmen im Gebäudebereich

Die Kombination der beiden Massnahmen «Kleinere beheizte Wohnfläche pro Person» und «Raumtemperatur 20 °C anstatt 23 °C» ist in Abbildung 29 gezeigt. Eine Reduktion der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person um 30 % auf 32 m² und gleichzeitig eine 3 °C weniger warme Raumtemperatur

reduziert die durch Heizenergie entstehenden CO₂eq-Emissionen im Referenzszenario um 3.2 Mio. tCO₂eq und mit Umsetzung der technischen Massnahmen um 1.9 Mio. tCO₂eq. Dies ist ein beträchtliches Potential. Selbst bei Umsetzung der technischen Massnahmen im Gebäudebereich ab dem Jahr 2021 ist im Jahr 2030 noch ein Anteil von 37 % an fossilen Heizsystemen in Betrieb, weil die durchschnittliche Lebensdauer eines Heizsystems mit 25 Jahren sehr lange ist und daher jährlich nur 4 % der Heizsysteme ausgetauscht werden. Deshalb besteht trotz technischen Massnahmen im Jahr 2030 immer noch ein beträchtliches Potential für Suffizienz-Massnahmen im Gebäudebereich.



Abbildung 29. CO₂eq-Reduktionspotential im Jahr 2030 der beiden Suffizienz-Massnahmen «Kleinere beheizte Wohnfläche pro Person» und «Raumtemperatur 20 °C anstatt 23 °C».

5.5 Suffizienz in der Mobilität

5.5.1 Reduktion der jährlichen Fahrleistung von PKWs

Wenn ein PKW pro Jahr weniger Kilometer fährt, entstehen weniger CO₂eq-Emissionen. Das CO₂eq-Reduktionspotential hängt davon ab, ob die technische Massnahme «Neuwagen ausschliesslich batterieelektrisch» umgesetzt wird. Daher wird auch für diese Suffizienz-Massnahme das CO₂eq-Reduktionspotential für das Referenzszenario ohne und mit Umsetzung der technischen Massnahme diskutiert.

5.5.1.1 Annahmen

Die jährliche Fahrleistung aller Schweizer PKW auf Schweizer Strassen betrug im Jahr 2017 50.3 Mrd. km (BFS, 2019a). Im Referenzfall nimmt die Fahrleistung mit einem jährlichen Wachstum von 0.7 % bis ins Jahr 2030 auf 55.1 Mrd. km zu und der Schweizer PKW-Bestand besteht im Jahr 2030 nur zu 6 %¹⁵ aus batterieelektrischen PKWs, die restlichen 94 % bestehen aus Benzin-, Diesel- und Hybridfahrzeugen sowie zu einem kleinen Teil aus gasbetriebenen Fahrzeugen. Da mit einer jährlichen Effizienzsteigerung von 2.2 % pro Jahr gerechnet wird, nimmt der durchschnittliche CO₂eq-Ausstoss pro Kilometer der Fahrzeugflotte auch im Referenzfall im Vergleich zu 2018 ab und beträgt im Jahr 2030 noch 159 gCO₂eq/km. Wenn die technische Massnahme «Neuwagen ausschliesslich batterie-

¹⁵ Eigene Berechnung basierend auf den Prognosen für Zusammensetzung der Neuwagen von Infrac (2017), Ersatzrate und Flottenwachstum.

elektrisch» ab dem Jahr 2021 umgesetzt wird, beträgt im Jahr 2030 der Anteil an E-PKW an der Fahrzeugflotte 63 % und der durchschnittliche CO₂eq-Ausstoss pro Kilometer der Fahrzeugflotte wird auf 65 gCO₂eq/km reduziert. Im Jahr 2017 betrug die durchschnittliche jährliche Fahrleistung pro Personenwagen 11'000 km. Wir nehmen an, dass dieser Wert konstant bleibt und die grössere Gesamtfahrleistung aller Personenwagen durch das Wachstum der Fahrzeugflotte zustande kommt.

Eine Schweizerin legte im Jahr 2015 im Durchschnitt 16 km pro Tag mit dem Auto für Freizeit Zwecke und 9 km für die Arbeit zurück (BFS, 2017b). Da aber bei den Freizeitfahrten die Autos mit 1.9 Personen pro Auto besser ausgelastet sind als bei Arbeitswegen (1.1 Personen pro Auto) ergeben sich für beide Zwecke jährlich ungefähr gleich viele Kilometer, welche mit einem PKW gefahren werden. Der Anteil an der jährlichen PKW-Fahrleistung für die Arbeit und für die Freizeit betragen im Jahr 2015 je rund einen Drittel (BFS, 2017b). Das restliche Drittel beinhaltete Einkauf, Dienstfahrten und Ausbildung. Wenn arbeitstätige Personen sich 80 % der Zeit zu zweit ein Auto teilen würden, um zur Arbeit zu fahren (Fahrgemeinschaften) oder 40 % der Pendlerstrecken durch Home-Office vermieden werden könnten, würde sich die jährliche Fahrleistung von PKWs in der Schweiz um 13 % reduzieren. Eine Reduktion des PKW-Freizeitverkehrs um 50 % durch Umsteigen auf den öffentlichen Verkehr, Vermeiden von Fahrten oder ebenfalls Fahrgemeinschaften würde die gesamte jährliche PKW-Fahrleistung um weitere 17 % reduzieren. Mit diesen beiden Verhaltensänderungen zusammen könnten jährlich 30 % der PKW-Fahrleistung reduziert werden.

5.5.1.2 CO₂eq-Reduktionspotential

Abbildung 30a zeigt die jährlich entstehenden CO₂eq-Emissionen durch die gesamte Fahrzeugflotte in Abhängigkeit der jährlichen Fahrleistung pro PKW. Im Referenzfall sind dies 8.8 Mio. tCO₂eq. Wenn ab 2021 alle Neuwagen batterieelektrisch sind, können die Emissionen auf 3.6 Mio. tCO₂eq reduziert werden.

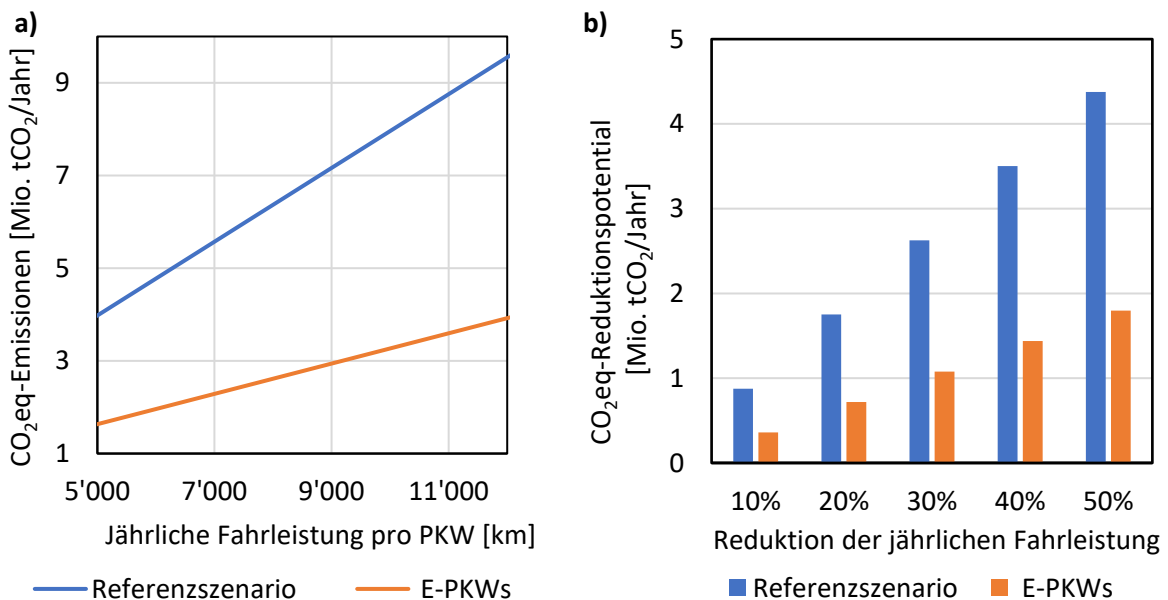


Abbildung 30. a) CO₂eq-Emissionen verursacht durch die gesamte jährliche Fahrleistung aller Schweizer PKWs im Jahr 2030. b) CO₂eq-Reduktionspotential bei Reduktion der jährlichen Fahrleistung für Referenzszenario und mit Umsetzung der technischen Massnahme «Neuwagen ausschliesslich batterieelektrisch».

Die jährliche Fahrleistung zu reduzieren hat einen grösseren Einfluss auf das Reduktionspotential, wenn ein CO₂eq-intensiver Antrieb für den PKW verwendet wird (Abbildung 30). Eine Reduktion der jährlichen Fahrleistung um 30 % von 11'000 km auf 7'700 km, ergäbe für den Referenzfall ein CO₂eq-Reduktionspotential von 2.6 Mio. tCO₂eq (Abbildung 30b). Weil auch mit Umsetzung der technischen

Massnahme «Neuwagen ausschliesslich batterieelektrisch» im Jahr 2030 immer noch 37 % der PKWs fossil betrieben werden, ergibt sich für die Suffizienz-Massnahme «Jährliche Fahrleistung reduzieren» ebenfalls ein beträchtliches Potential. Bei 30 % weniger PKW-Fahrleistung mit hohem E-PKW Anteil an der Fahrzeugflotte können 1.1 Mio. tCO₂eq eingespart werden.

5.5.2 Reduktion der Emissionen aus dem internationalen Flugverkehr

Wie in Unterkapitel 5.3 und Tabelle 12 bereits erwähnt, werden die CO₂eq-Emissionen von Flugreisen aus der Schweiz ins Ausland oder aus dem Ausland in die Schweiz keinem nationalen Treibhausgasinventar¹⁶ angerechnet. Da Schweizer und Schweizerinnen häufig und weit fliegen, machen Flugreisen inzwischen einen beträchtlichen Teil der gesamten durch die schweizerische Bevölkerung verursachte Emissionen aus. Die Anzahl Flüge pro Person und die Strecke pro Flug zu reduzieren wäre daher eine Massnahme mit grossem CO₂eq-Reduktionspotential.

5.5.2.1 Annahmen

Im Jahr 2015 legten Schweizer durchschnittlich 8'986 km pro Person im Flugzeug zurück (BFS, 2017b). Mit einem Emissionsfaktor von 272 gCO₂eq/Pkm (Räber, 2017) ergibt dies insgesamt 20.3 Mio. tCO₂eq für alle von Schweizern verursachten Treibhausgasemissionen durch internationale Flugreisen. Dies sind mehr Emissionen als mit dem in dieser Studie analysierten technischen Massnahmenpaket im Jahr 2030 gegenüber dem Referenzszenario eingespart werden könnte (siehe Abbildung 26). Der Anteil der Emissionen aus Flugreisen am gesamten CO₂eq-Austoss mit Berücksichtigung der im Ausland anfallenden Emissionen betrug im Jahr 2015 18 %.

Die Personenkilometer und die Emissionen aus dem Flugverkehr wachsen schnell. Im Jahr 2015 legten Schweizer 57 % mehr Flugkilometer für Reisen mit Übernachtungen zurück als im Jahr 2010 (BFS, 2017b). Dies bedeutet nicht, dass die Emissionen im selben Zeitraum gleich stark stiegen. Es ist zu erwarten, dass Effizienzsteigerungen und eine bessere Auslastung der Flugzeuge zu einem etwas langsameren Wachstum der Emissionen der Flüge geführt haben. Das Bundesamt für Umwelt publiziert im Schweizer Treibhausgasinventar für jedes Jahr die Treibhausgasemissionen aus dem internationalen Flugverkehr (BAFU, 2020b). Diese Emissionen werden auf Basis des Treibstoffabsatzes an den Schweizer Flughäfen berechnet. Dies bedeutet, dass die Flugreisen von Schweizern, welche im Ausland starten, nicht im Inventar enthalten sind, dafür aber Flugreisen von Ausländern, welche in der Schweiz starten (BAFU, 2020d). Im Jahr 2015 betrugen die CO₂eq-Emissionen aus dem internationalen Flugverkehr gemäss dem Schweizer Treibhausinventar 13.3 Mio. tCO₂eq¹⁷. Dies ist ein Drittel weniger als die Emissionen, welche Schweizer durch internationale Flugreisen gemäss den Daten des BFS verursachten. In der folgenden Analyse wird jedoch konservativ mit den Zahlen des BAFUs gerechnet. Im Jahr 2018 betrugen die Emissionen gemäss Schweizer Treibhausgasinventar bereits 15.3 Mio. tCO₂eq (BAFU, 2020b). Das mittlere jährliche Wachstum der CO₂eq-Emissionen betrug zwischen 2010 und 2018 2.7 %. Für die folgende Analyse wird angenommen, dass das Wachstum der Emissionen aus dem internationalen Flugverkehr gemäss Treibhausinventar repräsentativ ist für das Wachstum der Emissionen, die Schweizer Passagiere verursachen, und dass der Wachstumstrend ohne Massnahmen fortgesetzt wird.

¹⁶ Übereinstimmend mit der Klimakonvention der Vereinten Nationen sind die Emissionen des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs im Treibhausgasinventar zwar ausgewiesen, im nationalen Emissionstotal aber nicht enthalten (BAFU, o. J.).

¹⁷ Berechnet mit einem Radiative Forcing Index von 2.7.

5.5.2.2 CO₂eq-Reduktionspotential

Verschiedene Verhaltensänderungen können dazu führen, dass die Emissionen aus dem Flugverkehr nicht weiter steigen, sondern sinken. Die effektivste Massnahme ist, Flugreisen komplett zu vermeiden. Wie oben bereits erwähnt, ging der Trend in den letzten Jahren in die andere Richtung. Schweizerinnen flogen öfter und weitere Strecken. Wenn das Wachstum der Emissionen aus dem internationalen Flugverkehr gestoppt würde und die jährlichen Emissionen im Jahr 2030 auf demselben Niveau blieben wie 2015, könnten verglichen mit dem Wachstumsszenario 6.5 Mio. tCO₂eq eingespart werden (Abbildung 31). Ohne Wachstum und mit einer zusätzlichen Reduktion der Emissionen von 50 % gegenüber 2015 beträgt das CO₂eq-Reduktionspotential 13.3 Mio. tCO₂eq. Würden alle Schweizer internationale Flugreisen vermeiden, könnten im Jahr 2030 sogar 20 Mio. tCO₂eq eingespart werden.

Suffizienz-Massnahmen, welche die CO₂eq-Emissionen von Flugreisen nicht komplett einsparen aber vermindern, sind folgende: Anstelle von Kurzstreckenflüge auf den Zug oder Fahrgemeinschaften umsteigen oder Geschäftsreisen durch online Videokonferenzen ersetzen. Werden Flugreisen durch Zugreisen ersetzt, hängt das Reduktionspotential davon ab, ob die Züge im entsprechenden Land elektrisch betrieben werden und wieviel CO₂eq-Emissionen bei der Stromproduktion entstehen. Fahrgemeinschaften reduzieren Emissionen pro Personenkilometer, wenn das Auto elektrisch angetrieben wird oder einen kleinen Benzin-/Dieselverbrauch hat und mehrere Personen mitreisen. Videokonferenzen verursachen CO₂eq-Emissionen durch den Stromverbrauch von Servern und Informatikgeräten. Diese Emissionen sind aber vernachlässigbar im Vergleich zu den Emissionen des Flugverkehrs. Wenn trotzdem noch das Flugzeug benutzt wird, kann die Auslastung erhöht werden in dem die Economy-Class gebucht wird und somit die Emissionen pro Personenkilometer reduziert werden. Direkte Flüge reduzieren die Anzahl Starts und somit den Treibstoffverbrauch und CO₂eq-Ausstoss.

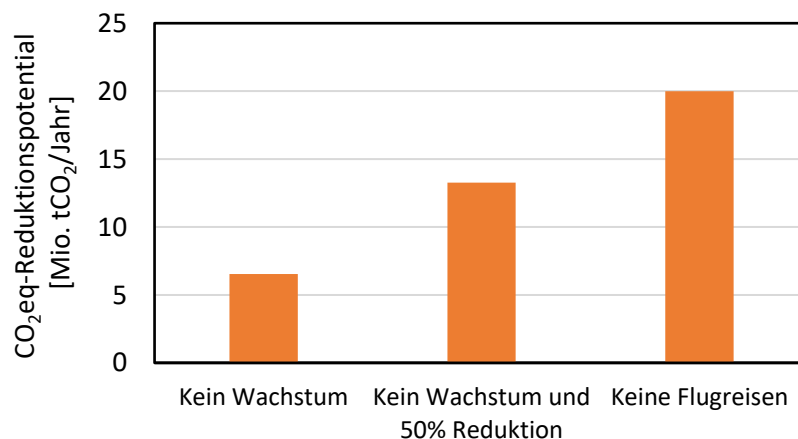


Abbildung 31. CO₂eq-Reduktionspotential im Jahr 2030, wenn die Emissionen von internationalen Flugreisen nicht steigen oder um 50 % sinken gegenüber 2015 oder komplett vermieden werden.

5.6 Suffizienz bei der Ernährung

Das Bundesamt für Statistik schätzt die CO₂eq-Emissionen, welche die Ernährung in der Schweiz im Jahr 2015 verursachte, auf 17.2 Mio. tCO₂eq. Davon fielen 29 % (5 Mio. tCO₂eq) im Inland an und die restlichen 12.2 Mio. tCO₂eq im Ausland. Pro Kopf sind 2 tCO₂eq-Emissionen der Ernährung zuzuschreiben, wobei aber nicht die gesamten Nahrungsmittel zur Kalorienaufnahme dienen, weil ein Teil verschwendet wird. Wie die Vermeidung von Lebensmittelverlusten zu CO₂eq-Reduktion führen kann, wird im nächsten Abschnitt diskutiert. Abschnitt 5.6.2 zeigt die Klimawirkung eines Ernährungsstils mit weniger tierischen Produkten auf.

5.6.1 Lebensmittelverluste verhindern

Beretta und Hellweg (2019) evaluierten in einer Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt den CO₂eq-Fussabdruck von in der Schweiz konsumierten Lebensmitteln und Lebensmittelverlusten. Sie kamen zum Schluss, dass Lebensmittelverluste über die gesamte Lebensmittelkette pro Jahr 4 Mio. tCO₂eq-Emissionen verursachen. Die Haushalte sind für 40 % dieser Emissionen verantwortlich, auf das Konto der Verarbeitung gehen 30 %, danach folgt die Gastronomie mit 12 %, die Landwirtschaft mit 11 % und der Grosshandel mit 7 % (Beretta & Hellweg, 2019). Abbildung 32 zeigt das CO₂eq-Reduktionspotential in der Schweiz und im Ausland in Abhängigkeit davon, wie gross der Anteil an vermiedenen Lebensmittelverlusten ist. Wenn zum Beispiel die Haushalte und die Gastronomie den Lebensmittelabfall komplett verhindern könnten, würde dies eine Reduktion um etwas mehr als 50 % bedeuten. Dadurch könnten 0.6 Mio. tCO₂eq in der Schweiz, 1.5 Mio. tCO₂eq im Ausland und insgesamt 2.1 Mio. tCO₂eq eingespart werden.

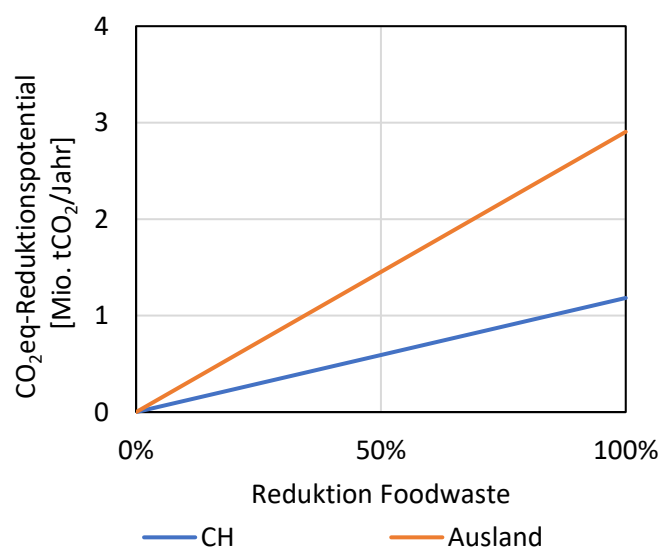


Abbildung 32. CO₂eq-Reduktionspotential in der Schweiz und im Ausland in Abhängigkeit vom Anteil vermiedener Lebensmittelverluste.

5.6.2 Vegetarische oder vegane statt fleischhaltige Ernährung

Tierische Produkte belasten das Klima. Besonders Nahrungsmittel, die von Rindern stammen, verursachen hohe CO₂eq-Emissionen. Rinder produzieren bei der Verdauung Methan, welches in die Atmosphäre entweicht. Das Treibhauspotential von Methan ist 25 mal so gross wie jenes von CO₂ (BAFU, 2015). Die Klimawirkung der Produktion verschiedener Lebensmittel unterscheidet sich enorm.

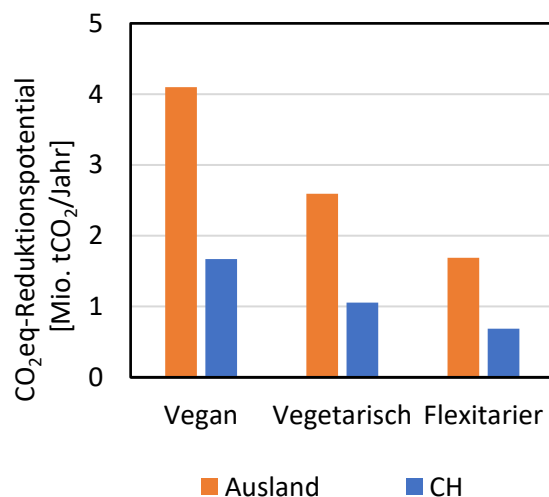


Abbildung 33. CO₂eq-Reduktionspotential in der Schweiz und im Ausland verschiedener Ernährungsstile.

WWF Schweiz (Meili, o. J.) hat für eine durchschnittliche Schweizer Ernährung, eine Ernährung mit reduziertem Fleischanteil (Flexitarier), ganz vegetarische und vegane Ernährung die jährlichen CO₂eq-Emissionen berechnet. Basierend auf diesen Daten zeigt Abbildung 33 das CO₂eq-Reduktionspotential in der Schweiz und im Ausland für die verschiedenen Ernährungsstile. Würden sich alle Schweizer vegetarisch ernähren, könnte pro Jahr im Inland 1.1 Mio. tCO₂eq und im Ausland 2.6 Mio. tCO₂eq eingespart werden.

5.7 Schlussfolgerungen Suffizienz-Massnahmen

Tabelle 13 enthält eine Übersicht über die Reduktionspotentiale der analysierten Suffizienz-Massnahmen und die Resultate sind graphisch in Abbildung 24 gezeigt. Das Potential der Suffizienz-Massnahmen im Gebäudesektor und "Reduktion der jährlichen PKW-Fahrleistung" wurde für den Fall berechnet, dass die technischen Massnahmen bereits umgesetzt wurden. Mit den vorgeschlagenen Suffizienz-Massnahmen könnten im Jahr 2030 insgesamt in der ganzen Schweiz 22.6 Mio. tCO₂eq bzw. 2.7 tCO₂eq pro Kopf eingespart werden (Tabelle 13). Das Reduktionspotential der Suffizienz-Massnahmen ist demnach grösser als das Potential der in diesem Bericht analysierten technischen Massnahmen, welches 13.6 Mio. tCO₂eq beträgt. Dies zeigt, wie wichtig Veränderungen zu weniger oder anderem Konsum sind, beziehungsweise wie hoch die Anforderungen an technologische Massnahmen werden, falls man Suffizienz-Massnahmen nicht unterstützt.

Tabelle 13. CO₂eq-Reduktionspotentiale der Suffizienz-Massnahmen im Jahr 2030.

		CO ₂ eq-Reduktionspotential [Mio. tCO ₂ eq]
Gebäudesektor	Kleinere Wohnfläche pro Person (-30%) und tiefere Raumtemperatur im Winter (-3°C)	1.9
Mobilität	Reduktion der jährlichen Fahrleistung (-50%)	1.8
	Kein Wachstum und Reduktion internationale Flugreisen (-50%)	13.3
Ernährung	Reduktion Lebensmittelverluste (-50%)	2.0
	Vegetarische Ernährung	3.6
	Total	22.6
	davon in CH	5.3
	davon im Ausland	17.3

Die grösste Menge an Treibhausgasemissionen kann mit 13.3 Mio. tCO₂eq durch eine Reduktion von Flugreisen eingespart werden (siehe Tabelle 13 und Absatz 5.5.2.2). Dies entspricht 60 % des Potentials der analysierten Suffizienz-Massnahmen. Die Umstellung auf vegetarische Ernährung und die Reduktion von Lebensmittelverlusten liefern zusammen ein Viertel des Einsparpotentials mit jährlich 5.6 Mio. tCO₂eq. Im Gebäudebereich werden die CO₂eq-Emissionen bereits durch die Umstellung auf erneuerbare Heizsysteme beträchtlich reduziert. Aber wenn Heizsysteme nicht vor dem Erreichen der Lebensdauer durch erneuerbare Heizungen ersetzt werden (kein vorzeitiger Ersatz), werden im Jahr 2030 immer noch 37 % der Heizsysteme fossil betrieben. Daher kann durch eine kleinere Wohnfläche und eine tiefere Raumtemperatur im Winter 1.9 Mio. tCO₂eq eingespart werden. Die Reduktion der jährlichen PKW-Fahrleistung liefert einen weiteren Reduktionsbetrag von 1.8 Mio. tCO₂eq mit der Annahme, dass im Jahr 2030 63 % der PKWs elektrisch betrieben werden (Tabelle 13, Abbildung 34).

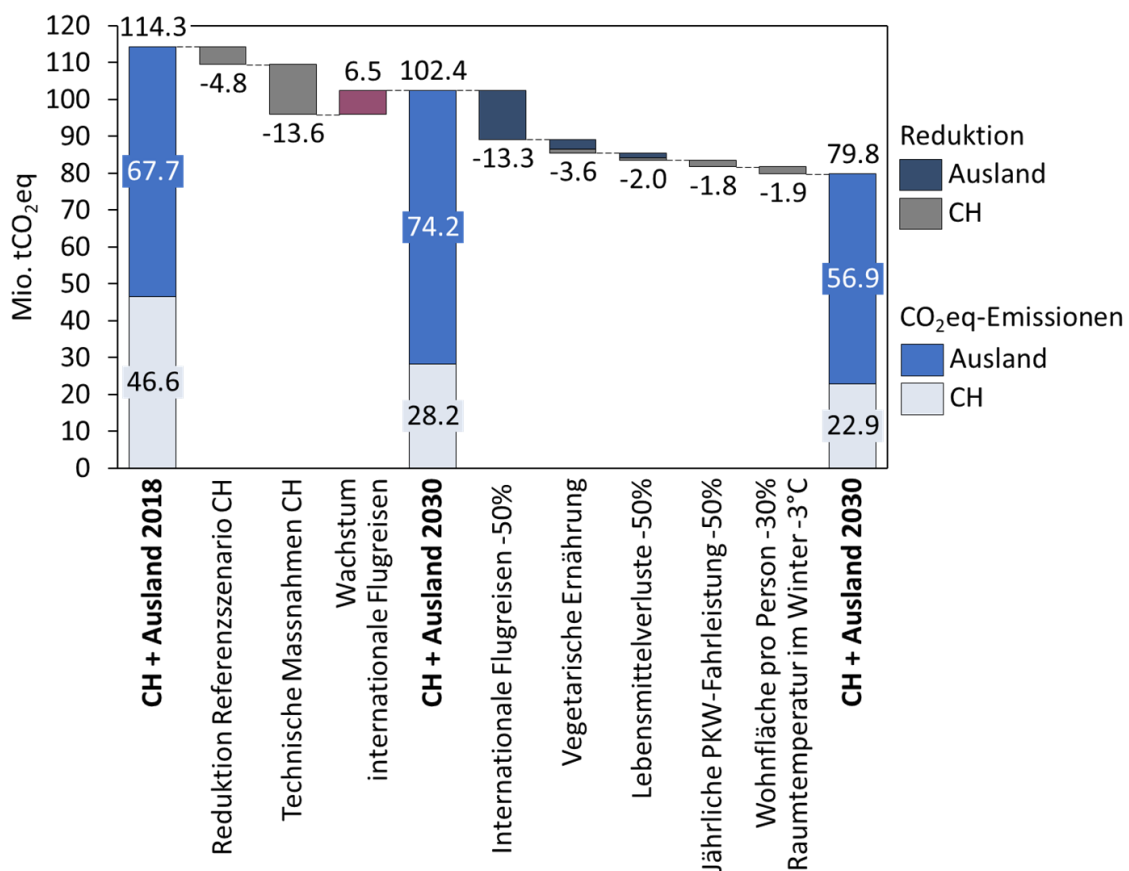


Abbildung 34. CO₂eq-Emissionen innerhalb der Schweizer Grenzen und von Schweizern im Ausland verursacht im Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 2018 und Reduktionspotentiale der technischen Massnahmen und Suffizienz-Massnahmen.

Das Referenzszenario für die Treibhausgasemissionen der Schweiz im Jahr 2030 (siehe Unterkapitel 2.3) beinhaltet eine Reduktion durch technische Massnahmen von 4.8 Mio. tCO₂eq und die in dieser Studie analysierten technischen Massnahmen haben ein zusätzliches Reduktionspotential von 13.6 Mio. tCO₂eq. Insgesamt liefern technische Entwicklungen und Massnahmen ein Reduktionspotential von 18.4 Mio. tCO₂eq (Abbildung 34). Die in diesem Bericht untersuchten Suffizienz-Massnahmen haben mit 22.6 Mio. tCO₂eq ein grösseres Reduktionspotential als die gesamten technischen Massnahmen. Allerdings bleibt auch nach Umsetzung der in dieser Studie analysierten technischen und Suffizienz-Massnahmen ein jährlicher CO₂eq-Ausstoss von 79.8 Mio. tCO₂eq im In- und Ausland übrig (Abbildung 34). Davon werden nur 29 % (22.9 Mio. tCO₂eq) innerhalb der Schweizer Grenzen emittiert. Die verbleibenden Emissionen im Jahr 2030 aus dem internationalen Flugverkehr nach Reduktion um

50 % gegenüber 2015 betragen 6.7 Mio. tCO₂eq und die Emissionen, die für die Bereitstellung von vegetarischen Nahrungsmitteln im Ausland anfallen, betragen 9.6 Mio. tCO₂eq. Die restlichen 40.6 Mio. tCO₂eq werden hauptsächlich durch Konsum von ausländischen Gütern verursacht (BFS, 2018a). Aus diesem Grund sind zum Erreichen von Netto-Null weitere Suffizienz-Massnahmen im Bereich Konsumreduktion aber auch technische Massnahmen im Ausland nötig. Allerdings gilt es zu beachten, dass indirekte Effekte, welche die Umsetzung von technischen Massnahmen innerhalb der Schweiz auf die Emissionen im Ausland haben könnten, nicht berücksichtigt wurden. Wenn innerhalb der Schweiz weniger Treib- und Brennstoffe verbraucht werden, führt dies zu einer erheblichen Reduktion der Emissionen im Ausland, welche bei der Förderung, Aufbereitung und Transport von fossilen Energieträgern entstehen. Andererseits führt der Ausbau der Photovoltaik und Windenergie oder die Produktion von Batterien für Elektroautos zu erhöhten Emissionen im Ausland. Um den Nettoeffekt der technischen Massnahmen auf die Emissionen im Ausland abzuschätzen, wären weitere Untersuchungen nötig. Grundsätzlich müsste das Pariser Klimaabkommen und seine Umsetzung in allen Ländern dazu führen, dass die Importe bis 2030 deutlich klimaverträglicher werden. So will die EU ihre Emissionen gegenüber 1990 bis 2030 von heute -20% um -50 bis -55% reduzieren. Damit würden die Importe aus der EU auch um rund einen Drittel CO₂eq-ärmer. Auch dieser indirekte Effekt wird hier nicht berücksichtigt.

Diskussion

Die vorliegende Studie zeigt auf, wieviel Potential verschiedene technische Massnahmen und Suffizienz-Massnahmen haben, um den CO₂eq-Austoss der Schweiz zu reduzieren. Zudem wurde analysiert, ob durch die Umsetzung der technischen Massnahmen Mehrkosten oder finanzielle Einsparungen für die Schweizer Volkswirtschaft entstehen. Diese Ergebnisse sind in einer CO₂eq-Reduktionskostenkurve für das Jahr 2030 dargestellt. Eine der wichtigsten Erkenntnisse dieser Analyse ist, dass ein grosser Teil der Massnahmen nicht nur Treibhausgase vermeiden, sondern zugleich auch volkswirtschaftliche Kosten einsparen kann.

Basierend auf den Treibhausgasemissionen im Jahr 2018, den Prognosen der Energieperspektive des Bundes und anderen Studien (Infras, 2017; Prognos, 2013; TEP Energy & Ecoplan, 2019) wurden Referenzfälle bezüglich der Entwicklung der Emissionen für das Jahr 2030 modelliert. Das Reduktionspotential der verschiedenen Massnahmen wurde berechnet, in dem die Emissionen im Massnahmenfall mit den Emissionen im Referenzfall verglichen wurden.

Gemäss dem Referenzszenario des Schweizerischen Bundesrats (2017) kann der CO₂eq-Austoss der gesamten Schweiz von 46.6 Mio. tCO₂eq im Jahr 2018 auf 41.8 Mio. tCO₂eq im Jahr 2030 reduziert werden. Wenn die 12 in dieser Studie analysierten technischen Massnahmen umgesetzt werden, kann der CO₂eq-Ausstoss gegenüber dem Referenzszenario zusätzlich um 13.6 Mio. tCO₂eq reduziert werden, sodass im Jahr 2030 innerhalb der Schweizer Landesgrenzen noch 28.4 Mio. tCO₂eq emittiert werden. Durch Suffizienz-Massnahmen, wie zum Beispiel eine kleinere beheizte Wohnfläche pro Person, tiefere Raumtemperaturen im Winter und eine Reduktion der jährlichen Fahrleistung von PKWs, können die CO₂eq-Emissionen innerhalb der Landesgrenze um weitere 5.3 Mio. tCO₂eq gesenkt werden.

Die untersuchten Massnahmen können einen wichtigen Beitrag leisten, um das Netto-Null-Ziel zu erreichen. Jedoch sind weitere Massnahmen nötig, um die verbleibenden Emissionen zu vermeiden. Das CO₂eq-Reduktionspotential der technischen Massnahmen fällt zu rund 60 % im Verkehrssektor, zu 30 % im Gebäudesektor an und zu 8 % durch den Einsatz erneuerbarer Energien für die Stromproduktion. Bei der Auswahl der Massnahmen lag in dieser Studie der Fokus hauptsächlich auf diesen drei Sektoren, weil für diese Sektoren einzelne Massnahmen identifiziert wurden, welche ein grosses Potential zur Vermeidung von Emissionen aufweisen. Bei der Analyse weiterer Massnahmen in zukünftigen Studien sollte vor allem der Industriesektor sowie der Land- und Forstwirtschaftssektor eingehender berücksichtigt werden. In diesen Sektoren sind es nicht einzelne wenige Massnahmen, welche eine grosse Reduktion des Treibhausgasausstosses bewirken können, sondern viele verschiedene Massnahmen, welche alle je einen kleinen, aber in der Summe grossen Beitrag leisten können.

Die CO₂eq-Reduktionskostenkurve zeigt für jede Massnahme, ob durch die Umsetzung im Vergleich zum Referenzszenario volkswirtschaftliche Mehrkosten oder Kosteneinsparungen entstehen. Fünf der analysierten Massnahmen ermöglichen finanzielle Einsparungen. Diese fünf Massnahmen machen 87 % des CO₂eq-Reduktionspotentials aller untersuchten Massnahmen aus. Mit der Umsetzung der Massnahmen «Neue PKWs ausschliesslich batterieelektrisch», «Neue LNFs und SNFs ausschliesslich batterieelektrisch», «Ersatz von Heizungen zu 90 % mit Wärmepumpen», «Ersatz von Kohle in der Zementindustrie» und «Ausbau der Photovoltaik» kann im Jahr 2030 insgesamt 11.8 Mio. tCO₂eq und 1.7 Mrd. CHF eingespart werden. Die Massnahme mit dem grössten Potential CO₂eq-Emissionen und Kosten einzusparen, ist die Umstellung auf die Elektromobilität bei Personenkraftwagen. Allein mit dieser Massnahme können 5.8 Mio. tCO₂eq und 1 Mrd. CHF eingespart werden. Diese Kosteneinsparungen sind möglich, weil E-PKWs kleinere Energie- und Unterhaltskosten verursachen als Benzin/Dieselpkws. Daher sind E-PKWs trotz höherer Anschaffungskosten über ihren gesamten Lebenszyklus

kostengünstiger. Aus demselben Grund lohnt sich aus finanzieller Sicht auch der Ersatz von Leicht- und Schwernutzfahrzeugen mit batteriebetriebenen Fahrzeugen und der Ersatz von Öl- und Gasheizungen mit Wärmepumpen. Die zukünftigen Preise für Strom, Treib- und Brennstoffe beeinflussen die Reduktionskosten bzw. -einsparungen stark. In dieser Studie konnte aber mit ausführlichen Sensitivitätsanalysen gezeigt werden, dass der Preis für Rohöl in Zukunft erheblich sinken müsste, und andere Preise (zum Beispiel die Investitionskosten oder der Strompreis) sich zu Ungunsten der oben genannten Massnahmen entwickeln müssten, damit volkswirtschaftliche Mehrkosten gegenüber dem Referenzfall entstehen würden.

McKinsey hatte im Jahr 2009 ebenfalls eine Analyse für die Schweiz zu den CO₂eq-Reduktionskosten verschiedener Massnahmen durchgeführt (McKinsey, 2009). Auch diese Analyse kam zum Schluss, dass ein Teil der Massnahmen im Gebäude-, Verkehrs- und Energiesektor finanzielle Einsparungen ermöglichen. Für mehrere Massnahmen wurden in der McKinsey-Studie aber Reduktionskosten berechnet, welche signifikant höher sind als in der vorliegenden Studie. Es wurde zwar in der McKinsey-Studie mit einem tieferen Rohölpreis im Jahr 2030 und einem höheren Zinssatz gerechnet, diese Annahmen alleine können die unterschiedlichen Resultate aber nicht erklären. In der McKinsey-Studie aus dem Jahr 2009 wurde für manche Massnahmen auch höhere Investitionskosten angenommen. Besonders ins Gewicht fällt dies bei der Umstellung auf Elektromobilität und beim Ausbau der Photovoltaik: Lern- und Skaleneffekte haben bereits in den letzten 10 Jahren zu einer Reduktion der Batteriekosten um das 7-fache geführt und die heutigen Prognosen gehen nochmals von einer Halbierung bis 2030 aus. Ähnlich sieht es bei den Kosten für Photovoltaikanlagen aus. McKinsey ging nicht davon aus, dass bis im Jahr 2030 der Preis unter 1'950 CHF/kWp fallen würde. Diese Preisgrenze wurde aber für eine Anlage mit durchschnittlicher Grösse in der Schweiz bereits 2019 unterschritten. Tiefere Investitionskosten für erneuerbare Technologien sind zur Hauptsache dafür verantwortlich, dass es aus heutiger Sicht im Jahr 2030 noch mehr Möglichkeiten zur Emissionsvermeidung gibt, die sich auch aus finanzieller Sicht lohnen, als die McKinsey-Studie aus dem Jahr 2009 aufzeigte. Ein detaillierter Vergleich der Reduktionskosten der beiden Studien und eine Analyse der Gründe für Unterschiede ist aber nicht möglich, weil McKinsey nur sehr wenige Annahmen und Berechnungsgrundlagen offenlegte. Ebenso fehlt eine Beschreibung, wie pfadabhängige Massnahmen analysiert wurden.

Bei pfadabhängigen Massnahmen sind das Reduktionspotential und die Kosten davon abhängig, wie sich die Anzahl neuer Anlagen oder der Ersatzanlagen über die Jahre entwickelt. Für die Installation von Solarthermie-, Photovoltaik- und Windenergieanlagen und Gebäudesanierungen wurde in der vorliegenden Studie eine Umsetzung ab dem Jahr 2021 und jährliche Ausbauraten angenommen, welche sich aus den Prognosen der Energieperspektiven oder anderer Studien ableiten lassen. Bei Ersatzmassnahmen von alten Fahrzeugen und Heizungen mit neuen batterieelektrischen Fahrzeugen und erneuerbaren Heizsystemen wurde kein vorzeitiger Ersatz angenommen, denn ein Ersatz vor dem Erreichen der Lebensdauer würde je nach Zeitpunkt zu Mehrkosten führen und könnte die Umweltbilanz negativ beeinflussen. Für die Analyse eines vorzeitigen Ersatzes sind daher umfangreichere Berechnungen nötig, welche nicht Inhalt der vorliegenden Studie sind. Für neue batterieelektrische Fahrzeuge und erneuerbare Heizsysteme wurde angenommen, dass alte Fahrzeuge und Heizungen ab dem Jahr 2021 jeweils bei einem regulären Ersatz am Ende der Lebensdauer ersetzt werden. Zum Beispiel wird die Anzahl Elektroautos im Jahr 2030 unter der Annahme berechnet, dass ab dem Jahr 2021 alle neuen PKWs ausschliesslich Elektroautos sind. Diese Annahme hat Auswirkungen auf die Kosten und das Reduktionspotential der Massnahmen. Die Kosten der Massnahmen werden vom Umsetzungszeitpunkt beeinflusst, weil angenommen wird, dass die Investitionskosten über die Zeit sinken. Noch viel bedeutender ist aber der Faktor Zeit für das CO₂eq-Reduktionspotential: Da neue Heizungen und neue Fahrzeuge durchschnittlich für die nächsten 25 beziehungsweise 17 Jahre betrieben werden, ist es entscheidend, ab wann der Umstieg auf erneuerbare Technologien stattfindet. Werden zum Beispiel bis

im Jahr 2025 weiterhin Benzin/Diesel-PKW's gekauft, dann besteht im Jahr 2030 ein viel grösserer Anteil der Fahrzeugflotte aus fossil betriebenen Fahrzeugen, als wenn bereits im Jahr 2021 mit der Umstellung auf Elektromobilität begonnen wird. Daher ist auch der Ausstoss an Treibhausgasen im Jahr 2030 im Falle einer späteren Umsetzung der Massnahmen höher, als wenn die Massnahmen bereits ab dem Jahr 2021 umgesetzt werden. Aus diesem Grund ist es äusserst wichtig, dass mit der Umsetzung der Massnahmen so früh wie möglich begonnen wird und die dafür erforderlichen politischen Instrumente so bald wie möglich beschlossen werden.

Nicht nur der Zeitpunkt, ab dem mit der Umsetzung der Massnahmen begonnen wird, beeinflusst die CO₂eq-Reduktionskosten und das CO₂eq-Reduktionspotential, sondern auch die Wahl des Jahres, für welches die CO₂eq-Reduktionskostenkurve erstellt wird. Im vorliegenden Bericht wurde diese für das Jahr 2030 berechnet. Wenn die Kosten und das Potential stattdessen für 2025 oder 2035 analysiert werden, ändert sich folgendes: Im Jahr 2025 ist das CO₂eq-Reduktionspotential geringer und im Jahr 2035 grösser als 2030. Dies weil pfadabhängig Massnahmen, für die der Ersatz ausgedienter Geräte oder ein stetiger Ausbau der Kapazität angenommen wird, zu einem späteren Zeitpunkt ein grösseres Potential haben. Die Reduktionskosten nehmen hingegen ab, je weiter das betrachtete Jahr in der Zukunft liegt. Da Lern- und Skaleneffekte zu geringeren Investitionskosten in der Zukunft führen, werden erneuerbaren Technologien mit der Zeit kostengünstiger. Zudem wird in unserer Studie angenommen, dass der Rohölpreis gemäss den Prognosen der IEA (2019) bis 2030 linear um 30 % zunehmen wird. Dies bedeutet, dass Treib- und Brennstoffe im Jahr 2025 noch nicht so teuer sein werden, wie 5 Jahre später und daher der Vorteil bei den Energiekosten von erneuerbaren Technologien kleiner wäre verglichen zu 2030. An der Tatsache, dass gewisse Massnahmen volkswirtschaftliche Kosten einsparen können, ändert die Wahl des Jahres für die Berechnung der Reduktionskostenkurve aber nichts.

Nur 40 % der gesamten durch die Schweizer Bevölkerung verursachten Emissionen entstehen innerhalb der Schweizer Landesgrenze. Durch internationale Flugreisen, Konsum im Ausland und Import von Gütern verursachte die Schweizer Bevölkerung insgesamt 116 Mio. tCO₂eq im Jahr 2015. Es wurden einige Suffizienz-Massnahmen untersucht, welche auch zu einer Vermeidung von Emissionen im Ausland beitragen. Durch die Umstellung auf vegetarische Ernährung und Vermeidung von Lebensmittelverlusten können im Ausland jährlich 4 Mio. tCO₂eq vermieden werden. Eine noch viel grössere Emissionsreduktion wäre durch weniger und kürzere internationale Flugreisen von Schweizern möglich. Wenn keine Massnahmen ergriffen werden, kann davon ausgegangen werden, dass die Emissionen der internationalen Flugreisen von Schweizern weiterhin jährlich zunehmen werden und im Jahr 2030 um 50 % höher sein werden als 2015. Durch eine Reduktion statt eine Zunahme dieser Emissionen um 50 % bis 2030 im Vergleich zu 2015 würden 13.3 Mio. tCO₂eq weniger emittiert. Diese Menge an Treibhausgasen ist vergleichbar mit den gesamten Emissionen, welche durch die in dieser Studie untersuchten technischen Massnahmen im Jahr 2030 eingespart werden können.

Die untersuchten Massnahmen werden nicht von selbst umgesetzt werden. Es werden politische Instrumente, wie zum Beispiel Gesetze oder wirtschaftliche Anreize, erforderlich sein. Appelle an die Selbstverantwortung genügen nicht. Selbst Massnahmen, welche volkswirtschaftliche Kosteneinsparungen erlauben, werden vermutlich ohne politische Instrumente nicht oder nur teilweise umgesetzt, denn nicht alle Personen berücksichtigen bei der Investition in eine neue Heizung oder ein neues Auto die gesamten Lebenszykluskosten.

Eine erhebliche Reduktion der CO₂eq-Emissionen der Schweiz, insbesondere in den Sektoren Mobilität und Gebäude, wäre mit heute verfügbaren Technologien möglich. Die vorliegende Studie zeigt, dass die meisten Investitionen nicht nur für die Umwelt, sondern auch aus volkswirtschaftlicher Sicht profitabel wären. Mit der Umsetzung sollte deshalb nach Ansicht der Autorinnen möglichst rasch begonnen werden.

Literaturverzeichnis

- ADAC. (2020a). *ADAC Info: Autokosten Vergleich*.
<https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/autokosten-vergleich/>
- ADAC. (2020b, April 14). *Test: Stromverbrauch von Elektroautos | ADAC*. <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>
- ADAC. (2020, Juli 31). *Elektroautos und Verbrennungsmotoren im Kostenvergleich* [Persönliche Kommunikation].
- AGROLA. (2020). *Pellets Preise: Entwicklung & Stabilität*. AGROLA AG 8401 Winterthur - Heizöel.
<https://www.agrola.ch/de/waerme/holz-pellets/preisentwicklung.html>
- ARE. (2016). *Perspektiven des Schweizerischen Personen- und Güterverkehrs bis 2040*. Bundesamt für Raumentwicklung (ARE).
- ASTRA. (2019). *Strassen und Verkehr 2019* (S. 47). Bundesamt für Strassen (ASTRA).
- BAFU. (o. J.). *Treibhausgasinventar*. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Abgerufen 7. August 2020, von <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/daten--treibhausgasemissionen-der-schweiz/treibhausgasinventar.html>
- BAFU. (2006). *CO₂-Senken und -Quellen in der Waldwirtschaft*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-wald-und-holz/wald-und-holz--publikationen/publikationen-wald---holz/co2-senken-und--quellen-in-der-waldwirtschaft.html>
- BAFU. (2015). *Vom Menschen verursachte Treibhausgase*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/daten-indikatoren-karten/daten/treibhausgasinventar.html>
- BAFU. (2018a). *Emissionen von Treibhausgasen nach revidiertem CO₂-Gesetz und Kyoto-Protokoll, 2. Verpflichtungsperiode (2013-2020)*. BAFU.
- BAFU. (2018b). *Umwelt-Fussabdrücke der Schweiz* (Umwelt-Zustand). Bundesamt für Umwelt (BAFU).
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-wirtschaft-und-konsum/wirtschaft-und-konsum--publikationen/publikationen-wirtschaft-und-konsum/umwelt-fussabdruetze-der-schweiz.html>
- BAFU. (2019a). *CO₂-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- BAFU. (2019b, Juli 11). *Zementwerke*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-abfall/abfall--fachinformationen/abfallentsorgung/zementwerke.html>
- BAFU. (2020a). *Klimaziel 2050: Netto-Null Treibhausgasemissionen* [Hintergrundpapier]. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- BAFU. (2020b). *Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Schweiz seit 1990 (April 2020)*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/daten-indikatoren-karten/daten/treibhausgasinventar.html>
- BAFU. (2020c). *Information zur Anrechnung von Biogas*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/Information-zum-Umgang-mit-Biogas.pdf.download.pdf/Information_zum_Umgang_mit_Biogas.pdf
- BAFU. (2020d). *Kenngrossen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990–2018*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Klima.
- BAFU. (2020e). *Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2018—National Inventory Report*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- Bauer, C. (2020). *Faktenblatt – Update Februar 2020 Umweltauswirkungen von Personenwagen—Heute und morgen*. EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie (BFE).

- <https://www.energieschweiz.ch/page/de-ch/wie-umweltfreundlich-ist-ein-elektroauto-oder-ein-benziner>
- Beretta, C., & Hellweg, S. (2019). *Lebensmittelverluste in der Schweiz: Umweltbelastung und Vermeidungspotential*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), ETH Zürich,.
- BFE. (2019a). *Entwicklung Energiebezugsflächen EBF 1990-2020, jährliches Update*. Bundesamt für Energie (BFE).
- BFE. (2019b). *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2018—Datentabellen*. Bundesamt für Energie (BFE).
- BFE. (2019c). *Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energieträger—Zusammenzug nach Energieträgern*. Bundesamt für Energie BFE.
- BFE. (2019d). *Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte 2000 – 2018*. Bundesamt für Energie (BFE).
- BFE. (2019e). *Ausblick auf mögliche Entwicklungen von Wärmepumpen-Anlagen bis 2050*. Bundesamt für Energie (BFE), Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs.
- BFS. (2017a). *Gebäude nach Heizsystem und Energieträger*. Bundesamt für Statistik (BFS).
- BFS. (2017b). *Verkehrverhalten der Bevölkerung—Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015*. Bundesamt für Statistik (BFS).
- BFS. (2018a). *Mehr als 60% des Treibhausgas- Fussabdrucks entstehen im Ausland*. Bundesamt für Statistik (BFS).
- BFS. (2018b). *Durchschnittliche Wohnfläche pro Bewohner in den bewohnten Wohnungen¹) nach Haushaltszusammensetzung und nach Kanton*. Bundesamt für Statistik (BFS).
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bauwohnungswesen/wohnungen/wohnverhaeltnisse/flaechenverbrauch.html>
- BFS. (2019a). *Mobilität und Verkehr Statistischer Bericht 2018*. Bundesamt für Statistik (BFS).
- BFS. (2019b, Mai 23). *Erhebung der Energieträger von Wohngebäuden*.
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bauwohnungswesen/gebaeude/energiebereich.html>
- BFS. (2019c, Oktober 10). *Allgemeine Übersicht «Gebäude» nach Kantonen 2018—2018 | Tabelle*. Bundesamt für Statistik (BFS). </content/bfs/de/home/statistiken/bauwohnungswesen.assetdetail.9767630.html>
- BFS. (2019d). *Kilometerkosten des motorisierten Verkehrs, 2016*. Bundesamt für Statistik (BFS).
- BFS. (2019e). *Fahrleistung der in- und ausländischen Fahrzeuge nach Fahrzeugart (Leistungen der Güterfahrzeuge. Zeitreihen)—1950-2018 | Tabelle*. Bundesamt für Statistik (BFS).
</content/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/gueterverkehr.assetdetail.10607418.html>
- BFS. (2020a). *Landesindex der Konsumentenpreise*. Bundesamt für Statistik (BFS).
- BFS. (2020b). *Schweizerische Zivilluftfahrt—5. Passagiere*. Bundesamt für Statistik (BFS).
- BFS. (2020c). *Fahrzeuge und Transportmittelbestände des Güterverkehrs—1970-2019 | Tabelle*. Bundesamt für Statistik (BFS). </content/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken.assetdetail.11407521.html>
- BFS. (2020d). *Neue Inverkehrsetzungen von Strassenfahrzeugen nach Fahrzeuggruppe und Fahrzeugart—1990-2019 | Tabelle*. Bundesamt für Statistik.
</content/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassen-neu-inverkehrsetzungen.assetdetail.11407536.html>
- BFS. (2020e). *Strassenfahrzeugbestand nach Fahrzeuggruppe—1910-2019 | Tabelle*. Bundesamt für Statistik. </content/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassenfahrzeuge-bestand-motorisierungsgrad.assetdetail.11407527.html>
- BFS. (2020f). *Elektrizitätserzeugung [Schweiz. Gesamtenergiestatistik]*. Bundesamt für Energie (BFE), Bundesamt für Statistik (BFS).
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/energie.html>
- BNEF. (2017). *Electric Cars to Reach Price Parity by 2025*. Bloomberg New Energy Finance (BNEF).
<https://about.bnef.com/blog/electric-cars-reach-price-parity-2025/>

- BNEF. (2019, März 5). A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. *BloombergNEF*.
<https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>
- Bütler, D. (2019, Juli 4). *Schweizer Zementwerke: Amtlich bewilligte Giftschleudern—Beobachter*.
<https://www.beobachter.ch/umwelt/schweizer-zementwerke-amtlich-bewilligte-giftschleudern>
- CemSuisse. (2020, Mai). [Persönliche Kommunikation].
- EBP. (2007). *Ermittlung repräsentativer Betriebskostensätze für Motorfahrzeuge zur Bewertung von Massnahmen im Strassenverkehr*. Ernst Basler + Partner AG, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
- EBP. (2020). *Szenarien der Elektromobilität in der Schweiz – Update 2020* [EBP-Hintergrundbericht]. EBP Schweiz AG.
- E-CUBE Strategy Consultants. (2018). *Einspeisepotenzial von erneuerbarem Gas in das Schweizer Netz bis 2030*. Konferenz Kantonalen Energiefachstellen (EnFK).
- ElCom. (2019). *Tätigkeitsbericht der ElCom 2018*. Eidgenössische Elektrizitätskommission (ElCom).
- energieheld. (2020). *Kosten für Dämmung—Dach, Fassade & Keller*.
<https://www.energieheld.ch/daemmung/kosten>
- EnergieSchweiz. (o. J.). *Heizen*. EnergieSchweiz. Abgerufen 13. August 2020, von
<https://www.energieschweiz.ch/page/de-ch/heizen>
- energieheld. (2020). *Kosten für Dämmung—Dach, Fassade & Keller*.
<https://www.energieheld.ch/daemmung/kosten>
- EURELECTRIC. (2020). *Power Choices—Pathways to Carbon-Neutral Electricity in Europe by 2050*. Union of the Electricity Industry.
- EVZ. (2019). *Steuersätze für die wichtigsten Treib- und Brennstoffe*. Eidgenössische Zollverwaltung (EZV).
- Fischer, C., & Griebshammer, R. (2013). *Mehr als nur weniger—Suffizienz: Begriff, Begründung und Potenziale*. Öko-Institut e.V. www.oeko.de/oekodoc/1836/2013-505-de.pdf
- Gnann, T. (2015). *Market diffusion of plug-in electric vehicles and their charging infrastructure*. Fraunhofer Verlag Stuttgart.
- Gubler, L. (o. J.). *Klimaschutz durch Hochmoorrenaturierung*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL).
- Gubler, L. (2016). *Kosten von Regenerationsprojekten von drainierten Hochmooren in der Schweiz*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- Gubler, L. (2017a). *CO₂ kompensieren, in Hochmoore investieren*. Schweizer Gemeinde.
- Gubler, L. (2017b). *Klimaschutz durch Hochmoorschutz—CO₂-Kompensation durch Hochmoorrenaturierung in der Schweiz*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL).
- h2mobilitaet. (2020, Juli). Bertrand Piccard gibt das Startzeichen für die Wasserstoff-Elektromobilität in der Schweiz. *Förderverein H2 Mobilität Schweiz*. <https://h2mobilitaet.ch/bertrand-piccard-gibt-das-startzeichen-fuer-die-wasserstoff-elektromobilitaet-in-der-schweiz/>
- Haller. (2018). *ImmoGap—Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern*. Instituts für Solartechnik (SPF), Bundesamt für Energie (BFE).
- Huneke, F. (2018). *Auf dem Weg in die Wettbewerbsfähigkeit: Elektrolysegase erneuerbaren Ursprungs*. Energy Brainpool, Greepeace Energy eG.
- ICCT. (2019). *Update on electric vehicle costs in the United States through 2030* (S. 1–12) [WORKING PAPER 2019-06]. International Council on Clean Transportation (ICCT).
- IEA. (2019). *World Energy Outlook 2019*. International Energy Agency (IEA).
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- Infras. (2017). *Pilotstudie zum Treibstoffverbrauch und den Treibhausgasemissionen im Verkehr 1990-2050—Szenarien für den Strassenverkehr*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- IWU. (2002). *Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand*. Institut für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU).

- Klaus, G. (2007). *Zustand und Entwicklung der Moore in der Schweiz* (Umwelt-Zustand Nr. 0730.). Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- Kreyenberg, D., Lischke, A., Bergk, F., Duennebeil, F., Heidt, C., Knörr, W., Raksha, P., Schmidt, P., Weindorf, W., Naumann, K., Majer, S., & Müller-Langer, F. (2015). *Erneuerbare Energien im Verkehr—Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger* (S. 152). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Verkehrsforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). <http://www.lbst.de/download/2015/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf>
- McKinsey. (2007). *A cost curve for greenhouse gas reduction*. McKinsey & Company.
- McKinsey. (2009a). *Pathways to a Low-Carbon Economy—Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve* (S. 1–192). McKinsey & Company.
- McKinsey. (2009b). *Swiss Greenhouse Gas Abatement Cost Curve* (S. 1–36). McKinsey & Company.
- McKinsey. (2010). *Impact of the financial crisis on carbon economics—Version 2.1 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve* (S. 1–14). McKinsey & Company.
- Meili, C. (o. J.). *Fleisch und Milchprodukte*. WWF Schweiz. Abgerufen 7. August 2020, von <https://www.wwf.ch/de/unsere-ziele/fleisch-und-milchprodukte>
- Messmer, A., & Frischknecht, R. (2016). *Umweltbilanz Strommix Schweiz 2014*. treeze Ltd. und Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- Palandrani, P. (2019, Mai 21). *What's Driving the Electric Vehicle, Lithium, and Battery Markets in 2019?* Global X ETFs. <https://www.globalxetfs.com/whats-driving-the-electric-vehicle-lithium-and-battery-markets-in-2019/>
- Palmer, K., Tate, J. E., Wadud, Z., & Nellthorp, J. (2018). Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan. *Applied Energy*, 209, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.089>
- Paul, S., & Schellenberger, A. (2015). *Organische Böden, Klima und der Kohlenstoffmarkt*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Universität Basel.
- Prognos. (2013). *Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050* (S. 1–904). Bundesamt für Energie (BFE).
- Project Drawdown. (2018, Oktober 18). *Drawdown Schweiz*. Science Based Solutions. <https://sciencebasedsolutions.com/drawdown-schweiz/>
- Project Drawdown. (2020). *Project Drawdown*. <https://drawdown.org/>
- Propfe, B., Redelbach, M., Santini, D. J., & Friedrich, H. (2012). Cost analysis of plug-in hybrid electric vehicles including maintenance & repair costs and resale values. *World Electric Vehicle Journal*, 5(4), 886–895.
- Räber, M. (2017). *Treibhausgas-Emissionen aus Dienstreisen der ETH Zürich Methodenbeschreibung 2016*. Eartheffect GmbH, Mobilitätsplattform der ETH Zürich.
- Rohrer, J. (2019). Netto-Null bis 2030: Die Klimabewegung hat recht! *Südostschweiz*, 16. <https://doi.org/10.21256/zhaw-3233>
- Rohrer, J. (2020). *Ausbau der Stromproduktion aus Photovoltaik in der Schweiz* [Schriftenreihe Erneuerbare Energien, Bodenökologie und Ökotechnologie]. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW).
- Schneider, S. (2014). *Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse des elektrischen 18 t Lastwagens E-FORCE von Feldschlösschen Getränke AG*. Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich - Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF). <https://feldschloesschen.swiss/media/24740/vergleichsstudie.pdf>
- Schweizerischer Bundesrat. (2017). *Botschaft zur Totalrevision des CO₂-Gesetzes nach 2020*.
- SNB. (2020). *Öffentliche Anleihen der Schweizerischen Eidgenossenschaft: Zeichnungsergebnisse*. Schweizer National Bank.
- Sperr, N., & Rohrer, J. (o. J.). *Dekarbonisierung des Schweizer Energiesystems—Beschreibung des interaktiven Dekarbonisierungs-Rechners (Prototyp)*. Unveröffentlicht. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Forschungsgruppe Erneuerbare Energien, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen IUNR.

- Sperr, N., & Rohrer, J. (2019). *Dekarbonisierung des Schweizer Energiesystems*. 17. Nationale Photovoltaik-Tagung 2019, Bern, 26.-27. März 2019. <https://doi.org/10.21256/zhaw-3325>
- Sperr, N., & Rohrer, J. (2020). *Perspektiven von Power-to-Gas in der Schweiz*. <https://doi.org/10.21256/zhaw-4827>
- Stalder, H. (2019, April 3). Neue Zahlen zeigen weniger Wind als erwartet. *Neue Zürcher Zeitung (NZZ)*. <https://www.nzz.ch/schweiz/windstaerke-wurde-ueberschaetzt-ld.1471717>
- statista. (2020). *Schweiz—Effektive Elektrizitätsproduktion der Windenergieanlagen 2019*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/873882/umfrage/effektive-elektrizitaetsproduktion-der-windenergieanlagen-in-der-schweiz/>
- Stolz, P., & Frischknecht, R. (2017). *Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen—KBOB Ökobilanzdatenbestand v.2.2 :2016*. treeze.
- Suisse-Eole. (o. J.-a). *Häufige Fragen (FAQ)—Alles über die Windenergie—Suisse-Eole—Schweizerische Vereinigung zur Förderung der Windenergie*. Abgerufen 14. August 2020, von <https://www.suisse-eole.ch/de/windenergie/faq/was-kostet-der-unterhalt-und-betrieb-eines-windpark-21/>
- Suisse-Eole. (o. J.-b). *Vorteile der Windenergie—Alles über die Windenergie—Suisse-Eole—Schweizerische Vereinigung zur Förderung der Windenergie*. Abgerufen 14. August 2020, von <https://www.suisse-eole.ch/de/windenergie/gute-grunde/>
- Swissolar. (2014). *Ökobilanz der Stromerzeugung durch Photovoltaik*. https://www.solarplattformseeland.ch/fileadmin/user_upload/Presse/Artikel/21011d_Merkblatt_Oekologie_PV_2014.pdf
- Swissolar. (2020). *Kostenrechner für PV-Anlagen*. <https://www.swissolar.ch/fuer-bauherren/planungshilfsmittel/kostenrechner-fuer-pv-anlagen/>
- Swissolar. (2020). *Strom von der Sonne*. https://www.swissolar.ch/fileadmin/user_upload/Solarenergie/Fakten-und-Zahlen/Branchen-Faktenblatt_PV_CH_d.pdf
- TEP Energy, & Ecoplan. (2019). *Erneuerbare- und CO₂-freie Wärmeversorgung Schweiz—Eine Studie zur Evaluation von Erfordernissen und Auswirkungen*. AEE Suisse, Wärme Initiative Schweiz.
- Thielmann, A. (2020). *Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- Tuchschild, M., & Halder, M. (2010). *mobitool – Grundlagenbericht: Hintergrund, Methodik & Emissionsfaktoren*.
- UBS. (2017). *UBS Evidence Lab Electric Car Teardown – Disruption Ahead?* <https://neo.ubs.com/shared/d1ZTxnvF2k/>
- Umweltbundesamt. (2019). *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten—Kostensätze*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-30-zur-ermittlung-von>
- Umweltbundesamt. (2020, Januar). *Energiebedingte Emissionen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen>
- VCÖ. (2020). *VCÖ: Inlandflug in Österreich verursacht 50 Mal so hohe klimaschädliche Treibhausgase wie Bahnfahrt - Mobilität mit Zukunft*. <https://www.vcoe.at/presse/presseaussendungen/detail/vcoe-inlandflug-in-oesterreich-verursacht-50-mal-so-hohe-klimaschaedliche-treibhausgase-wie-bahnfahrt>
- VSE. (2020). *Windenergie (Basiswissen-Dokument)*. Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE).
- Wietschel, M. (2019). *Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- WWF Schweiz. (2014). *Gaskraftwerke in der Schweiz [Positionspapier]*.
- WWF Schweiz. (2016). *Gebäudesanierung und Heizsysteme—Excel-Tool für Einfamilienhäuser -Excel-Tool für Mehrfamilienhäuser*. <https://www.wwf.ch/de/unsere-ziele/gebaeudesanierung-und-heizsysteme>

Zah, R., & Del Duce, A. (2015). *Ökobilanz des Vergärwerks und Biogas-Aufbereitungsanlage Werdhölzli*. Quantis.

Anhang

A. 1. Annahmen und Berechnungsgrundlagen

A. 1. 1. Annahmen Emissionsfaktor Strom

Der Emissionsfaktor von Strom wird aus den direkten Emissionen der Stromproduktion in der Schweiz und des Importstroms berechnet. Die Daten sind in Tabelle A. 1 zusammengefasst. Für die zukünftigen Emissionsfaktoren des Importstroms wird angenommen, dass der europäische Stromsektor bis 2050 bei Netto-Null ist und die Abnahme ab 2014 linear erfolgt. Dies entspricht der Annahme des Branchenverbands eurelectric (2020). Auf eine Differenzierung zwischen Winter- und Sommerstrom wurde verzichtet, da dies zu einer erheblichen Steigerung der Komplexität der Analysen geführt hätte.

Tabelle A 1. Berechnung Stromemissionsfaktor.

Grösse	Wert 2018	Quelle	Wert 2030	Quelle
Importanteil	29.3%	(Messmer & Frischknecht, 2016)	17.9%	Prognos 2013 POM Variante E
Direkte Emissionen Inlandstrom	19.8 [gCO ₂ eq/kWh]	(Messmer & Frischknecht, 2016)	22.1 [gCO ₂ eq/kWh]	Prognos 2013 POM Variante E
Direkte Emissionen Importstrom	284.8 [gCO ₂ eq/kWh]	EEA 2018	178 [gCO ₂ eq/kWh]	Lineare Abnahme bis 2050 auf 0 [gCO ₂ eq/kWh]
Emissionsfaktor Strommix	97.4 [gCO ₂ eq/kWh]	Berechnet	50.1 [gCO ₂ eq/kWh]	Berechnet

A. 1. 2. Sektorenübergreifende Annahmen

Tabelle A 2. Übersicht über die Massnahmen und Annahmen im Mobilitätssektor.

Grösse	Wert	Quelle	Kommentar
Emissionsfaktor Strom [gCO ₂ eq/kWh]	97.4 (2018) 50.1 (2030)	Siehe Abschnitt A. 1. 1	
Stromgestehungskosten [CHF/kWh]	0.074	(EiCom, 2019)	
Strompreis [CHF/kWh]	0.184		Nach Abzug von Abgaben vom Konsumentenpreis (0.204 CHF/kWh)
Ölpreis [\$/barrel]	68 (2018) 88 (2030)	(IEA, 2019) "Stated Policies Scenario", Table B.4	Lineare Zunahme
Gaspreis [\$/Mbtu]	7.6 (2018) 8.0 (2030)	(IEA, 2019) "Stated Policies Scenario", Table B.4	Lineare Zunahme
Diskontsatz	0.5%	(SNB, 2020)	
Zinssatz	0.5%	(SNB, 2020)	

A. 1. 3. Mobilitätssektor

Tabelle A 3. Übersicht über die Massnahmen und Annahmen im Mobilitätssektor.

#	Massnahme	Annahmen
M1	Elektrische Neuwagen Neue Personenwagen sind ausschliesslich elektrisch.	
M2	Elektrische Liefer- und Lastwagen Neue Leichtnutzfahrzeuge (LNFs) und Schwerlastnutzfahrzeuge (SNFs) ausschliesslich elektrisch	
M3	Ersatz inländischer Flugreisen Inländische Flugreisen werden vollständig mit Zugreisen ersetzt.	Die zurückgelegten Zugkilometer entsprechen den zurückgelegten Flugkilometern.

Tabelle A 4. Übersicht über die allgemeinen Annahmen im Mobilitätssektor.

	Grösse	Wert	Quelle	Massnahme	Kommentar
Allgemein	Benzinpreis	0.746 [CHF/l]	Berechnet basierend auf EVZ 2019.	M1, M2	Ohne Steuern und Abgaben
	Dieselpreis	0.838 [CHF/l]	Berechnet basierend auf (EVZ, 2019)	M1, M2	Ohne Steuern und Abgaben
	Erdgaspreis	1.255 [CHF/kg]	Berechnet basierend auf (EVZ, 2019).	M1	Ohne Steuern und Abgaben
	Strompreis	0.184 [CHF/kWh]	(EICom, 2019)	M1, M2	Ohne Steuern und Abgaben
	Emissionsfaktor Benzin	2.32 [kgCO ₂ eq/l]	(BAFU, 2019a)	M1, M2	
	Emissionsfaktor Diesel	2.62 [kgCO ₂ eq/l]	(BAFU, 2019a)	M1, M2	
	Emissionsfaktor Erdgas	2.66 [kgCO ₂ eq/kg]	(BAFU, 2019a)	M1, M2	
	Emissionsfaktor Strom	50.1 [gCO ₂ eq/kWh] (2030)		M1, M2	Siehe A. 1. 1
	Kosten Batterie [CHF/kWh]	173 (2018) 61 (2030)	(BNEF, 2019)	M1, M2	Eigene Annahme: Kostenreduktion verläuft linear von 2018 - 2030

Tabelle A 5. Übersicht über die Annahmen für die Massnahme «M1 – Neuwagen ausschliesslich elektrisch».

	Grösse	Wert	Quelle	Massnahme	Kommentar
PKW	Bestand 2018	4 602 688	(BFS, 2020e)	M1	
	Jährliche Fahrleistung des gesamten PKW-Bestandes 2017	50.3 [Mrd. km]	(BFS, 2019a)	M1	

Zunahme Bestand	0.7% p.a.	(ARE, 2016)	M1	Es wird angenommen, dass die jährliche Fahrleistung pro PKW gleich bleibt und sich die Zunahme der Gesamtfahrleistung im Bestand widerspiegelt.
Anteil Neuzulassungen am Personenwagenbestand	6.5 %	Neuzulassungszahlen (BFS, 2020d) Personenwagenbestand (BFS, 2020e)	M1, M2	Durchschnittlicher Anteil von Neuzulassungszahlen am Bestand von 2010 bis 2019
Jährliche Verkehrsleistung pro PKW	Neuwagen: 15'000 [km/Jahr], Durchschnitt über Lebensdauer: 11'000 [km/Jahr]	(BFS, 2019a, 2020e)	M1	Eigene Annahmen: 15'000 [km/a] für Neuwagen und lineare Abnahme mit Alter
Flottenzusammensetzung Neufahrzeuge 2018	Benzin 62.8% Diesel 30.0% Hybrid 5.1% Elektro 1.9% Methan 0.3%	(ASTRA, 2019)	M1	
Flottenzusammensetzung Neufahrzeuge 2030	Benzin 40% Diesel 28% Hybrid 15% Elektro 14% Methan 3%	(Infras, 2017)	M1	
Energieverbrauch der Neuwagen 2018	Benzin 8.9 [l/100km] Diesel 7.8 [l/100km] Hybrid 5.5 [l/100km] Elektro 18 [kWh/100km] Methan 5.9 [kg/100km]	(Infras, 2017)	M1	
Effizienzsteigerung Neuwagen	2.2% p.a.	(Infras, 2017)	M1	
Anschaffungskosten PKW Verbrennungsmotor	23'500 [CHF]	(UBS, 2017)	M1	VW Golf (vergleichbar zu Chevrolet Bolt)
Unterhaltskosten PKW Verbrennungsmotor	0.067 [CHF/km]	(ADAC, 2020a)	M1	
Anschaffungskosten E-PKW ohne Batterie	27'000 CHF (2018) 20'250 CHF (2030)	(UBS, 2017)	M1	Chevrolet Bolt
Kostenreduktion für E-PKW von 2018 – 2030 durch Skaleneffekte	Lineare Abnahme um insgesamt 25 %	Eigene Annahme basierend auf (BNEF, 2017; UBS, 2017)	M1	Skaleneffekte führen hauptsächlich zu kleineren R&D-Kosten pro PKW.
Grösse Batterie E-PKW	40 [kWh] (2018), 60 [kWh] (2030)	Eigene Annahme	M1	Reichweite: 220 km (2018), 435 km (2030)
Kosten Batterie [CHF/kWh]	173 (2018) 61 (2030)	(BNEF, 2019)	M1, M2	Eigene Annahme: Kostenreduktion verläuft linear von 2018 - 2030

Anschaffungskosten E-PKW inkl. Batterie	33'900 CHF (2018) 23'900 CHF (2030)			Anschaffungskosten ohne Batterie + Batteriegrösse * Kosten Batteriekapazität
Unterhaltskosten E-PKW	0.057 [CHF/km]	(ADAC, 2020a)	M1	Mittelwert basierend auf Vergleich von 5 Modellen (siehe Tabelle A 6.)

Tabelle A 6. Wartungs- und Reparaturkosten (Werkstattkosten) gemäss von 5 verschiedenen Elektro-Modellen und vergleichbaren Benzin/Diesel-Modellen (ADAC, 2020a). Durchschnittswerte für erste 5 Jahre Haltungsdauer und Fahrleistung von 15'000 km.

Marke/Modell	Antrieb	Grundpreis [EUR]	Werkstatt- kosten gesamt inkl. MWST [EUR/Monat]	Inspektion und Wartung [EUR/ Monat]	Rep- aratur [EUR/ Monat]	Reifen- ersatz [EUR/ Monat]	Werkstatt- kosten ohne MWST [Rp./km]
Hyundai							
Hyundai; Ioniq Elektro (100 kW)	Elektro	34'459	55	10	25	20	4.0
Hyundai; i30 1.0 T-GDI (88 kW)	Benzin	25'725	59	19	24	16	4.3
Hyundai; i30 1.6 CRDi (100 kW)	Diesel	29'136	60	15	25	20	4.3
Jaguar							
Jaguar; i-Pace EV 400 S (294 kW)	Elektro	75'351	112	4	31	77	8.1
Jaguar; F-Pace 30t (221 kW)	Benzin	63'897	94	14	40	40	6.8
Jaguar; F-Pace 30d (221 kW)	Diesel	67'992	116	17	40	59	8.4
Nissan							
Leaf (40 kWh/110 kW)	Elektro	35'775	67	11	23	33	4.8
Qashqai 1.3 DIG-T (117 kW)	Benzin	33'981	103	25	32	46	7.4
Qashqai 1.7 dCi (110 kW)	Diesel	37'734	114	31	33	50	8.2
Renault							
Zoe R110 Z.E. 40 (80 kW) inkl. Batterie	Elektro	29'234	41	9	17	15	3.0
Clio TCe 100 (74 kW)	Benzin	17'683	59	22	19	18	4.3
Clio Blu dCi (63 kW)	Diesel	19'145	61	21	20	20	4.4
Mercedes							
EQC 400 (300 kW)	Elektro	69'484	119	0	29	90	8.6
GLC 43 AMG (287 kW)	Benzin	66'613	136	40	28	68	9.8
GLC 400 d (243 kW)	Diesel	59'015	133	43	29	61	9.6
Durchschnittswerte							
Werkstatt-kosten ohne MWST							[Rp./km]
Elektro							5.7
Benzin/Diesel							6.7

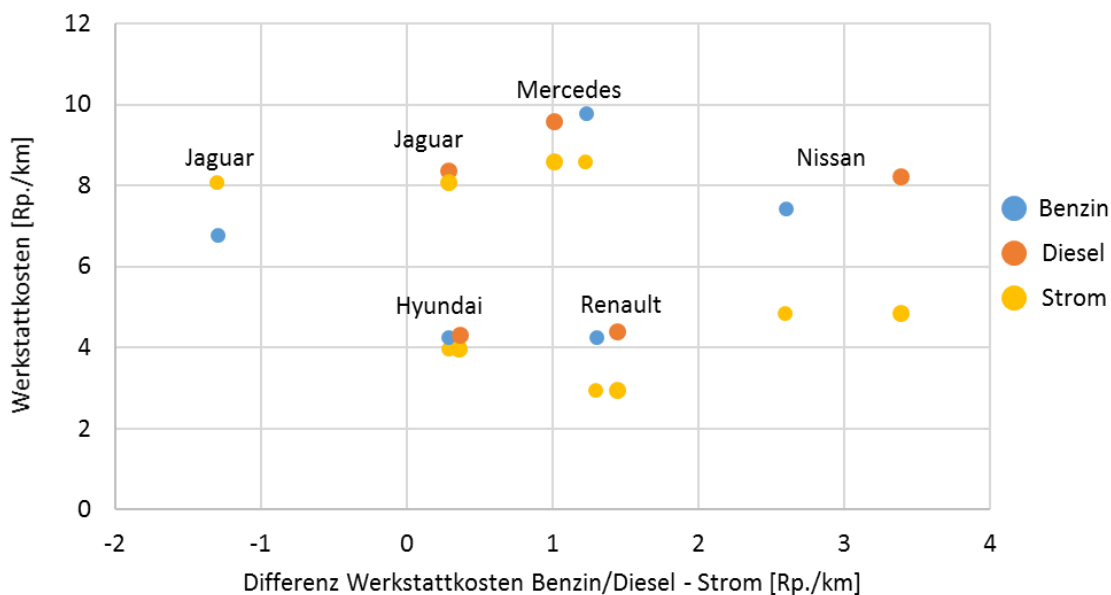


Abbildung A 1. Resultate der Werkstattkostenanalyse aus Tabelle A. 2. graphisch dargestellt.

Tabelle A 7. Übersicht über die Annahmen für die Massnahme «M2 – Neue Leichtnutzfahrzeuge (LNF) und Schwernutzfahrzeuge (SNF) ausschliesslich elektrisch».

	Grösse	Wert	Quelle	Massnahme	Kommentar
LNF	Bestand 2018	376 227	(BFS, 2020c)	M2	
	Zunahme Bestand	3.7 % p.a.	(BFS, 2020d, 2020c)	M2	
	Jährliche Verkehrsleistung pro LNF	12 041 [km/Jahr]	Berechnet basierend auf (BFS, 2019e, 2020c).	M2	
	Flottenzusammensetzung Bestand 2018	Benzin 11% Diesel 87% Elektro 2%	(Infras, 2017)	M2	
	Flottenzusammensetzung Bestand 2030	Benzin 11% Diesel 87% Elektro 2%	(Infras, 2017)	M2	
	Energieverbrauch der neuen Fahrzeuge 2018	Benzin 10.5 [l/100km] Diesel 9.2 [l/100km] Elektro 28 [kWh/100km]		M2	
	Effizienzsteigerung neue Fahrzeuge	1.4% p.a.	(Infras, 2017) und BAFU 2019	M2	
	Anschaffungskosten fossil	23'500 [CHF]	Eigene Annahme	M2	Analog zu PKW
	Unterhaltskosten fossil	3 000 [CHF/Jahr]	(EBP, 2007)	M2	
	Anschaffungskosten E-LNF ohne Batterie	27'000 CHF (2018) 20'250 CHF (2030)	Eigene Annahme	M2	Analog zu PKW

	Grösse Batterie E-LNF	60 [kWh] (2018), 100 [kWh] (2030)	Eigene Annahme	M2	Selbe Reichweite wie PKW: 220 km (2018), 435 km (2030)
	Kosten Batterie [CHF/kWh]	173 (2018) 61 (2030)	(BNEF, 2019)	M1, M2	Eigene Annahme: Kostenreduktion verläuft linear von 2018 - 2030
	Anschaffungskosten E-LNF inkl. Batterie	37'400 CHF (2018) 26'400 CHF (2030)			Anschaffungskosten ohne Batterie + Batteriegrösse * Kosten Batteriekapazität
	Unterhaltskosten E-LNF	2 550 [CHF/a]	Eigene Annahme	M2	Es wird angenommen, dass die Unterhaltskosten für E-LNF um 15% kleiner sind als für fossile LNF.
SNF	Bestand 2018	52 581	(BFS, 2020c)	M2	
	Zunahme Bestand	0.6% p.a.		M2	
	Jährliche Verkehrsleistung pro LNF	42 563 [km/Jahr]	Berechnet basierend auf (BFS, 2019e, 2020c).	M2	
	Flotten-zusammensetzung Bestand 2018	Diesel 100%	(Infras, 2017)	M2	
	Flotten-zusammensetzung Bestand 2030	Diesel 97% Elektro 3%	(Infras, 2017)	M2	
	Energieverbrauch der neuen Fahrzeuge 2018	Diesel 30.3 [l/100km] Elektro 85.5 [kWh/100km]	(Infras, 2017) und (Kreyenberg et al., 2015)	M2	
	Effizienzsteigerung neue Fahrzeuge	1.4% p.a.	(Infras, 2017) und BAFU 2019	M2	
	Anschaffungskosten Diesel-SNF	150 000 [CHF]	Eigene Annahme	M2	
	Unterhaltskosten Diesel-SNF	13 000 [CHF/Jahr]	(EBP, 2007)	M2	
	Anschaffungskosten E-SNF ohne Batterie	150 000	Eigene Annahme	M2	Analog zu fossilbetriebenem SNF
	Grösse Batterie E-SNF	240 [kWh]	(Schneider, 2014)	M2	
	Kosten Batterie [CHF/kWh]	173 (2018) 61 (2030)	(BNEF, 2019)	M1, M2	Eigene Annahme: Kostenreduktion verläuft linear von 2018 - 2030
	Anschaffungskosten E-SNF inkl. Batterie	192'000 CHF (2018) 172'000 CHF (2030)			Anschaffungskosten ohne Batterie + Batteriegrösse * Kosten Batteriekapazität
	Unterhaltskosten E-SNF	11 050 [CHF/Jahr]	Eigene Annahme	M2	Es wird angenommen, dass die Unterhaltskosten für E-SNF um 15% kleiner sind als für fossile SNF.
	Batterieersatzkosten	0.18 [CHF/km]	Eigene Annahme	M2	Berechnet mit Lebensdauer der Batterie = 200'000 km,

mittlere Batteriegrösse =
300 kWh, Batteriekosten =
117 CHF/kWh

Tabelle A 8. Übersicht über die Annahmen für die Massnahme «M3 – Inlandflüge durch Zugreisen ersetzen».

	Grösse	Wert	Quelle	Massnahme	Kommentar
Inländische Flugreisen	Jährliche Distanz pro Person	158 004 000 [km/a]	(BFS, 2020b) Schweizerische Zivilluftfahrt 5. Passagiere	M3	
	Emissionen Kurzstreckenflug	720 [gCO ₂ /Pkm]	(VCÖ, 2020) Österreichisches Umweltbundesamt	M3	
	Gesamtkosten inländische Flüge	0.26 [CHF/Pkm]	(BFS, 2019d)	M3	Es werden doppelt so hohe Kilometerkosten angenommen als BFS angibt, weil Inlandflüge teurer sind als ein durchschnittlicher Flug
	Emissionen Zugreise	8 [gCO ₂ /Pkm]	(Tuchschnid & Halder, 2010) Mobotool	M3	
Inländische Zugreisen	Gesamtkosten Zugreisen	0.44 [CHF/Pkm]	(BFS, 2019d)	M3	

A. 1. 4. Gebäudesektor

Tabelle A 9. Übersicht über die Massnahmen und Annahmen im Gebäudesektor.

#	Massnahme	Annahmen
G1	Ersatz fossiler Heizsysteme Fossile Heizsysteme werden bei Ersatz mit erneuerbaren Systemen ersetzt.	Ersatz besteht aus 90% Wärmepumpen und 10% Holzpellet-Heizungen Für Holzheizungen werden nur Pellet-Feuerungen angenommen, da die Holzenergiestatistik (BFE 2019) für alle Holzheizsysteme ausser Pellet-Feuerungen abnehmende Zahlen annimmt.
G2	Solarthermie Existierende fossile Heizsysteme werden während ihrer verbleibenden Lebensdauer mit einer Solarthermieanlage unterstützt	Jährliche Zubaurate Solarthermie bei existierenden fossilen Heizsystemen: 3% Anteil Solarthermie an Heizwärmebedarf eines Gebäudes mit Solarthermie-Unterstützung: 15%
G3	Gebäudehülle sanieren Bei Sanierungen der Gebäudehülle von existierenden Wohn- und Geschäftsbauten wird GEAK-Effizienzklasse A für die Gebäudehülle erreicht	Jährliche Sanierungsrate im Referenzfall und bei der Massnahme: 1.2% der Energiebezugsfläche aller Gebäude (Prognos, 2013) Der durchschnittliche Wärmebedarf pro Gebäude nimmt im Referenzfall von 23 MWh/a im Jahr 2018 auf 7.3 MWh/a im Jahr 2050 ab und beträgt im Jahr 2030 17.1 MWh/a. Der durchschnittliche Wärmebedarf pro Gebäude liegt bei der Massnahme konstant bei 7.3 MWh/a.

Tabelle A 10. Übersicht über die Annahmen und Berechnungsgrundlagen im Gebäudesektor.

Grösse	Wert	Quelle	Massnahme	Kommentar
--------	------	--------	-----------	-----------

Allgemein	Anzahl Wohngebäude 2018	1 748 477	(BFS 2019b)	G1, G2, G3	Es wird angenommen, dass jedes Wohngebäude über eine Heizung verfügt.
	Anzahl Dienstleistungsgebäude 2018	799 109	Anteilig berechnet aus den CO ₂ eq-Emissionen 2018 von Dienstleistungen und Privathaushalten	G1, G2, G3	Es wird angenommen, dass jedes Dienstleistungsgebäude über eine Heizung verfügt.
	Anzahl Heizsysteme	2 547 586		G1, G2, G3	Anzahl Wohngebäude + Anzahl Dienstleistungsgebäude.
	Anteil EFH / MFH an Wohngebäuden	57% / 43%	(BFS 2019b)	G1, G2, G3	Für Dienstleistungsgebäude wird dieselbe Verteilung von EFH und MFH angenommen wie für Wohngebäude.
	Durchschnittlicher jährlicher Wärmebedarf pro Gebäude	23.1 [MWh/Jahr]	Berechnet basierend auf (BFE, 2019d) Energieverbrauch der Privathaushalte nach Verwendungszweck	G1, G2, G3	Berechnet für Wohngebäude. Annahme: Dienstleistungsgebäude haben denselben Wärmebedarf wie Wohngebäude.
	Lebensdauer Heizsystem	25 Jahre	(WWF Schweiz, 2016)	G1, G2, G3	Durchschnitt über verschiedene Heizsysteme
	Jährliche Austauschrate Heizsystem	4%	Berechnet aus Lebensdauer	G1	
Ölheizung	Anteil an Bestand 2018	40%	(BFS, 2019b)	G1, G2, G3	
	Anteil bei Heizungsersatz Referenzszenario	41% (2018) 28% (2030)	(TEP Energy & Ecoplan, 2019)	G1, G2, G3	Lineare Entwicklung. Zukünftige Entwicklung wird bei G1.1 und G1.2 für den Referenzfall benutzt.
	Emissionsfaktor Heizöl extraleicht [tCO ₂ /TJ]	73.7	(BAFU, 2019a)	G1, G2, G3	
	Heizwert Heizöl [MJ/l]	36	(BAFU, 2019a)	G1, G2, G3	
	Nutzungsgrad	95%	(IWU, 2002)	G1, G2, G3	
	Investitionskosten [CHF]	44 000	(WWF Schweiz, 2016)	G1	Berechnet aus 57% EFH und 43% MFH
	Heizölpreis 2018 [CHF/l]	0.62	(BFS, 2020a)	G1, G2, G3	Ohne Steuern und Abgaben. Mittlere Bezugsmenge. Preisveränderung analog Erdölpreis.
	Unterhaltskosten [CHF/a]	980	(WWF Schweiz, 2016)	G1, G2, G3	Berechnet aus 57% EFH und 43% MFH
Gasheizung	Anteil an Bestand 2018	21%	(BFS, 2019b)	G1, G2, G3	
	Anteil bei Heizungsersatz Referenzszenario	25% (2018) 21% (2030)	(TEP Energy & Ecoplan, 2019)	G1, G2, G3	Lineare Entwicklung. Zukünftige Entwicklung wird bei G1.1 und G1.2 für den Referenzfall benutzt.
	Emissionsfaktor Erdgas [tCO ₂ /TJ]	56.3	(BAFU, 2019a)	G1, G2, G3	

	Heizwert Erdgas [TJ/t]	0.0473	(BAFU, 2019a)	G1, G2, G3	
	Nutzungsgrad	95%	(IWU, 2002)	G1, G2, G3	
	Investitionskosten [CHF]	38 000	(WWF Schweiz, 2016)	G1	Berechnet aus 57% EFH und 43% MFH
	Erdgaspreis 2018 [CHF/kWh]	0.067	(BFS, 2020a)	G1, G2, G3	Ohne Steuern und Abgaben. Preisveränderung analog Gaspreis.
	Unterhaltskosten [CHF/a]	460	(WWF Schweiz, 2016)	G1, G2, G3	Berechnet aus 57% EFH und 43% MFH
Wärme- pumpe	Anteil an Bestand 2018	18%	(BFS, 2019b)	G1, G3	
	Anteil bei Heizungsersatz Referenzszenario	10% (2018) 46% (2030)	(TEP Energy & Ecoplan, 2019)	G1, G3	Lineare Entwicklung. Zukünftige Entwicklung wird bei G1.1 und G1.2 für den Referenzfall benutzt.
	Emissionsfaktor Strom	50.1 [gCO ₂ eq/kWh] (2030)		G1, G3	Siehe A. 1. 1
	Jahresarbeitszahl	3.5 (2018) 4.3 (2030)	(BFE, 2019e) Ausblick auf mögliche Entwicklungen von Wärmepumpen-Anlagen bis 2050	G1, G3	Lineare Entwicklung. Berechnet aus 9:1 (2018) und 75:25 (2030) Anteile für Luftwärmepumpe und Erdwärmepumpe
	Investitionskosten [CHF]	58 000	(TEP Energy & Ecoplan, 2019; WWF Schweiz, 2016)	G1	Berechnet aus 57% EFH und 43% MFH und 75:25 Anteile für Luftwärmepumpe und Erdwärmepumpe
	Unterhaltskosten [CHF/Jahr]	190	(TEP Energy & Ecoplan, 2019; WWF Schweiz, 2016)	G1	Berechnet aus 57% EFH und 43% MFH und 75:25 Anteile für Luftwärmepumpe und Erdwärmepumpe
	Holz- heizung	Anteil an Bestand 2018	10%	(BFS, 2019b)	G1, G3
Anteil bei Heizungsersatz		10% (2018) 8% (2030)	(TEP Energy & Ecoplan, 2019)	G1, G3	Lineare Entwicklung. Zukünftige Entwicklung wird bei G1 nur für den Referenzfall benutzt.
Emissionsfaktor [gCO ₂ eq/kWh]		0	(BAFU, 2019a)	G1	
Nutzungsgrad		83%	(WWF Schweiz, 2016)	G1	
Investitionskosten [CHF]		48 000	(WWF Schweiz, 2016)	G1	Berechnet aus 57% EFH und 43% MFH
Holzpelletpreis [CHF/kWh]		0.072	(AGROLA, 2020)	G1	
Unterhaltskosten [CHF/Jahr]		850	(WWF Schweiz, 2016)	G1	Berechnet aus 57% EFH und 43% MFH
Solar- thermie	Emissionsfaktor Strom	50.1 [gCO ₂ eq/kWh] (2030)		G2	Siehe Sektorenübergreifende Annahmen

	Strombedarf pro Wärmeenergie [kWhel/kWhth]	0.05	(WWF Schweiz, 2016)	G2	
	Anteil Heizungsunterstützung	15%	(WWF Schweiz, 2016)	G2	Berechnet aus 57% EFH und 43% MFH
	Jährliche Zubau-Rate (Anteil an Gebäuden auf denen Solarthermie installiert wird)	3%	Eigene Annahme		Bei Durchführung der Massnahme G1 sind 2030 noch 37% der Heizungen fossil und somit werden 83 % der fossilen Heizsysteme mit Solarthermie unterstützt.
	Investitionskosten [CHF]	8010	(WWF Schweiz, 2016)	G2	Berechnet aus 57% EFH und 43% MFH
Elektrische Widerstandsheizungen	Anteil an Bestand 2018	7%	(BFS, 2019b)	G3	
	Anteil bei Heizungsersatz	0% (2018) 0% (2030)	(TEP Energy & Ecoplan, 2019)	G3	Lineare Entwicklung.
	Strombedarf pro Wärmeenergie [kWhel/kWhth]	1			
Fernwärme	Anteil an Bestand 2018	4%	(BFS, 2019b)	G3	
	Anteil bei Heizungsersatz	4% (2018) 4% (2030)	(TEP Energy & Ecoplan, 2019)	G3	Lineare Entwicklung.
	Emissionsfaktor	44.7 [tCO ₂ /TJ]		G3	
	Unterhaltskosten [CHF/Jahr]	0.1 [CHF/kWh]	Wettbewerbskommission 2014	G3	
Gebäudehülle	Durchschnittliche Energiebezugsfläche	290 m ²	(BFS, 2019c) Allgemeine Übersicht "Gebäude" und (BFE, 2019a) Gebäudebestandesentwicklung 1990 - 2017	G3	Berechnet für Wohngebäude. Selbe Annahme übernommen für Dienstleistungsgebäude.
	Sanierungskosten pro Gebäude für Wärmebedarf-Reduktion von 23.1 MWh/Jahr auf 7.3 MWh/Jahr	90 000 [CHF]	(energieheld, 2020)	G3	Berechnet basierend auf Preisdaten von www.energieheld.ch

A. 1. 5. Industriesektor

Tabelle A 11. Übersicht über die Massnahmen und Annahmen im Industriesektor.

#	Massnahme	Annahmen
11	Erdgasersatz für Prozesswärme Erdgas, das in der Industrie für Prozesswärme benutzt wird, wird durch Biogas ersetzt	Das maximale jährliche Potential der Biogasherstellung in der Schweiz von 3.7 TWh/a wird im Jahr 2030 erreicht. Im Referenzfall wird ein konstanter Biogasanteil von 1% angenommen.

I2	Kohleersatz Zementindustrie Die Kohle, die in der Zementindustrie für Prozesswärme benutzt wird, wird durch alternative Brennstoffe ersetzt.	Im Referenzfall wird eine lineare Steigerung der Ersatzbrennstoffe von 65% auf 70% bis 2030 angenommen. Bei der Massnahme wird eine lineare Steigerung der Ersatzbrennstoffe von 65% auf 100% bis 2030 angenommen.
----	---	---

Tabelle A. 11. Übersicht über die Annahmen und Berechnungsgrundlagen im Industriesektor.

	Grösse	Wert	Quelle	Massnahme	Kommentar
Biogas	Prozesswärme aus Methan in Industrie	39 230 [TJ/Jahr] (2018) 31 410 [TJ/Jahr] (2030)	(BFE, 2019b) Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2018, T17b (Prognos, 2013) Energieperspektiven POM	I1	Lineare Entwicklung. Zukünftige Entwicklung wird für das Referenzszenario benutzt.
	Anteil Biogas Referenzfall	1%	(BFE, 2019b) Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2018, T23	I1	
	Maximal jährliches Potential Biogasherstellung	3.7 [TWh/a]	(E-CUBE Strategy Consultants, 2018)	I1	
	Emissionsfaktor Erdgas	56.3 [tCO ₂ eq/TJ]	(BAFU, 2019a)	I1	
	Emissionsfaktor Biogas	21.9 [tCO ₂ eq/TJ]	(Zah & Del Duce, 2015)	I1	Ökobilanz von Quantis für Energie360°
	Erdgaspreis	0.061 [CHF/kWh]	(BFS, 2020a)	I1	Ohne Steuern und Abgaben.
	Biogasgestehungskosten	0.158 [CHF/kWh]	(E-CUBE Strategy Consultants, 2018)	I1	Annahme zu Anteilen Landwirtschaft / Kläranlage basierend auf (BFE, 2019c): 2/3 landwirtschaftliche Nebenprodukte zu 0.185 CHF/kWh, 1/3 Kläranlage zu 0.105 CHF/kWh
	Kohleersatz	Kohleverbrauch Industrie 2018	3 352 [TJ/Jahr]	(BFE, 2019b) Gesamtenergiestatistik	I2
Anteil Steinkohle		33%	(Bütler, 2019)	I2	
Anteil Braunkohle		67%	(Bütler, 2019)	I2	
Anteil Ersatzbrennstoffe 2018		65%	(CemSuisse, persönliche Kommunikation, Mai 2020)	I2	
Heizwert Steinkohle		0.0255 [TJ/t]	(BAFU, 2019a)	I2	
Heizwert Braunkohle		0.0236 [TJ/t]	(BAFU, 2019a)	I2	
Heizwert Ersatzbrennstoffe		0.0166 [TJ/t]	(BAFU, 2019a)	I2	Durchschnitt über die folgenden Ersatzbrennstoffe: Altöl, Kunststoffe, Lösungsmittel, imprägniertes Sägemehl,

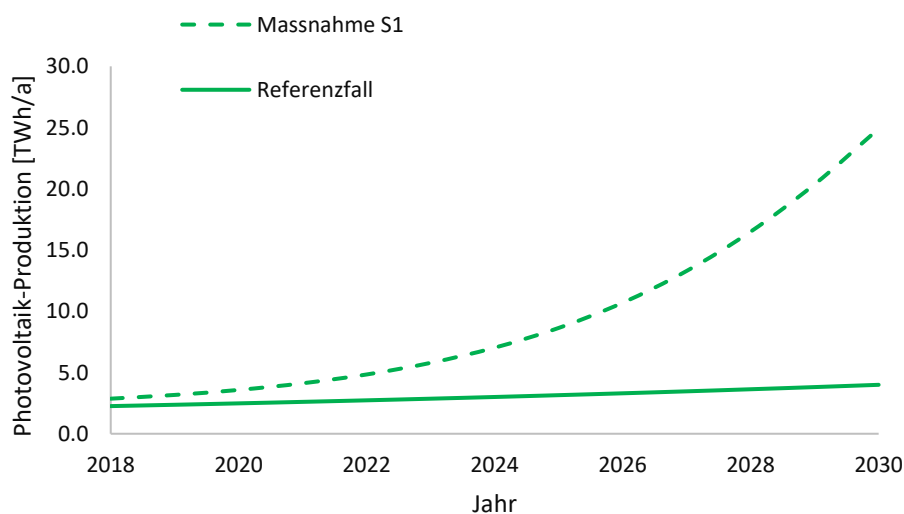
				Altpneus, Sägemehl, Trockenklärschlamm, Tiermehl
Emissionsfaktor Steinkohle	92.7 [tCO ₂ /TJ]	(BAFU, 2019a)	I2	
Emissionsfaktor Braunkohle	96.1 [tCO ₂ /TJ]	(BAFU, 2019a)	I2	
Emissionsfaktor Ersatzbrennstoffe	41.1 [tCO ₂ /TJ]	(BAFU, 2019a)	I2	Durchschnitt über die folgenden Ersatzbrennstoffe: Altöl, Kunststoffe, Lösungsmittel, imprägniertes Sägemehl, Altpneus, Sägemehl, Trockenklärschlamm, Tiermehl
Steinkohlepreis	100 [CHF/t]	Berechnet basierend auf BAFA. Drittlandskohlepreis.	I2	Verändert sich analog zum Ölpreis
Braunkohlepreis	50 [CHF/t]	Berechnet basierend auf Umweltbundesamt 2017. Daten und Fakten zu Braun- und Steinkohlen.	I2	Verändert sich analog zum Ölpreis
Preis Ersatzbrennstoffe	-100 [CHF/t] (2018) 0 [CHF/t]	(Bütler, 2019)	I2	Da Konkurrenz für Ersatzbrennstoffe grösser wird, nimmt der Abnahmepreis bis 2030 auf 0 ab.

A. 1. 6. Stromsektor

Tabelle A 12. Übersicht über die Massnahmen und Annahmen im Stromsektor.

#	Massnahme	Annahmen
S1	Ausbau Photovoltaik Die Photovoltaikkapazitäten werden massiv ausgebaut.	Bei der Massnahme wird der von Rohrer (2020) geschätzte maximale Ausbau bis 2030 umgesetzt. Die Zunahme erfolgt exponentiell (siehe Abbildung A. 2a).
S2	Ausbau Windenergie Die Windenergiekapazitäten werden massiv ausgebaut.	Bei der Massnahme wird das mögliche Wind-Potential bis 2050 voll ausgeschöpft. Die Zunahme erfolgt linear. Abbildung A.2b zeigt die Werte bis 2030.

a)



b)

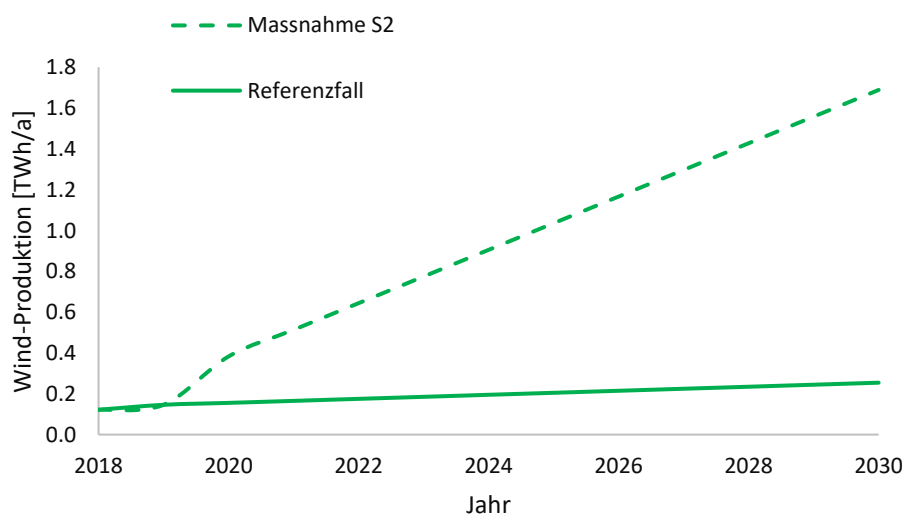


Abbildung A. 1. Angenommene Entwicklung der inländischen a) Photovoltaikproduktion und b) Windenergieproduktion im Referenzfall und den Massnahmen S1 und S2.

Tabelle A 13. Übersicht über die Annahmen und Berechnungsgrundlagen im Stromsektor.

	Grösse	Wert	Quelle	Massnahme	Kommentar
Allgemein	Stromgestehungskosten Referenzfall	74 [CHF/MWh]		S1, S2	Siehe sektorenübergreifende Annahmen
	Emissionsfaktor Strom 2030	50.1 [gCO ₂ eq/kWh]		S1, S2	Siehe sektorenübergreifende Annahmen
Photovoltaik	Stromproduktion 2018	2.39 [TWh/Jahr]	(Swissolar, 2020)	S1	
	Stromproduktion Referenzfall 2030	4 [TWh/Jahr]	(Prognos, 2013) POM Variante E.	S1	Exponentielle Zunahme
	Stromproduktion Massnahme 2030	25 [TWh/a]	(Rohrer, 2020)	S1	Exponentielle Zunahme
	Emissionsfaktor	0		S1	
	Lebensdauer PV-Anlage	30 Jahre	(Swissolar, 2014) Ökobilanz der Stromerzeugung durch Photovoltaik	S1	Konservative Annahme; Quelle nennt 30 bis 40 Jahre.
	Investitionskosten 2018	1789 [CHF/kWp]	(Rohrer, 2020)	S1	
	Jährliche Reduktion Investitionskosten	3% p.a.	(Rohrer, 2020)	S1	
	Unterhaltskosten	0.03 [CHF/kWh]	(Swissolar, 2020) Kostenrechner	S1	
	Jährliche Reduktion Unterhaltskosten	3% p.a.	(Rohrer, 2020)	S1	
	Windenergie	Stromproduktion 2018	0.12 [TWh/a]		S2
Stromproduktion Referenzfall 2030		0.25 [TWh/a]	Produktionswerte von Eole (statista, 2020)	S2	Lineare Zunahme (lineare Extrapolation der Produktion 2010 bis 2019)
Stromproduktion Massnahme		1.7 [TWh/a] (2030) 4.3 [TWh/a] (2050)	(Stalder, 2019) Zielwert BFE und "realisierbares Potential" gemäss Eole	S2	Lineare Zunahme
Emissionsfaktor		0		S2	
Lebensdauer Windkraftanlage		25 Jahre	(Suisse-Eole, o. J.-b)		
Investitionskosten (2018)		2250 [CHF/kWp]	(VSE, 2020)	S2	Lineare Entwicklung
		2030 [CHF/kWp] (2030)			

Unterhaltskosten	3% der Investitionskosten	(Suisse-Eole, o. J.-a)	S2
------------------	---------------------------	------------------------	----

A. 1. 7. Land- und Forstwirtschaftssektor

Tabelle A 14. Übersicht über die Massnahmen und Annahmen im Land- und Forstwirtschaftssektor.

#	Massnahme	Annahmen
L1	Wiedervernässung von Hochmooren Hochmoore werden wiedervernässt, um die Oxidation und Emission von im Boden gespeichertem Kohlenstoff zu verhindern.	Bei der Massnahme ist bis 2030 das mögliche Potential ausgeschöpft, da alle Hochmoore wiedervernässt sind. Im Referenzfall wird kein Hochmoor wiedervernässt.

Tabelle A 15. Übersicht über die Annahmen und Berechnungsgrundlagen im Land- und Forstwirtschaftssektor.

	Grösse	Wert	Quelle	Massnahme	Kommentar
Wiedervernässung Hochmoore	Lebensdauer Massnahme	50 Jahre	(Gubler, 2017b)	L1	
			max.moor		
	Fläche der Hochmoore in der Schweiz	15 [km ²]	Gubler 2017	L1	
	Vernässungsbedürftigkeitsgrad	2/3	(Gubler, 2017a)	L1	
	Durchschnittliche Torfschicht	0.5 [m]	(Gubler, 2017b)	L1	
			max.moor		
	CO ₂ eq-Ausstoss über 50 Jahre ohne Massnahme	975 [tCO ₂ /ha]	(Gubler, 2017b)	L1	Inklusive 5% Puffer
			max.moor		
	Investitionskosten ohne Planung	78 065 [CHF/ha]	(Gubler, 2016)	L1	
Anteil Planungskosten	20%	Gubler 2020 (mündliche Aussage)	L1		
Investitionskosten mit Planung	97'581 [CHF/ha]		L1		
Unterhaltskosten	0 [CHF/Jahr]		L1		