

Langzeitbewertung von Treibhausgasemissionen in Österreich

HBLFA Raumberg-Gumpenstein



Forschungsbericht

Langzeitbewertung von Treibhausgasemissionen in Österreich

Dr. Thomas Guggenberger

Dr. Georg Terler

Dr. Markus Herndl

Mag. Christian Fritz, MA

DI Florian Grassauer

HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Raumberg 38, 8952 Irdning-Donnersbachtal

thomas.guggenberger@raumberg-gumpenstein.at

Zitiervorschlag:

Guggenberger, T.; Terler, G.; Herndl, M.; Fritz, C. und Grassauer, F. (2022): Langzeitbewertung von Treibhausgasemissionen in Österreich. Forschungsbericht der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, 33 Seiten.

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:

HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Landwirtschaft

Raumberg 38, 8952 Irdning-Donnersbachtal

raumberg-gumpenstein.at

Für den Inhalt verantwortlich: Die Autoren

Korrespondierender Autor: Dr. Thomas Guggenberger,

email: thomas.guggenberger@raumberg-gumpenstein.at

Fotonachweis: HBLFA Raumberg-Gumpenstein/Dr. Guggenberger

Gestaltung: Sigrid Brettschuh

Lektorat: Brigitte Marold

Alle Rechte vorbehalten

Irdning-Donnersbachtal 2022

Langzeitbewertung von Treibhausgasemissionen in Österreich

Long-term assessment of greenhouse gas emissions in Austria

Zusammenfassung

Gasförmige Emissionen, Veränderungen in der Landnutzung und andere physikalische Effekte führen dazu, dass sich die Energiebilanz der globalen Atmosphäre seit 1750 effektiv um $+2,72 \text{ W/m}^{-2}$ verändert hat. Diese Veränderung, die wir fachlich Strahlungsantrieb nennen, kennen wir im Alltag als den Begriff der Klimaerwärmung. Österreich ist daran vor allem mit den Treibhausgasen (THG), Kohlendioxid (CO_2), Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4) beteiligt. THG-Emissionen aus Österreich werden in jährlichen Intervallen nach internationalen Regeln berechnet und als Global Warming Potential (GWP) veröffentlicht. GWP normiert die Ergebnisse auf 20 bzw. 100 Jahre. Deshalb ist die Nutzung der Metrik für eine lange Emissionsreihe, diese hat eine eigene Wirkungszeit, wenig sinnvoll. In der Arbeit wird direkt der Strahlungsantrieb, im Original Radiative Forcing (RF) bezeichnet, verwendet. Als RF für ein einzelnes Beobachtungsjahr gilt die Summe des noch aktiven RF vergangener Emissionsjahre. Als grundlegendes Datenmodell wird eine Matrix genutzt, die sowohl die vollständigen Abbauperläufe einzelner Emissionen als auch RF pro Einheit beinhaltet. Der Untersuchungszeitraum beginnt im Jahr 1770 und endet im Jahr 2100. Bis 2020 werden veröffentlichte oder modellierte Emissionsdaten verwendet, danach bis 2100 verschiedene Reduktionspfade als Simulationsgrundlage.

RF wurde für Österreich im Jahr 1890 mit einem Wert von $0,68 \text{ mW/m}^{-2}$ bewertet. Bis 1990 steigt dieser Wert um das 6,5-fache auf $4,44 \text{ mW/m}^{-2}$ an. Obwohl ab diesem Zeitpunkt bereits eine breite Öffentlichkeit von der Klimaerwärmung informiert ist, kann ein weiterer Anstieg bis 2018 auf $6,51 \text{ mW/m}^{-2}$ nicht verhindert werden. Das ist das 9,6-fache des Ausgangsjahres. Szenarien gehen davon aus, dass selbst bei einem ambitionierten Rückgang der Emissionen (z.B. -2% CO_2 , $1,75 \%$ N_2O und $0,75 \%$ CH_4 pro Jahr bis 2060) zumindest ein Wert von $7,77 \text{ mWm}^{-2}$ erreicht wird. Das ist dann bereits das 11,4-fache des Ausgangswertes.

Die Gesamtwirkung kann in die Wirkungsanteile einzelner Treibhausgase zerlegt werden. CO_2 erreicht an den Zeitpunkten 1890/1990/2018/2060 die Werte $0,19/3,44/5,56/7,01 \text{ mWm}^{-2}$. N_2O wurde mit den Werten $0,20/0,41/0,48/0,48 \text{ mWm}^{-2}$ notiert. Für CH_4 ergeben sich in der Zeitreihe $0,29/0,59/0,47/0,28 \text{ mWm}^{-2}$. Die Verläufe der RF-Zeitreihen der THG unterscheiden sich in ihrer Dynamik deutlich. THG-Emissionen die im Kontext biogener Prozesse entstehen (N_2O und CH_4) sind an ihre Produktionsformen gebunden. Eine an den Standort angepasste Landwirtschaft bzw. biogene Müllwirtschaft in Österreich kann die Basiswerte für RF beliebig lange bei etwa $0,7 \text{ mWm}^{-2}$ konstant halten. Dieser Zielwert wird im Jahr 2018 in Österreich um $0,26 \text{ mWm}^{-2}$ überschritten. Das sind 4% der Gesamtwirkung. CO_2 kann nur mit großer Mühe konstant gehalten werden, weil seine infinite Abbaudynamik schon bei sehr niedrigen Emissionsmengen zu einem stetigen Anstieg von RF führt. Die Emissionsmengen pro

Jahr entscheiden dabei nicht über die Entwicklungsrichtung, sondern nur über die Geschwindigkeit des Anstieges.

Einzelne THG, direkt oder in Sektoren, in ihr Verhältnis zu setzen ist eine geübte, aber wenig sinnvolle Praxis. Das zu erwartende Verhältnis zeigt lediglich den Wandel der Agrar- zur Industriegesellschaft. Betrachten wir 1890, so tragen die biogen entstandenen THG in Österreich zu 72 % die Verantwortung für den Anstieg von RF. Im Jahr 2018 liegt dieser Wert bei 15 %. Bei günstiger Entwicklung bis 2060 wird der Anteil bei 9,7 % und bei ungünstiger bis 2100 bei 7 % liegen. Es gilt: Je ungünstiger der Verlauf der CO₂-Emissionen desto höher am Ende des Jahrhunderts RF und umso geringer der Anteil biogener THG und umgekehrt. So entsteht weder Hebel noch Wirkung. Einzelne THG sollen sich nicht aneinander, sondern an ihrem Basisprozess orientieren. Dieser Prozess ist bei biogenen THG die Abweichung zu einer standortgerechten Landwirtschaft/Müllwirtschaft und bei CO₂ die Abweichung zum maximalen technischen Fortschritt in der Substitution fossiler Energie durch erneuerbare Energie. Für alle THG gilt gleichermaßen die Frage nach dem absoluten Einsparungspotenzial durch den Verzicht auf Konsumgüter und Dienstleistungen.

Schlagwörter: Langzeitbewertung, Treibhausgase, Abbaukurven, Strahlungsantrieb, Wirkungswelle, Simulation, Großeltern-Enkel Effekt

Summary

Gaseous emissions, changes in land use and other physical effects have been changing the energy balance of the global atmosphere since 1750 effectively by +2.72 W/m². This change, which we technically call radiative forcing, is known as global warming in everyday life. In this, Austria is primarily involved with the greenhouse gases (GHG), carbon dioxide (CO₂), nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄). GHG emissions from Austria are calculated in annual intervals according to international rules and published as Global Warming Potential (GWP). GWP normalises the results to 20 or 100 years. Therefore, the use of the metric for a persistent emission series, which has its own effective time, makes little sense. In the paper, the radiative forcing (RF) is used directly. RF for a single year of observation is the sum of the still active RF of past emission years. As a basic data model, a matrix is used that contains both, the complete decay histories of individual emissions and RF per unit. The study period starts in 1770 and ends in 2100. Published or modelled emission data have been used until 2020, after which various reduction paths have been used as simulations.

In 1890, RF was assessed for Austria with a value of 0.68 mW/m². By 1990, this value had increased 6.5-fold to 4.44 mW/m². Although a broad public has already been aware of global warming from this point on, a further increase to 6.51 mW/m² by 2018 could not be prevented. This value is 9.6 times the baseline year. Scenarios assume that even with an ambitious reduction in emissions (e.g. -2 % CO₂, 1.75 % N₂O and 0.75 % CH₄ per year by 2060), a value of 7.77 mW/m² will at least be reached. This will then already be 11.4 times the baseline value.

The total impact can be broken down into the impact fractions of individual greenhouse gases. CO₂ reaches the values 0.19/3.44/5.56/7.01 mW/m² in the years 1890/1990/2018/2060. N₂O was noted with the values 0.20/0.41/0.48/0.48 mW/m². For CH₄, the time series shows 0.29/0.59/0.47/0.28

mWm^{-2} . The characteristics of the RF time series of GHGs differ significantly in their dynamics. GHG emissions that arise in the context of biogenic processes (N_2O and CH_4) are linked to their forms of production. A site-adapted agriculture or biogenic waste management in Austria can keep the baseline value for RF constant at about 0.7 mWm^{-2} for any length of time. This target value has been exceeded by 0.26 mWm^{-2} in Austria in 2018. That is 4 % of the total effect. CO_2 can only be kept constant with great difficulty, because its infinite degradation dynamics lead to a steady increase in RF even at very low emission levels. The amount of emissions per year does not determine the direction of development, but only the speed of the increase.

Putting individual GHGs, directly or in sectors, into their ratio is a common but not very useful practice. The expected ratio merely shows the change from an agricultural to an industrial society. If we look at 1890, biogenic GHGs in Austria will bear 72 % of the responsibility for the increase in RF. In 2018, this value lies at 15 %. If the development is favourable until 2060, the share will be 9.7 % and if it is unfavourable until 2100, it will be 7 %. The following applies: the more unfavourable the course of CO_2 emissions, the higher the RF at the end of the century and the lower the share of biogenic GHGs, and vice versa. This neither creates leverage nor effect. Individual GHGs should not be oriented towards each other, but towards their basic process. In the case of biogenic GHGs, this process is the deviation from site-appropriate agriculture/waste management, and in the case of CO_2 , the deviation from maximum technical progress in the substitution of fossil energy with renewable energy. For all GHGs, the question of the absolute savings potential through the renunciation of consumer goods and services applies equally.

Keywords: Long-term assessment, greenhouse gases, decay curves, radiative forcing, impact wave, simulation, grandparent-grandchild effect

1. Einleitung

Treibhausgase (THG) die durch anthropogenes Handeln direkt oder indirekt freigesetzt werden, gelten als Ursache für die zunehmende Erwärmung des globalen Klimas (Myhre et al., 2013). Mit den „Guidelines for greenhouse gas inventories“ hat der Weltklimarat ein Regelwerk für die Bilanzierung von THG-Emissionen erlassen (IPCC, 2006, 2019). Die globale Wirtschaft wird in wenige Sektoren (Energie, industrielle Prozesse, Landwirtschaft, Landnutzung und Andere) unterteilt, innerhalb der Sektoren wurden spezifische Vorschriften zur Berechnung von Emissionen dargestellt. Verschiedene Anwendungstiefen und umfassende Abgrenzungsregeln führen schließlich dazu, dass THG-Emissionen der Produktionsprozesse definiert und in den einzelnen Staaten der Welt nach gleichen Regeln berechnet werden können. Die Mengen verschiedener Treibhausgase stehen am Ende als Sachbilanz bereit. Da jedes Treibhausgas eine individuelle Wirkungsintensität zeigt, muss diese Sachbilanz noch um eine Wirkungsabschätzung erweitert werden (ISO/TC 207/SC 7, 2018). Als Wirkung gilt dabei der Strahlungsantrieb – Radiative Forcing (RF) in $W\ m^{-2}$ – der dynamisch berechnet werden kann (Bellouin, 2015, Etamin et al., 2016, Shine et al., 2005). Die Summe des gesamten Strahlungsantriebs aller Emissionen ist die direkte, physikalische Wirkungskraft der Klimaerwärmung.

Aus Gründen der Vereinfachung der Multiplikation von Menge und Wirkung wurde bereits in der Frühzeit der THG-Bilanzierung ein Faktorensystem eingeführt, das jedes THG auf die Wirkung von CO_2 normiert. Dies hat den Vorteil, dass das Bezugssystem der Massen nicht verlassen werden muss. Als Global Warming Potential (GWP) wird dafür ein Faktorverhältnis des RF von CO_2 zu anderen THGs innerhalb eines zu vereinbarenden Beobachtungszeitraumes berechnet (Myhre et al., 2013). In jenem Augenblick in dem nun ein Zeitraum festgelegt wird, und zwar ungeachtet seiner Länge, verlässt das Berechnungskonzept die naturwissenschaftliche Ebene und wird zum Steuerungswerkzeug für Emissionsmengen im Sinne der eigenen Definition.

Das grundsätzliche Dilemma das dabei entsteht ist die Tatsache, dass sehr kurze Zeiträume kurzlebige THG überproportional darstellen und damit ein Handlungspotenzial signalisieren das zwar schnell, aber insgesamt nur schwach wirken kann. Sehr lange Zeiträume geben den kurzlebigen THG wenig Bedeutung und die Stakeholder der Klimadebatte sehen sich um eine Handlungsoption geprellt. Als Mittelweg in diesem Dilemma hat sich GWP100 als Quasistandard für die Emissionsberichterstattung nach den IPCC-Guidelines fest etabliert. Immer auf den Augenblick der Emission gerichtet kann die Dynamik der Entwicklung im Strahlungsantrieb nicht ausreichend beobachtet werden und der Fokus bleibt starr auf der Gewichtung einzelner Treibhausgase. Dass dies weder aus der Sicht der Kontrolle gegenwärtiger Wirkungen noch aus der zukünftigen Verantwortung für die globale Entwicklung eine gute Wahl war, wird in der Welt der Wissenschaft laufend besprochen (Allen et al., 2016, Archer und Brovkin, 2008, Fuglestedt et al., 2003, Lynch et al., 2020, Pierrehumbert, 2014, Shine, 2009, Shine et al., 2005, Smith und Wigley, 2000). Diese Arbeit berechnet alle angesprochenen Metriken mit einer sehr langen Zeitreihe um:

- die Dynamik der Emissionswirkungen sichtbar zu machen,
- die aktuellen Werte für RF und AGWP in Österreich zu berechnen,
- über zwei unabhängige Simulationen die Reduktionswirkung von RF bis 2040 bzw. 2060 zu bewerten,
- die Ergebnisse in eine Generationszeitreihe in Österreich einzutragen,
- die Metriken zu vergleichen.

2 Methode

2.1 Emissionsdaten und Wirkungsdynamiken

Um Fehlinterpretationen von Anfang an zu vermeiden: Die Emissionsdaten der TGH-Inventur stehen außer Frage. Es ist die Bewertung die wir besprechen wollen. Der wesentliche Beitrag liegt dabei in einer umfassenden Betrachtung der zeitlichen Wirkungsdynamiken. *Abbildung 1* zeigt, dass in der Methodenentwicklung die Emissionsmengen von CO₂, N₂O und CH₄ aus der nationalen Emissionsbericht-erstattung als Basis zur Berechnung eines jährlichen Strahlungsantriebs (RF) entlang der Zeitachse (A) und zur Abschätzung des Absolut Global Warming Potential (AGWP) (B) verwendet wird. AGWP berechnet das zukünftige Gesamtwirkungspotenzial einer Emission. Als Einheit für die Darstellung der Ergebnisse wird Watt, dass ist die SI-Einheit für Leistung und als räumliche Referenzgröße ein

m² verwendet. Im Falle von B wird die Einheit um den zeitlichen Aspekt des Jahres (J) erweitert. Dies darf als Hinweis auf das Integral über die Zeit verstanden werden. Die zeitliche Komponente wird mit Pfeilen in *Abbildung 1* angedeutet. Entlang der X-Achse im erstellten Datenmaterial ist die Selektion und zeitliche Projektion der einzelnen Wirkungen möglich, die angedeutete Y-Achse steht für den Prozessablauf.

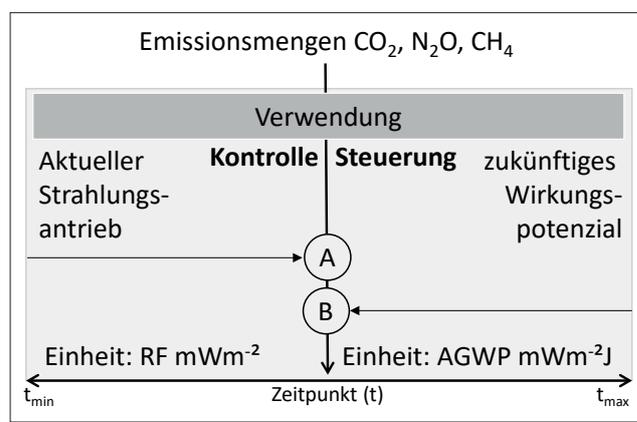
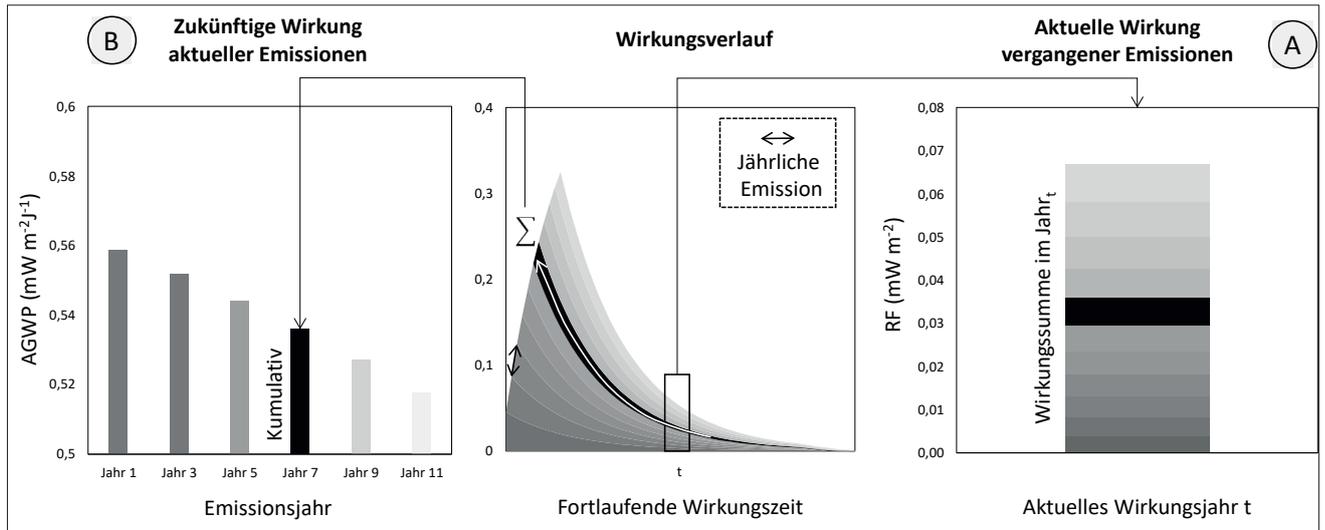


Abbildung 1:
Bewertungsmethoden
zur Langzeitbilanzierung
von Treibhausgasen

Bildbeschreibung: Aus langen Zeitreihen von Emissionsdaten berechnen die Methoden RF und AGWP vergangene und zukünftige Wirkungen.

Wir werden uns nicht weiter mit den Emissionsmengen befassen, sondern vielmehr die Verwendungsmöglichkeiten von (A) und (B) herausarbeiten. Um den Nutzen zu akzeptieren, ist es sinnvoll den Algorithmus des Datenaufbaues zu verstehen:

- Datenvorbereitung:** Aus den jährlichen Emissionsdaten wird der gesamte Wirkungspfad einer einzelnen Emission rekonstruiert. In *Abbildung 2*, Mitte, wird das für 11 aufeinander folgende Jahre dargestellt. Der Wirkungsimpuls eines einzelnen Jahres (kurzer Doppelpfeil an der vorderen Flächenkante) wird bei der Emission ausgelöst und baut sich über einen THG-spezifischen Zeitraum wieder langsam ab. Jedes Folgejahr verstärkt den Impuls. Es baut sich eine Wirkungswelle mit einer zunehmenden Amplitude auf. Der Anstieg endet mit dem Ende der Beobachtung oder dem vollständigen Einstellen der Emissionen an der vorderen Kante der Welle. Alle Impulse die rechts davon noch als Fläche sichtbar sind, gelten als zukünftige Wirkung und müssen im Laufe der Zeit abgearbeitet werden.
- Aktueller Strahlungsantrieb vergangener Emissionen (A):** Aus den unter a.) aufbereiteten Daten, dort trägt jeder Wirkungsimpuls auch das Emissions- und Wirkungsjahr, kann sehr einfach die Summe aller Einzelwirkungen in beliebigen Jahren selektiert werden. *Abbildung 2*, rechts, zeigt jenen Stapel der sich beim Schnitt durch die Gesamtwelle zum Zeitpunkt t ergibt. Diese Summe



Bildbeschreibung: Mit jedem Emissionsjahr entsteht ein Wirkungsverlauf der sich in Summe mehrerer Jahre zu einer Wirkungswelle aufbaut. Schneiden wir diese an einer bestimmten Stelle, erhalten wir den aktuellen Strahlungsantrieb RF. Summieren wir die Gesamtwirkung einer Emission erhalten wir den zu verantwortenden Gesamtimpuls AGWP.

Abbildung 2: Methode zur Zerlegung und Aggregation von Wirkungsverläufen

entspricht dem potenziellen Strahlungsantrieb (RF) im beobachteten Jahr. Da der Großteil des Wirkungsimpulses in der Vergangenheit entstanden ist, zeigt RF die Konsequenzen des eigenen Handelns auf.

c. Zukünftiges Wirkungspotenzial: Ein einzelner Wirkungsimpuls kann über seine Abbaukurve bis zum Wirkungsende nachverfolgt werden (siehe *Abbildung 2*, links). Das Konzept des Absolute Global Warming Potential (AGWP) wurde der Grundformulierung von GWP entnommen. Weil mit der Emission jeder Einheit an THG die volle Verantwortung für die Gesamtwirkung einhergeht, ist AGWP besonders gut für zukünftige Entscheidungen geeignet. Ob diese durch die Stärke des Impulses oder die Länge der Wirkung dominiert wird, ist vorerst unerheblich. Wir wollen den Aspekt aber noch am Ende diskutieren.

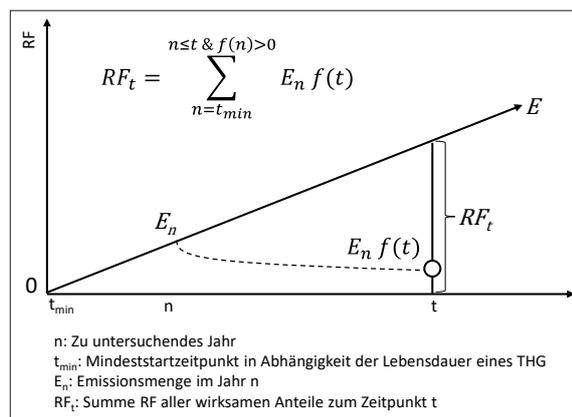


Abbildung 3: Berechnung von RF_t (Eigenentwurf)

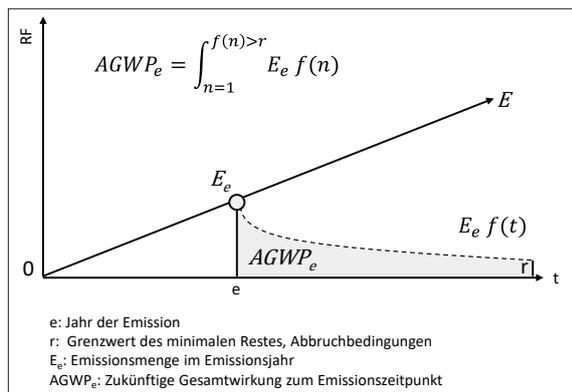


Abbildung 4: Berechnung von $AGWP_e$ nach Myhre et al. 2013

Bildbeschreibung zu Abbildung 3 und 4: RF zum Zeitpunkt t ist die Summe aller noch wirksamen Anteile vergangener Emissionen E zwischen t_{\min} und t . Wichtig für die Vollständigkeit von t ist, dass t_{\min} so früh angesetzt wird, das vor dem Zeitpunkt t der wesentliche Teil einer vollen Funktionsperiode von $f(t)$ bereits durchlaufen werden konnte. AGWP zum Zeitpunkt e entspricht dem Integral einer Emission E die sich zwischen dem Emissionszeitpunkt e bis zum Erreichen der Abbruchbedingung r bestimmen lässt.

Sowohl für *Abbildung 3* als auch für *Abbildung 4* spielt $f(t)$ eine zentrale Rolle. Diese Funktion repräsentiert RF für eine Emissionseinheit eines THG das sich aus der Abbaufunktion des THG zum Zeitpunkt t und der physikalischen Wirkung des THG ergibt. Ausführlich wird das im nächsten Kapitel besprochen.

2.2 Die Abbaugeschwindigkeit der Treibhausgase

Der Weltklimarat veröffentlicht in seinen Sachbestandsberichten für Lachgas (N_2O) eine Lebensdauer von 121 Jahren und für Methan (CH_4) von 12 Jahren (IPCC, 2021). Für beide Gase wurden verlässliche Zerfallsprozesse in der Atmosphäre beschrieben (Oxidation mit $O_2|OH$ -Radikale für CH_4 , Photolyse für N_2O) (Rast, 2014), weshalb bei ihrem Abbau typischerweise physikalische Zerfallsgesetze angewendet werden können. Dessen mathematische Grundfunktion ist die Exponentialfunktion. Diese führt per Definition zu einer zeitlich degressiven Zerfallsgeschwindigkeit die sich langsam in Richtung 0 bewegt. In *Formel 1* wird die jeweilige Lebensdauer des Treibhausgases LT eingesetzt, t beschreibt die zeitliche Differenz zwischen dem Emissionsjahr und dem aktuellen Jahr. Sobald 99 % der Emissionen abgebaut wurden (Abbruchbedingung r aus *Abbildung 4*), bricht der Algorithmus der auf die Daten angewandt wurde eine weitere Berechnung ab. r wird für N_2O nach 550 Jahren und für CH_4 nach 55 Jahren erreicht. Das zweite multiplikative Glied der Formel, $RF(t, THG)$ ist die Wirkungsabschätzung einer Emissionseinheit von THG zum Zeitpunkt t . Die Berechnung wird weiter unten dargestellt.

Formel 1: Bestimmung des zeitlichen Abbaugradienten des Zerfallsgesetzes

$$f(t, THG) = e^{-1/LT t} \times RF(t, THG), THG = N_2O, CH_4$$

Abbildung 5 zeigt den Verlauf des Zerfallsgesetzes (*Formel 1*) von N_2O und CH_4 als strichlierte Linie die sich gegen 0 richtet. Die Hälfte der Emissionen sind in dieser Form bei N_2O nach 84 Jahren und bei CH_4 nach 8,3 Jahren zerfallen. Zum Zeitpunkt der aktuellen Angaben der Lebensdauer durch das IPCC sind sowohl für N_2O als auch für CH_4 noch 36 % der Emissionsmenge aktiv. Das bedeutet, dass der Begriff der Lebensdauer vom IPCC nicht absolut, sondern relativ zum Restwert der Emissionsmenge bestimmt wurde.

CO_2 wird in der Atmosphäre nicht chemisch oder physikalisch zerlegt, sondern ist eine Teilkomponente im globalen C-Kreislauf. Dessen Entlastung kann nur über die kommunizierenden Pools aller Komponenten im Kreislauf stattfinden. Die C-Freisetzung aus fossilen Lagern ist dabei eine singuläre Größe. Alle anderen Pools stehen in eigenständigen Kreisläufen. Wirksam sind dabei die Bilanzen aus C-Aufnahme und C-Freisetzung im aquatischen Kreislauf und die C-Bilanz die sich in der Biomassebildung zwischen Photosynthese und Respiration bei den Pflanzen bzw. Auf- und Abbau bei den Böden ergeben. Bedeutende Kapitel der IPCC-Berichterstattung sind diesem Thema gewidmet. Aus weitreichenden

Studien ist das Bern Carbon Cycle Modell (BCCM) hervorgegangen. Aus Joos et al. 2013, Fig 1a, wurde für das Detailmodell Bern3D-LPJ eine hohe Anzahl von Wertepaaren zwischen der Abbaugeschwindigkeit (Fraction of CO₂ impulse remaining) und der Abbauzeit (years after pulse) entnommen. Daraus wurde Formel 2 mit einem R² von 0,9919 abgeleitet.

Formel 2: Abbaufunktion für CO₂ (nach Joos et al., 2013)

$$f(t, CO_2) = (-0.093615683 * \text{Log}(t) + 1) \times \text{RF}(t, CO_2)$$

Als zentrales Element bestimmt der Logarithmus der Abbauzeit den Kurvenverlauf von Formel 2. Nach 35 Jahren ist dabei 1/3 der wirksamen Emissionsmenge zerfallen. Nach 860 Jahren sinkt die noch wirksame Menge auf jene 36 % die bei N₂O und CH₄ zur Angabe eines Lebensalters geführt haben. Das für CO₂ vom IPCC keine Lebensdauer nach diesem Muster mehr angegeben wird, liegt daran, dass der logarithmische Kurvenverlauf zu keinem Endergebnis führen kann. Die Kurve von BCCM läuft flach aus, nach 2.000 Jahren sind immer noch 29 % der Emissionen wirksam. Bei einer Untersuchung von 15 Modellen wurde festgestellt, dass das noch sehr optimistisch ist und der Wert auch noch bei 40 % liegen könnte (Joos et al., 2013). *Abbildung 5* zeigt den Verlauf des BCCM

(Formel 2) für CO₂ als durchgezogene Linie die wegen der Abbruchbedingung (r=36 % Restwirkung) nach 860 Jahren abrupt endet.

Auch wenn der erste Teil von Funktion f(), das ist die Abbaufunktion nun bestimmt wurde und die Wirkungsabschätzung eines TGH umgehend folgt, kann schon aus *Abbildung 5* ein zentrales Problem mit den verschiedenen THG erkannt werden. Für N₂O und CH₄ gibt es einen mehr oder wenigen rasch erreichbaren Zeitpunkt der vollständigen Zersetzung. Für CO₂ wird dieser Zeitpunkt erst in einer so fernen Zeit liegen, dass wir für die Wahrnehmung menschlicher Zeiträume von Infinität (∞) sprechen müssen. *Tabelle 1* zeigt welche Gesamtmenge aus einer Emissionseinheit hervorgeht, wobei wie mehrfach betont, CO₂ nur deshalb nicht ∞ ist, weil wir uns zu einer Abbruchbedingung entschieden haben. Normiert auf den kleinsten Mengenabdruck ist die Gesamtmenge von N₂O 10,5 mal und von CO₂ 34,6 mal so hoch als CH₄.

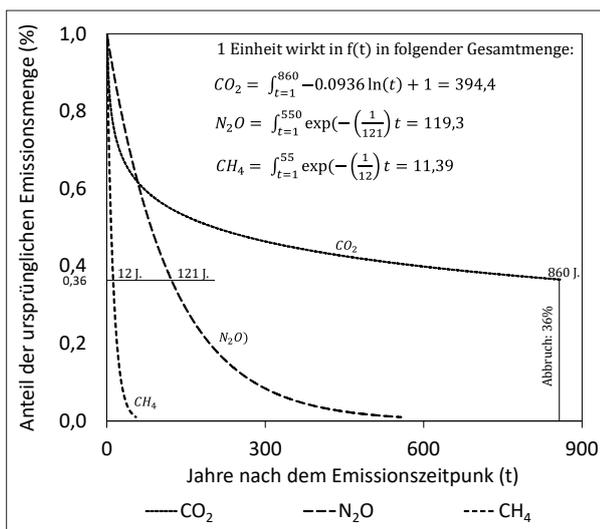


Abbildung 5: Abbaugeschwindigkeit von Treibhausgasen

Bildbeschreibung: Einzelne Treibhausgas bauen sich nach der Emission entlang einer Zeitachse unterschiedlich rasch wieder ab. Der wesentlichste Anteil für den individuellen Kurvenverlauf geht von der mathematischen Grundfunktion aus. Die jeweilige Fläche unter der Kurve kann als Wirkung einer Gesamtmenge über die Gesamtdauer verstanden werden. Aktuelle Metriken schneiden diese Abbildung sehr weit links auf der Zeitachse.

Tabelle 1: Mengenwirkung verschiedener TGH nach ihrer Abbaufunktion

Eine Einheit des THG wirkt mit dem individuellen f(t) in folgender Gesamtmenge		
CO ₂	N ₂ O	CH ₄
394,4	119,3	11,39
34,6	10,5	1

2.3 Die physikalische Wirkung der Treibhausgase

Die Energiebilanz der Erde wird durch die Primärenergie der Sonne bestimmt. Sie führt mit ihrer elektromagnetischen Strahlung permanent 342 Wm⁻² zu. Über verschiedene Reflexions-, Absorptions- und Emissionspfade stellt sich, ausgehend von diesem Energieimpuls, jenes für uns überlebensnotwendige Bilanzgleichgewicht in der Atmosphäre ein das wir als Treibhauseffekt bezeichnen. Durch die Erhöhung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre steigt seit längerem die atmosphärische Gegenstrahlung während die austretende Strahlung reduziert wird. Wie wir empirisch erleben müssen, reichen hier bereits geringe Bilanzveränderungen aus, um den Klimawandel voranzutreiben. Im Zeitraum 1750 bis 2019 hat sich diese Bilanz in ihrem effektiven Anteil global um 2,72 W/m⁻² erhöht (Szopa et al., 2021). Die Wirkungen der für uns bedeutenden Treibhausgase können nach der Formelsammlung in *Abbildung 6* berechnet werden (Myhre et al., 2013).

Üblicherweise wird diese Berechnung vollständig mit Messreihen aus der atmosphärischen Konzentration der THG aufgefüllt (Einheit ppm/ppb). Dann wird z.B. für C₀ der Wert aus dem Jahr X und für C der Wert aus dem Jahr X+1 eingesetzt. Das ist sinnvoll, wenn diese Formeln das Ergebnis der globalen Wirkung zeigen sollen. Weil wir im nächsten Kapitel aber eine langjährige nationale Messreihe berechnen wollen und deren Masse in Mt angegeben ist, benötigen wir das Umrechnungskonzept aus der Formelsammlung in *Abbildung 7*. Hier ist die Wirkungsabschätzung einer Einheit im RF gefordert, weshalb sich in der angesetzten Basisberechnung C von C₀ um 1 unterscheidet. Um einen erfassbaren Zahlenbereich zu erreichen wurden die Ergebnisse von Wm⁻²kg⁻¹ in mWm⁻²Mt⁻¹ transformiert (Ridoutt, 2020).

Die Ergebnisse in den Formelsammlungen aus *Abbildung 6* und *Abbildung 7* sind dynamisch, weil das Konzentrationsniveau der einzelnen THG die mathematischen Grundfunktionen in ihrem Teilergebnis beeinflussen. In *Abbildung 8* zeigt sich, dass RF bei jedem TGH mit der Konzentrationszunahme abnimmt. Diese Abnahme ist in der etwas älteren Formelfassung in *Abbildung 6* deutlich. In aktuelleren Fassungen fällt der Effekt geringer aus, allerdings ist das Vertrauen in die ältere Fassung für die Messbereiche der letzten 30 Jahre sehr hoch, weil sie die tragende Säule von AR4 und AR5 sind. Von einer Extrapolation in eine fernere Vergangenheit oder Zukunft wird abgesehen, weil mit einer nicht verifizierbaren Fehlerfortpflanzung zu rechnen

$$CO_2 = 5,35 \ln\left(\frac{C}{C_0}\right)$$

$$CH_4 = 0,036(\sqrt{M} - \sqrt{M_0}) \times [f(M, N_0) - f(M_0, N_0)]$$

$$N_2O = 0,12(\sqrt{N} - \sqrt{N_0}) \times [f(M, N) - f(M_0, N_0)]$$

$$f(M, N) = 0,47 \ln[1 + 2,01 \times 10^{-5}(M, N)0,75 + 5,31 \times 10^{-15}M(MN)^{1,52}]$$

$C_0 = CO_2$ in ppm $M_0 = CH_4$ in ppb $N_0 = N_2O$ in ppb
 $C = C_0 + 1$ Einheit: Wm⁻²ppm⁻¹

Abbildung 6: Formelsammlung zur Berechnung des Strahlungsantriebes (RF) der einzelnen Treibhausgase

$$Wm^{-2}kg^{-1}_{THG} = \frac{\frac{RF}{1 \text{ ppm}} \frac{Air \text{ g}}{mol} 10^6}{\frac{THG \text{ g}}{mol} 5,14 \times 10^{18}}$$

$RF = \text{Radiativ Forcing } Wm^{-2}ppm^{-1}$
 $Air = 28,97 \text{ g/mol}$ $CO_2 = 44,01 \text{ g/mol}$
 $CH_4 = 16,04 \text{ g/mol}$ $N_2O = 44,0128 \text{ g/mol}$
 $\text{Atmosphärische Masse} = 5,14 \times 10^{18} \text{ kg}$
 $\text{Skalierungsfaktor: } 10^6$
 $W = 1000 \text{ mW}$ $Mt = 10^9 \text{ kg}$

Abbildung 7: Formelsammlung zur Umrechnung des Strahlungsantriebes (RF) von einer Konzentrationsangabe in eine Massenwirkung

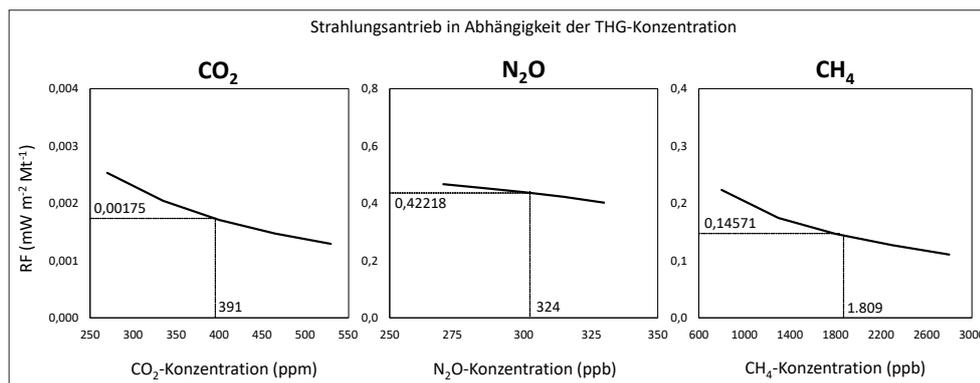


Abbildung 8: Einfluss der THG-Konzentration der Atmosphäre auf den Strahlungsantrieb

Bildbeschreibung: Die Wirkung einzelner THG auf das Ergebnis (RF) hängt auch sehr stark von der aktuellen Konzentration in der Atmosphäre ab. Die Abnahme der Schädigung bei höheren Konzentrationen deutet auf eine Sättigung hin.

ist. Am Ende wurde entschieden, in die Formelsammlungen den Mittelwert aus den Messungen der letzten 20 Jahre am Mauna Loa einzusetzen. Das sind 391 ppm für CO₂, 324 ppb für N₂O und 1.809 ppb für CH₄.

Tabelle 2 zeigt das Ergebnis des gesamten Berechnungsprozesses und löst RF(t, THG) in einem konstanten Wert auf. Dieser wurde für alle weiterführenden Berechnungen genutzt. Wieder wurden alle Ergebnisse mit dem kleinsten Wert, das ist hier CO₂, normiert. Die Ergebnisse ähneln von den Verhältnissen her den Ergebnissen aus der Berechnung von GWP20.

Tabelle 2: Ergebnisse für RF(t, THG) als Konstante

Eine Emission von 1 Mt des THG führt zu folgendem Strahlungsantrieb (RF) in mWm ⁻²		
CO ₂	N ₂ O	CH ₄
0,00174650	0,42218237	0,14570717
1,00	241,73	83,42

2.4 Die Emissionsreihen

Für die Anwendung der in *Abbildung 3* und *Abbildung 4* geplanten Methoden ist nun der gesamte funktionale Teil der Wirkungsabschätzung bekannt und es fehlt nur noch an der Sachbilanz der jährlichen Emissionen (E). Für die Erstellung der notwendigen Emissionsreihen werden zwei verschiedene Vorgehensweisen aneinandergereiht. Im ersten Schritt werden die Werte der anthropogenen THG-Emissionen aus der nationalen Inventur übernommen (UBA, 2021). Im zweiten Schritt wurde für einzelne Treibhausgase aus verschiedenen Quellen entlang der Zeitachse eine Sachbilanz primäre Emittenten erstellt und an die bestehenden Inventurdaten angeschlossen. Für jeden Datensatz wurde abschließend eine Emissionsreihe approximiert. Bedeutend ist dabei, dass für jede Reihe ein möglichst früher Zeitpunkt in der Emissionsgeschichte mit hoher Qualität bestimmt werden kann. So bleibt die Verlässlichkeit der Emissionsreihe am Beginn der eigentlichen Untersuchungsperiode, das ist 1890, möglich hoch. Ganz gelungen ist das aber nicht, weil für N₂O, wie wir nun wissen auch ein sehr langlebiges Treibhausgas, ein Zeitpunkt um 1300 festzulegen wäre. Folgende, vertiefende Informationen können zu den einzelnen Emissionsreihen gegeben werden:

- CO₂ aus fossilen Energiequellen: An den Emissionsdatensatz des Umweltbundesamtes (UBA, 2021) können direkt die jährlichen Emissionen die sich

aus dem Mengenverbrauch an Steinkohle, Erdgas und Erdöl von 1965 bis 1990 (CEIC, 2021) ergeben, angeschlossen werden. Die Jahre zwischen 1945 und 1965 werden durch zwei Referenzen aus dem Archiv der Monatsberichte des Österreichischen Institutes für Wirtschaftsforschung (Walderorff, 1964, Wifo, 1953) abgebildet. Beide Referenzen werden durch eine sehr lange Zeitreihe bis 1830 passend überdeckt (Krausmann und Haberl, 2002). Als Referenzpunkt zu einem frühen Zeitpunkt wurde für Österreich das Jahr 1850 definiert. Die Emissionen zu diesem Zeitpunkt werden mit 0 angenommen. Die Emissionskennlinie in *Abbildung 9* überdeckt die Verbrauchsdepressionen der 1920iger Jahre und des zweiten Weltkrieges. Das bleibt, wegen der noch geringen Emissionsmengen und der langsamen Abbaugeschwindigkeit von CO₂ ohne maßgebliche Wirkung auf die Ergebnisse.

- N₂O: Die N₂O-Emissionen im Jahr 2019 stehen in geringem Anteil direkt mit dem Wirtschaftsdüngeranfall landwirtschaftlicher Nutztiere in Verbindung (18,1 % der gesamten N₂O-Emissionen im Jahr 2019). Im höheren Ausmaß von 57,2 % entsteht N₂O bei der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Böden. Die restlichen 24,7 % werden vor allem von der Verwertung von Müll und von Landnutzungsänderungen geprägt (UBA, 2021). Die Bestimmung einer Emissionskennlinie für N₂O ist schwieriger, weil viele Sektoren und viele Parameter die Sachbilanz mitbestimmen. Die Emissionskennlinie für N₂O wurde für die letzten 30 Jahre aus den Emissionswerten des Umweltbundesamtes entnommen (UBA, 2021). Zwischen 1930 und 2018 wurde zuerst die Einsatzmenge von mineralischem Stickstoff modelliert (BMLFUW, 1985, BMNT, 2019, Wifo, 1962). Diese Daten wurden an die Kurve ab 1990 angeschlossen. Vor dieser Zeit bestehen nur geringe Möglichkeiten zur Rekonstruktion der Emissionskurve über die Sachbilanz. Die tierischen Emissionen können zwar mit der Bewertung von CH₄ mitbestimmt werden, sie machen aber wenig aus. Die Veränderungen in der Landnutzung waren nachweislich vorhanden, Emissionen aus biogenem Müll sind ebenso vorstellbar. Alle Faktoren waren aber im Hinblick auf die Dynamik der gesellschaftlichen Entwicklung wohl noch gebremst. Für die Bestimmung eines frühen Zeitpunktes bleibt vorerst also wohl nur die Schätzung. Am Beginn der industriellen Landwirtschaft im Jahr 1930 wurde nach der beschriebenen Methode ein Wert von 8,5 Kilotonnen (kt) bestimmt. Von diesem Ausgangspunkt aus wurde 1770 als früher Referenzzeitpunkt mit einer Emission von 4,7 kt festgelegt. Ein tieferer Wert ist unwahrscheinlich, da N₂O untrennbar mit dem Stickstoff-Kreislauf von Böden und Pflanzen verbunden ist und selbst im Forstbereich nennenswerte Emissionen gemessen werden können (Kitzler, 2004).
- CH₄: Die aktuellen CH₄-Emissionen entstehen zu 84 % im Sektor Landwirtschaft und zu 16 % im Sektor Abfall (UBA, 2021). In beiden Fällen spielt die bakterielle Umsetzung von Biomasse eine entscheidende Rolle. Besonders bedeutend ist die Form der enterischen Fermentation im Pansen von Wiederkäuer. Diese führt zu 78% der landwirtschaftlichen Emissionen. Die Emissionskennlinie für CH₄ nutzt ab dem Jahr 1990 die Berichterstattung des Umweltbundesamtes. Die Bestimmung eines frühen Zeitpunktes konnte für CH₄ zuverlässiger gelöst werden. Im Jahr 1890 wurde von der K. K. Statistischen Central-Commission ein umfangreiches Zahlenwerk über die Tierbestände und Kategorien auf der räumlichen Ebene der Bezirks-Gerichte veröffentlicht (Österreichische Statistik, 1890). Für die einzelnen Kategorien wurde das Lebendgewicht und die Futteraufnahme festgelegt, um die Algorithmen aus dem Kapitel 5 der IPCC-Guidelines (IPCC, 2006) für die Berechnung zu nutzen. So wurde für das Jahr 1890 ein Wert von 193 kt berechnet (Guggenberger, 2022, in Veröffentlichung). Dieser Wert wurde um 10% für Emissionen aus biogenem Abfall erhöht. Für die Anwendung wurde das Jahr 1860 als früher

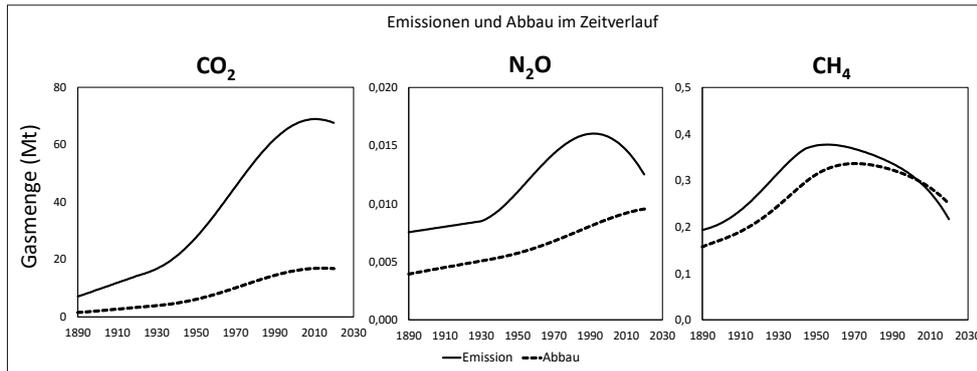


Abbildung 9: Emissionen und Abbau verschiedener Treibhausgase in Österreich zwischen 1890 und 2020

Bildbeschreibung: Die Kurven der Abbildung zeigen das Emissionsverhalten für CO₂, N₂O und CH₄ in Österreich wie im Text beschrieben. Die Dynamik von CO₂ bildet die wirtschaftliche Entwicklungsdynamik Österreichs ab, N₂O und CH₄ werden von den landwirtschaftlichen Produktionsprozessen dominiert. Die Abbildung zeigt einen Bildausschnitt von 1890 bis 2020. Dass auch vor dem Bildausschnitt ein dynamischer Prozess stattfindet ist an der Eingangshöhe der Linien im Jahr 1890 zu erkennen.

Zeitpunkt festgelegt und mit einem Wert von 165 kt definiert. Für den Zeitraum zwischen 1890 und 1990 wurde an mehreren Punkten der Tierbestand modelliert. Das Ergebnis wurde funktional in die qualitativ hochwertigen Anfangs- bzw. Endpunkte der Emissionsreihe eingefügt (siehe *Abbildung 9*). Insgesamt zeigt die Emissionsreihe die Entwicklung der Bedeutung der Wiederkäuerhaltung in Österreich ab 1900.

3 Ergebnisse

3.1 Der Wirkungsverlauf der Emissionen

Wie unter 2.1 erläutert, beginnt die Methodik der Langzeitbewertung von THG mit der Erstellung des gesamten Wirkungsverlaufes aller Emissionen im Untersuchungszeitraum. In *Abbildung 10* zeigen wir die Ergebnisse dieses Schrittes für die einzelnen Jahre nach dem vorgestellten Algorithmus. Schicht um Schicht legen sich die Wirkungsreste nach dem Emissionsjahr auf den Stapel des Strahlungsantriebs bis sich eine Wirkungswelle aufgebaut hat (Timmermann et al., 2020). Die Entwicklung der Gesamtwirkungsverläufe ist typisch für das einzelne Treibhausgas, wobei wir folgende Aspekte als Ergebnis bewerten können:

- a. Die Wellenform: Die Wirkungswellen der einzelnen Treibhausgase in *Abbildung 10* und *Abbildung 11* werden durch mehrere Aspekte gekennzeichnet. Während die äußere Form das Entstehen der Wirkung definiert, zeigt die innere Textur das Verhalten der Wirkung entlang der Zeitachse. Je horizontaler die Linien der Textur verlaufen umso länger dauert die Wirkung an, je vertikaler umso schneller werden Wirkungen wieder abgebaut. Der Mengenimpuls aus *Abbildung 9* wird in der äußeren Form des Wirkungsverlaufes sichtbar. Da sich die X-Achse nun bis zum Wirkungsende erstreckt, verändert sich für CO₂ und N₂O die Lage der Emissionskurve. Der gesamte Impuls wird als Antriebsvektor (Pfeil) in den Emissionsjahren sichtbar. Die Richtung des letzten Teilstückes des Pfeiles zeigt die aktuelle Wirkungsrichtung. Für CO₂ und N₂O wird die Welle in ihrer Amplitude weiterwachsen, weil die Pfeilspitzen noch mit dem Wellenkamm zusammenfallen und nach oben zeigen. Die äußere

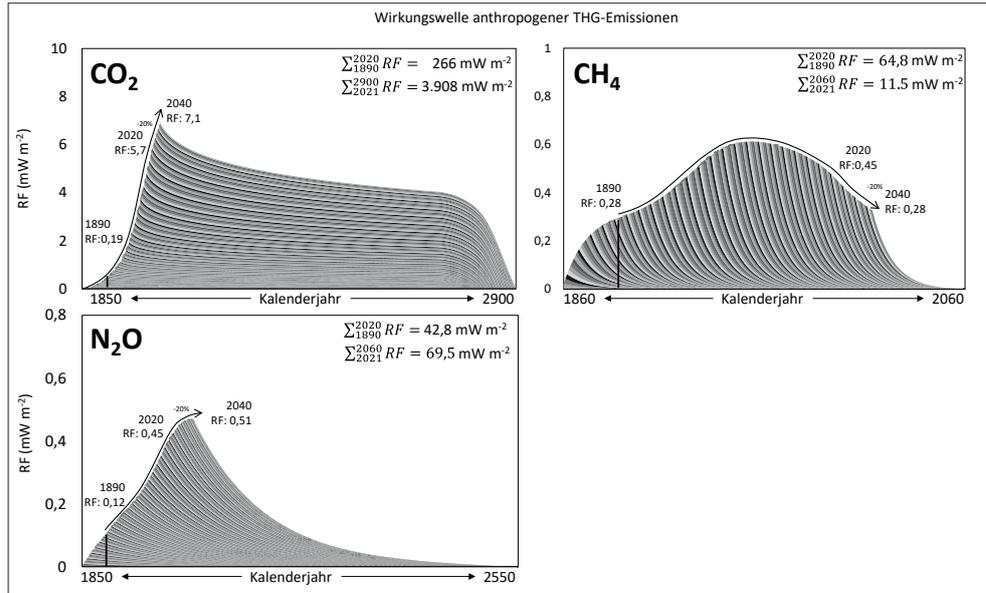


Abbildung 10:
Vollständige Wirkungswelle im anthropogenen Strahlungsantrieb der THG

Bildbeschreibung: Der gesamte Emissionsverlauf der THG-Zeitreihe wird in den verwendeten Methoden als Welle sichtbar (Achtung auf die Skalierung der Achsen!). Die Wellenform in Art und Länge sowie die Höhe der Welle beschreiben die Gesamtwirkung. Wer Erfahrungen mit der Kraft und Wirkung von Wellen am Ozean hat, wird *Abbildung 10* intuitiv verstehen. Der Wirkungsverlauf von CO₂ entspricht in Höhe und Länge etwa jener Welle die im Dezember 2004 nach einem Seebeben im Indischen Ozean in Kao Lak mit einer Höhe von 6-10 Meter an Land gerollt ist. Auch die Länge der Welle entspricht diesem Ereignis. Die Welle von N₂O entspricht jenen Wellen die Wellenreiter für ihre Anfänge benötigen. Nur einen halben Meter hoch und sehr, sehr lang. CH₄ zeigt sich als kurze 50 cm Welle unspektakulär. Das Drama von Dezember 2004 hat allerdings eine Ähnlichkeit mit der Klimaerwärmung: Das starke Seebeben wurde direkt gemessen und die Stärke musste einen Tsunami auslösen. An allen später betroffenen Stränden hätten die Menschen mit Leichtigkeit die Gefahrenzone verlassen können.

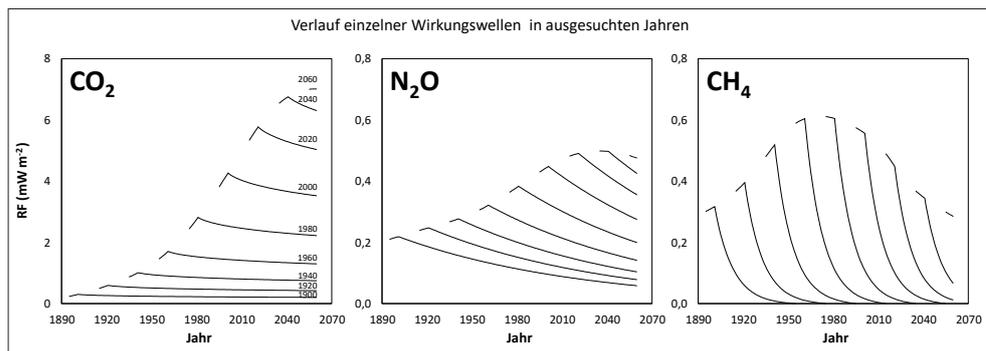


Abbildung 11:
Wirkungswellen im 20jährigen Intervall im anthropogenen Strahlungsantrieb der THG

Bildbeschreibung: In reduzierter Form zeigt die Abbildung ganz deutlich als kurzen Impuls die Ausrichtung der Emissionen am Beginn der Wirkungswelle. Diesem folgt die Wirkungswelle bis sie entweder verebbt ist oder den Zeitrahmen der Abbildung verlässt. Für CO₂ ist deutlich zu sehen wie sich RF im Intervall von 20 Jahren nach oben arbeitet, während das für CH₄ fast gar nie der Fall war. N₂O nimmt eine Mittelstellung ein.

Form der Welle von CH₄ verläuft anders. Der Impuls hat den Wellenkamm schon lange überschritten, die Welle rollt mehr und mehr aus. Die formenden Kräfte der Gesamtwelle sind die Zu-/Abnahmen des Mengenimpulses und die Abbaugeschwindigkeit.

- b. Die Höhe der Amplitude: Die Emissionsmenge ist bei langlebigen THG im Bereich der höchsten Amplituden noch nicht besonders weit abgebaut, weshalb diese vor allem durch die Emissionsmenge und die physikalische Wirkung der THG im RF gekennzeichnet wird. Beide Wirkungen sind je THG unterschiedlich. Während CO₂ besonders stark mengenbestimmt ist, ist N₂O wirkungsbestimmt. CH₄ wird von beiden gleichmäßig beeinflusst. Entlang der Emissionszeit ist die Höhe der Amplitude nicht konstant. Während sie sich bei CO₂ und N₂O immer weiter nach oben bewegt, nähert sie sich bei CH₄ langsam wieder dem frühindustriellen Ausgangsniveau.
- c. Die Restwirkung am Emissionsende der Zeitreihe: Jede Wirkungswelle lässt sich am Ende der Zeitreihe in zwei Teile aufteilen (siehe *Tabelle 3*). Der linke, frühere Teil wurde schon abgearbeitet und hat das Klima erwärmt, der rechte, zukünftige Teil wirkt weiter. Dieser Anteil ist bei CO₂ enorm hoch, und dass obwohl die Funktion zum Abbau nach 860 Jahren abgebrochen wurde. Man bedenke, dass in *Abbildung 10* das Jahr 2040 als Ende der Emissionszeitreihe festgelegt wurde.

Tabelle 3: Kennzahlen einzelner THG in der Gesamtwirkungswelle

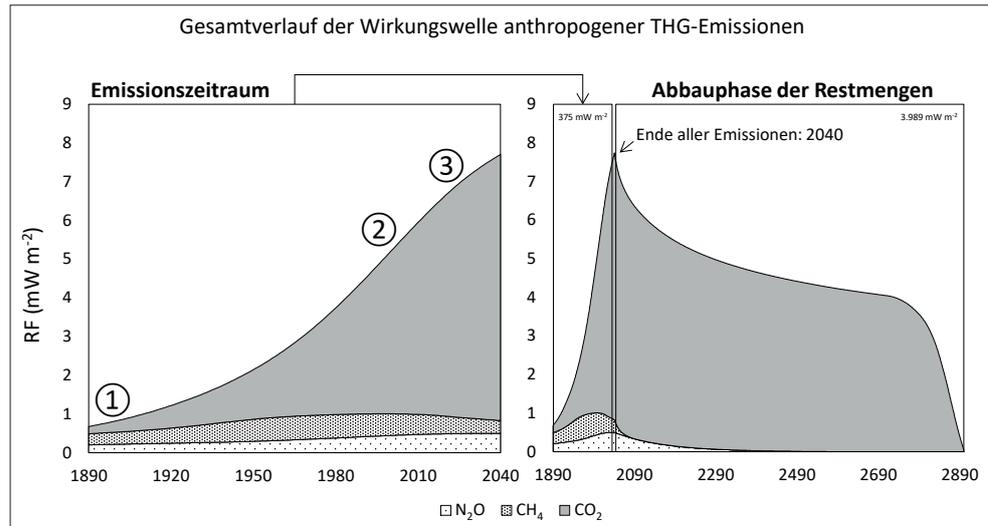
Parameter		Treibhausgase		
Zeitpunkte		CO ₂	N ₂ O	CH ₄
Beginn	Jahr	1850	1770	1860
Emissionsende	Jahr	2040	2040	2040
Maximale RF	Jahr	2040	2040	1987
Wirkungsende	Jahr	2900	2597	2095
Entwicklungsdynamik	Jahr	stark wachsend	wachsend	sinkend
RF-Summe in den Teilbereichen				
<= 2020	mWm ⁻²	267	43	65
> 2020	mWm ⁻²	3.908	69	12
RF-Summe in den Teilbereichen				
<= 2020	%	6,1	1,0	1,5
> 2020	%	89,6	1,6	0,3

Die Wirkungsverläufe der drei Treibhausgase können auch als Summenbild dargestellt werden. In *Abbildung 12*, links, wird der Verlauf bis zum Jahr 2040 gezeigt. Im Vergleich der drei Treibhausgase können wir beobachten, wie die Bedeutung von CO₂ im Laufe der Zeit immer mehr zunimmt und am Ende RF dominiert. Die Zeitpunkte ①, ② und ③ in der Abbildung werden im nächsten Kapitel dazu verwendet, um einige Beispiele für die Methode (A) zu dokumentieren.

In *Abbildung 12*, rechts wird zuerst der linke Bildausschnitt auf die für die Abbildung passende Größe zusammengedrückt, um die noch offene Restwirkung zu zeichnen. Auch wenn N₂O und CH₄ rund um den Emissionszeitpunkt wirksam sind, nach dem Emissionsende werden sie rasch bedeutungslos.

Von der potenziellen Gesamtwirkung der Treibhausgase haben wir von der frühindustriellen Zeit bis zum Jahr 2020 mit 8,6 % erst einen minimalen Anteil abgearbeitet. Die große Restwirkung hinterlassen wir zukünftigen Generationen.

Abbildung 12: Gesamtwirkungswelle aller Treibhausgase



Bildbeschreibung: Das Gesamtbild des Wirkungsverlaufes wird eindeutig von CO_2 bestimmt. Die Größenverhältnisse der Treibhausgase rund um den Emissionszeitpunkt bestätigen aber auch die starke lokale Wirkung (RF) von N_2O und CH_4 . Diese machen insgesamt aber nur 4,4 % der Gesamtwirkung aus.

3.2 Aktueller Strahlungsantrieb (RF) aus vergangenen Wirkungen, Methode A

Obwohl sich der aktuelle Strahlungsantrieb (RF) in einem Jahr nicht mehr ändern lässt – er ist ja nichts anderes als die noch wirksamen Emissionsreste vergangener Jahre – herrscht trotzdem großes Interesse am aktuellen Beitrag einzelner Gase bzw. Sektoren an der Klimaerwärmung. Das liegt wohl vor allem daran, dass im Umfeld der THG-Bewertung starke Differenzierungs- und Steuerungskräfte entstehen.

Für unsere Zeitreihe die wir von 1890 bis 2020 und in Szenarien bis 2040|2060 beobachten, kann RF für jeden Punkt in *Abbildung 10* bzw. *Abbildung 12* abgelesen werden. Wie schon angesprochen, wollen wir drei Zeitpunkte näher untersuchen. Das ist 1890 als ein früher Zeitpunkt in der Epoche der Industrialisierung, 1990 als erstes Jahr mit allgemein veröffentlichten Emissionsmengen des Umweltbundesamtes und 2018 als letztes volles Emissionsjahr vor der Covid-Pandemie. Die in *Tabelle 4* dargestellten jährlichen Werte können hinsichtlich ihrer Höhe und Verteilung so interpretiert werden:

- 1890: In der Frühphase der Industrialisierung dominierten die landwirtschaftlichen Treibhausgase (N_2O und CH_4) mit zusammen 72,4 % den zusätzlichen Strahlungsantrieb. Dieser beträgt insgesamt $0,68 \text{ mWm}^{-2}$. Das entspricht $1/10$ der Wirkung im Jahr 2018.
- 1990: Am Beginn der verpflichtenden Bilanzierungsphase nach völkerrechtlichen Verträgen beträgt der gesamte Strahlungsantrieb bereits $4,4 \text{ mWm}^{-2}$. Der Anteil von Wirkungen aus fossiler Energie hat massiv aufgeholt und beträgt nun 77,5 % der Gesamtwirkung. In der Landwirtschaft geht immer noch der höhere Emissionsanteil von CH_4 aus.
- 2018: Obwohl seit 1990 intensiv diskutiert, in insgesamt 6 umfassenden wissenschaftlichen Werken (Assessment-Report des IPCC) dargestellt und in eine Reihe prioritärer Rechtsgrundlagen aufgenommen, wächst der gesamte Strahlungsantrieb Österreichs seit 1990 um weite 48 % auf $6,5 \text{ mWm}^{-2}$. Bei einem globalen Gesamtwert von $2,72 \text{ W/m}^{-2}$ ist das ein Anteil von 0,24 %.

Tabelle 4: Aktuelle Wirkungen vergangener Emissionen nach der Methode A

Kurzfristig					
Aktueller Strahlungsantrieb					
		CO ₂	N ₂ O	CH ₄	Gesamt
RF mWm ⁻²					
1890	①	0,1868	0,2028	0,2871	0,6767
1990	②	3,4424	0,4136	0,5881	4,4441
2018	③	5,5576	0,4869	0,4703	6,5148
Verteilung %					
1890	①	27,6	30,0	42,4	100,0
1990	②	77,5	9,3	13,2	100,0
2018	③	85,3	7,5	7,2	100,0
THG Index					
1890	①	100,0	100,0	100,0	100,0
1990	②	1843,0	203,9	204,8	656,7
2018	③	2975,5	240,1	163,8	962,7

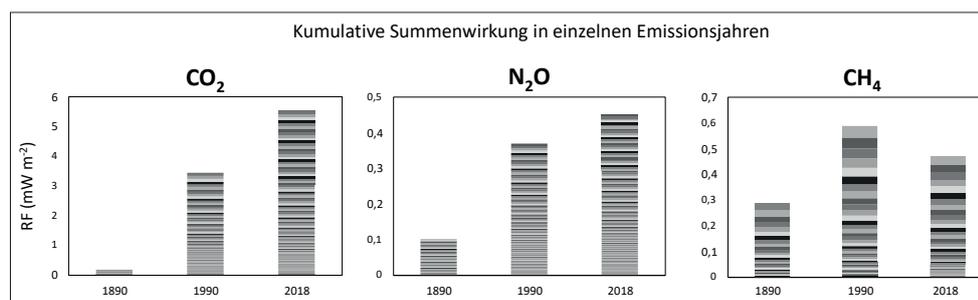


Abbildung 13: Strahlungsantrieb (RF) als Aggregationswirkung der Vergangenheit

Bildbeschreibung: Der Strahlungsantrieb eines Jahres wird bei weitem nicht von den Emissionen im Untersuchungsjahr bestimmt. Nur das letzte Teilstück auf den Säulen in der Abbildung stammt aus dem aktuellen Jahr. Die Gesamtwirkung ähnelt – auch wenn das in diesem Zusammenhang eigenartig klingt – der Gletscherbildung. Jede Emission legt sich auf ältere Emissionen und was bei der Gletscherbildung die gravimetrische Verdichtung ist, das ist bei der Emissionsschichtung das Abbaupotenzial des einzelnen THG. CH₄ und N₂O verfügen über ein vollständiges Abbaupotenzial, bei CO₂ stagniert diese Fähigkeit nach etwa 100 Jahren und die Fähigkeit zum Abbau geht zunehmend verloren. Dieses Verhalten führt dazu, dass schon geringe Emissionsmengen zu einer Akkumulation von Wirkungen führt. Das Wissen um die Schichtung von Teilwirkungen und die Aggregationsfähigkeit von THG sind wichtig für die Hoffnungen in die Zukunft. Emissionsreduktionen betreffen immer nur die oberen Schichten. Die Gesamtwirkung hängt auch vom „alten“ Wirkungsstapel ab.

Österreich hat zugleich einen globalen Bevölkerungsanteil von 0,125 %. Der nationale Beitrag zur Klimaerwärmung ist somit überproportional hoch. N₂O überholt erstmals CH₄. Der THG Index zeigt, dass CO₂ dramatisch und immer weiter ansteigt, während N₂O und CH₄ den Indexbereich nie verlassen haben. CH₄ nähert sich sogar seit 1990 wieder dem Ergebnis im Jahr 1890 an und wird dieses ohne Probleme in absehbarer Zukunft erreichen.

- 1890 bis 2018: Der gesamte Strahlungsantrieb Österreichs hat um $5,37 \text{ mWm}^{-2}$ zugenommen. Die Untersuchung der Verteilung zeigt, dass 92,0 % der Steigerung auf CO_2 zurückzuführen sind. Der Anteil von N_2O beträgt 4,9 % und der Anteil von CH_4 3,1 %. Die Eingangswerte von N_2O liegen hier wahrscheinlich aber noch unter einem langfristig stabilen, natürlichen Niveau. Das liegt daran, dass die Festlegung eines frühen Zeitpunktes zwar 1770 ist, aber eine volle Vorlaufzeit bis etwa 1400 zurückreichen müsste. Dessen Festlegung wäre aber reine Spekulation, weil ein wesentlicher Teil der Landnutzungsänderungen erst nach dieser Zeit stattgefunden hat. Wahrscheinlich wird das Ausgangsniveau also um $1/3$ höher liegen.

3.3 Zukünftiges Wirkungspotenzial (AGWP), Methode B

RF aus Methode A dokumentiert die Wirkung der Vergangenheit in einem einzelnen Jahr, AGWP aus der Methode B kürzt den gesamten zeitlichen Effekt aus der Bewertung und macht alle zukünftigen Wirkungen zum Emissionszeitpunkt sichtbar. Mit diesem Wissen entsteht der zentrale Handlungsauftrag für alle produzierenden Sektoren und den Konsum. *Abbildung 14* stellt die Ergebnisse beider Methoden gegenüber. Im linken Teil der Abbildung wiederholt sich RF aus dem vorigen Kapitel, rechts wird die jährliche Summe aller Wirkungen sichtbar. Während RF mit dem Jahr 2040 abgeschnitten wurde, endet AGWP tatsächlich mit der definierten Emissionsreihe. Bis 2020 wirken die Kurven aus *Abbildung 9* danach bis 2040 wurde bereits ein Emissionsrückgang von 20 % simuliert. Auch wenn sich die Abbildungen ähnlich sind, die Y-Achse der Abbildung ist es nicht. Während RF knapp über 7 mWm^{-2} endet, ist der höchste Wert von AGWP $48,6 \text{ mWm}^{-2}\text{J}^{-1}$.

Der wesentlichste Unterschied zwischen RF und AGWP betrifft die Verteilung der Emissionslast zwischen den einzelnen Treibhausgasen. *Abbildung 15* und *Tabelle 5* zeigen dies deutlich. Werden alle zeitlichen Wirkungsaspekte eliminiert, verbleibt AGWP als neutrale Wirkungsgröße. CO_2 übernimmt nun die dominante Rolle die wir bei der Beschreibung der Wirkungswelle schon angesprochen haben. Die Wirkungsanteile von N_2O und CH_4 liegen bei nur mehr 1,4 bzw. 0,8 %.

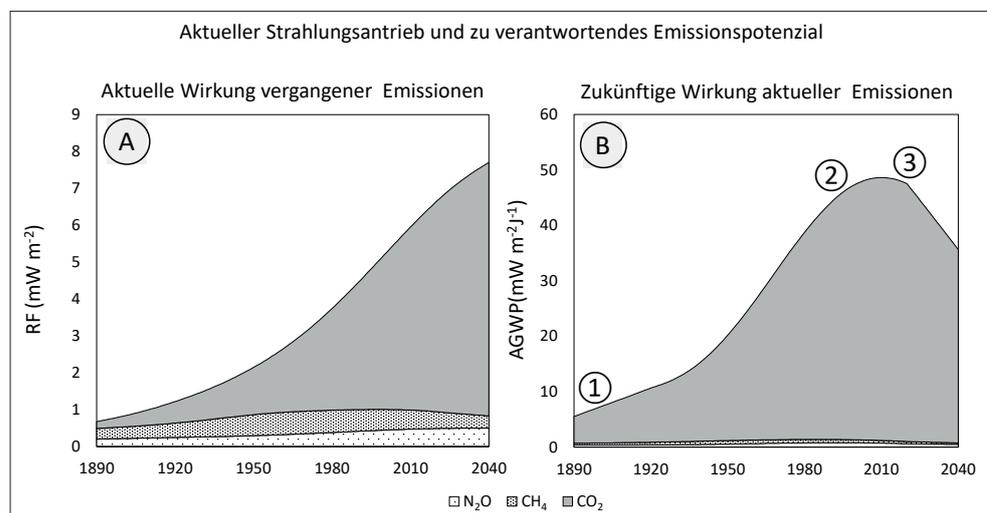


Abbildung 14: Vergleich von RF und AGWP

Bildbeschreibung: Wie wir aus der Darstellung der gesamten Wirkungswelle wissen, betrachten wir im linken Teilbild lediglich die Vergangenheit bis zum Jahr 2040. Im rechten Bild hingegen, werden alle Wirkungen auf ihren Emissionszeitpunkt bezogen. Das ist auch jener Zeitpunkt in dem die Verantwortung für die Zukunft zu suchen ist.

Tabelle 5: Zukünftige Wirkung gegenwärtiger Emissionen nach der Methode B

Langfristig					
Zukünftiges Wirkungspotential (AGWP)					
		CO ₂	N ₂ O	CH ₄	Gesamt
AGWP mWm ⁻² J					
1890	①	4,82	0,38	0,32	5,52
1990	②	42,64	0,81	0,56	44,01
2018	③	46,89	0,66	0,38	47,92
Verteilung %					
1890	①	87,3	6,9	5,8	100,0
1990	②	96,9	1,8	1,3	100,0
2018	③	97,8	1,4	0,8	100,0
THG Index					
1890	①	100,0	100,0	100,0	100,0
1990	②	884,4	212,4	174,2	796,9
2018	③	972,4	172,7	119,1	867,9

3.4 Simulation zur Bestimmung einzelner Wirkungsstärken

AGWP konzentriert den gesamten, zukünftigen Strahlungsantrieb auf den Emissionszeitpunkt. Das ist günstig in Fragen der Verantwortlichkeiten aber ungünstig im Hinblick auf die Steuerung zukünftiger Prozesse. Für eine zielgerichtete Selektion von Maßnahmen und eine gute Bemessung in der Maßnahmenstärke benötigen Entscheidungsträger eher Informationen über die Reduktionswirkung in näherer Zukunft. Wir haben dafür die Emissionsreihen aus *Abbildung 10* von 2020 bis 2040 in einer Simulation so verändert, dass die verschiedene Wirkungspfade in *Abbildung 16* berechnet werden konnten. Die einzelnen Pfade wurden so definiert:

- Minimal: Alle Emissionen aus dem Jahr 2020 bleiben bis 2040 konstant.
- Maximal: Alle Emissionen aus dem Jahr 2020 sinken bis 2040 linear auf 0.
- -20 %, -50 %, -100 %: Das von der Simulation betroffene TGH wird bis 2040 linear um -20 %, -50 %, -100 % gesenkt. Die beiden anderen TGH bleiben konstant auf dem Wert von 2020.

Wie *Abbildung 16* zeigt, führt nur das Szenario Maximal in naher Zukunft zu einem Effekt im Strahlungsantrieb (RF). Dessen Umsetzung – auch wenn das auf globaler Ebene so gefordert wird – würde mit Sicherheit zu einem so harten Bruch in der aktuellen Lebenswirklichkeit der Menschen führen, dass die Umsetzung am Widerstand scheitern würde. Wer Klimaschutzziel etablieren will, muss mögliche Reduktionsziele definieren und diese mit wirksamen Begleitmaß-

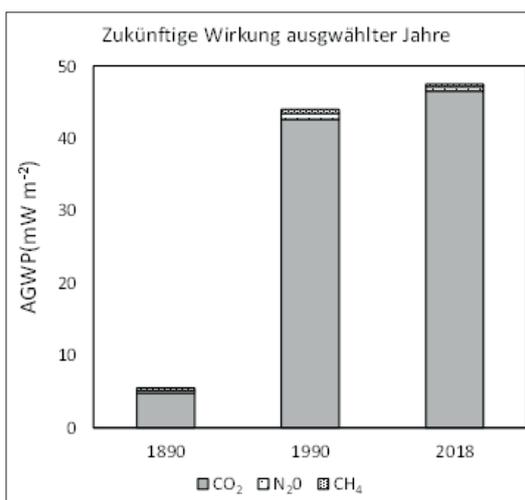
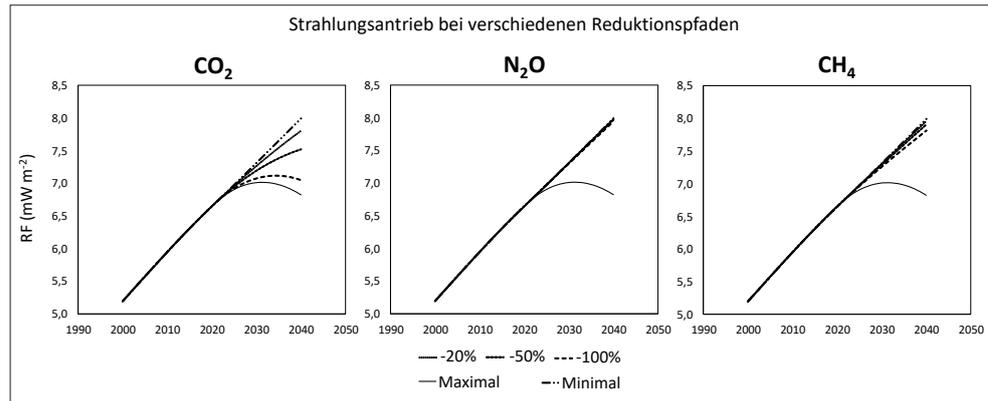


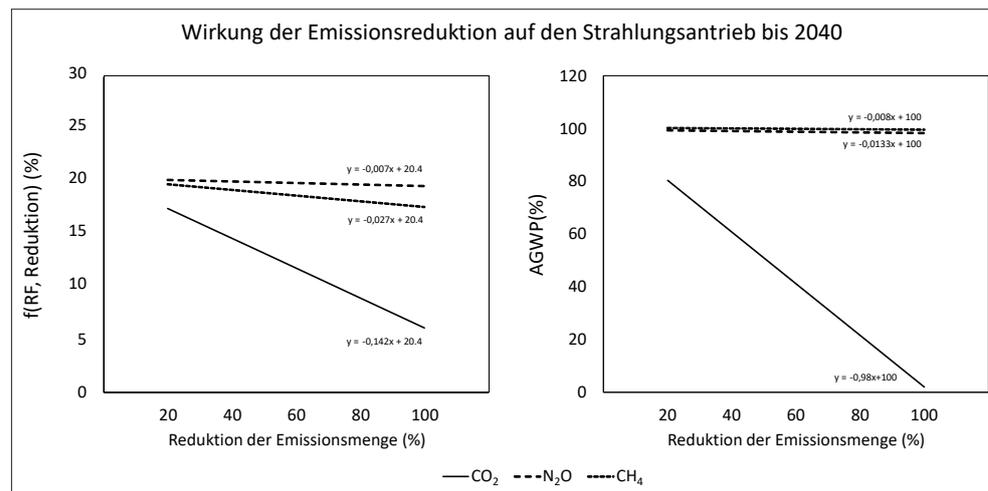
Abbildung 15: AGWP in ausgesuchten Kalenderjahren

Abbildung 16: Strahlungsantrieb bei verschiedenen Reduktionspfaden



Bildbeschreibung: Zur Einhaltung von Vertragszielen muss RF gesenkt werden. Geschieht dies nicht und die Emissionen bleiben zwischen 2020 und 2040 konstant, steigt RF um weitere 1,35 mWm^{-2} an. Werden alle Emissionen linear abgebaut, steigt der Wert nur mehr um 0,18 mWm^{-2} an. Wird nur CO_2 nach dieser Methode zu 100 % zurückgedrängt, steigt der Wert um 0,41 mWm^{-2} . CH_4 zeigt bei einem alleinigen, 100%igen Rückgang eine Steigerung um 1,17 mWm^{-2} . N_2O zeigt in naher Zukunft so gut wie keine Reaktion.

Abbildung 17: Wirkung der Emissionsreduktion auf den Strahlungsantrieb



Bildbeschreibung: AGWP im rechten Bildausschnitt reagiert nur auf die Reduktion von CO_2 . Zu mächtig ist die Gesamtwirkung von Emissionsmenge und Wirkungszeit im Verhältnis zu den Möglichkeiten der anderen THG. In kurzfristigen Zeiträumen ist das anders, weshalb CH_4 im linken Bildausschnitt von 20 Jahren (2020-2040) sensitiv reagiert. Eine Reduktionseinheit an CH_4 bringt allerdings auch hier nur 19 % der Wirkung einer Reduktionseinheit an CO_2 .

nahmen umsetzen. Für Entscheidungsträger ist dabei besonders wichtig, welche Wirkung von welcher Maßnahme ausgeht. In *Abbildung 17* wurde über die vier Reduktionsstufen 0 %, 20 %, 50 % und 100 % eine Trendlinie definiert, die angibt wie RF bzw. AGWP auf die Reduktion von THG-Emissionen wirkt. Im Hinblick auf die Gesamtverantwortung für die Zukunft (AGWP) wird deutlich, dass weder N_2O noch CH_4 wirksam werden kann. Sie bilden eine konstante Grundlast, Wirkungen führen nur über CO_2 . Wird die Wirkung im Jahr 2040 als RF abgelesen, bleibt diese Grundaussage aufrecht. *Abbildung* links zeigt die Zusammenhänge, wobei

noch einmal zu betonen ist, dass die Y-Achse immer nur positive Werte zeigt. Es kommt also trotz jeder THG-individuellen, linearen Reduktionsmaßnahme zu einem weiteren Gesamtanstieg von RF. N₂O bleibt auch hier in seiner Entwicklung ganz schwach, während CH₄ einen Beitrag leisten kann. Zur Erinnerung: Das liegt an der kurzen Abbauphase von CH₄. Für die praktische Anwendung gemischter Reduktionsziele für die Gesamtwirkung im Jahr 2040 wurde *Formel 3* definiert. Als Basis für die Bewertung empfiehlt sich $RF_{2020} = 6,64 \text{ mWm}^{-2}$.

Formel 3: Abschätzung zur Entwicklung von RF in Österreich bis 2040

$$RF_{2040} = 7,99 - 0,009437 \times CO_2 - 0,001789 \times CH_4 - 0,000474 \times N_2O$$

3.5 Simulation zur Bestimmung eines stabilisierenden Pfades bis 2060

Für eine Abschätzung in eine etwas fernere Zukunft bis 2060 wurde eine zweite Simulation gemacht. Diese nimmt zwischen 2020 und 2060 für die einzelnen Treibhausgase folgende Reduktionspfade an:

- CO₂: Bei einer jährlichen Reduktionsrate von CO₂ aus fossilen Quellen von 2 % wird im Jahr 2060 ein stabiles Plateau erreicht. RF wächst nicht weiter, nimmt aber in den kommenden Jahrzehnten auch so gut wie nicht ab. Der verbleibende Anteil an fossiler Energie im Verhältnis zum Ausgangsniveau beträgt dann nur mehr 20 %.
- N₂O: Im Wissen um die Unvermeidbarkeit von N₂O-Emissionen selbst aus ökologisch geführten Flächen, wird für das Jahr 2060 ein Emissionsniveau von 40 % festgelegt. Damit die restlichen 60 % in 40 Jahren linear reduziert werden, muss die Reduktionsrate 1,5 % pro Jahr betragen.
- CH₄: Für CH₄ wird das Ausgangsniveau von 1890 zurückgeführt. Die dafür notwendige Reduktionsrate beträgt 0,75 % pro Jahr. Die Summe der Reduktion, das sind 30 % der aktuellen Emissionen, verdrängt weitgehend das für die menschliche Ernährung geeignete Ackerfutter aus den Rationen von Wiederkäuern. Die Nutzung der verbleibenden Grünlandflächen ist untrennbar mit der Wiederkäuerhaltung verbunden. Zusätzlich ist anzunehmen, dass sich die Tierbestände im Trend der letzten 20 Jahre weiter reduzieren werden.

Tabelle 6 ergänzt die Ergebnisse von *Tabelle 4* und *Tabelle 5* an zwei weiteren Zeitpunkten (2040, 2060) mit den jeweils erreichten Reduktionen (-20 %, -40 %). *Abbildung 18* greift daraus den aktuellen Strahlungsantrieb (RF) heraus.

Für alle THG stellt sich der zu erwartende Effekt ab 2020 ein, wobei der Rückgang von N₂O in dieser Deutlichkeit noch nicht zu sehen war. Der Grund liegt in der Form der Emissionskurve die ab 1990 (siehe *Abbildung 9*) stark zurückgeht. 70 Jahre nach der höchsten Stelle der Emission sind bereits bedeutende Mengen der Emissionen aus dem 20. Jahrhundert wieder abgebaut und RF sinkt.

3.6 Strahlungsantrieb als Projekt vieler Generationen

Fossile Energie treibt nicht nur den Strahlungsantrieb an, sondern ist auch in vielen Sektoren ein produktionsbestimmender Faktor. Dies führt zu einer engen Koppelung zwischen Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch. Eine Entkoppelung ist nur mit einer Reorganisation der Produktionssysteme und einem Beitrag des technischen Fortschritts möglich. Für beide Aspekte benötigen Gesellschaften Vorleistungen die sich in ihrer grundsätzlichen Haltung und in ihrer Kompetenz manifestieren müssen. Die in dieser Arbeit bewertete Emissionszeit-

Tabelle 6: Ergebnisse aller Metriken an verschiedenen Zeitpunkten

Kurzfristig					
Aktueller Strahlungsantrieb (RF)					
Jahr		CO ₂	N ₂ O	CH ₄	Gesamt
RF mWm ⁻²					
1890	①	0,1869	0,2028	0,2871	0,6767
1990	②	3,4424	0,4136	0,5881	4,441
2018	③	5,5576	0,4869	0,4703	6,5148
2040	S	6,7269	0,4978	0,3487	7,5735
2060	S	7,0091	0,4756	0,2849	7,7697
Verteilung %					
1890	①	27,6	30,0	42,4	100,0
1990	②	77,5	9,3	13,2	100,0
2018	③	85,3	7,5	7,2	100,0
2040	S	88,8	6,6	4,6	100,0
2060	S	90,2	6,1	3,7	100,0
TGH Index					
1890	①	100,0	100,0	100,0	100,0
1990	②	1843,0	203,9	204,8	656,7
2018	③	2975,5	240,1	163,8	962,7
2040	S	3601,5	245,5	121,5	1119,2
2060	S	3752,6	234,6	99,2	1148,2
S Pfad zur Stabilisierung von RF bis 2060: CO ₂ -2 % pro Jahr, N ₂ O -1,5 % pro Jahr, CH ₄ -0,75 % pro Jahr					
CO ₂ : kein weiteres Wachstum, N ₂ O: unvermeidbare Emissionen erreicht, CH ₄ : Ausgangswert von 1890 erreicht					

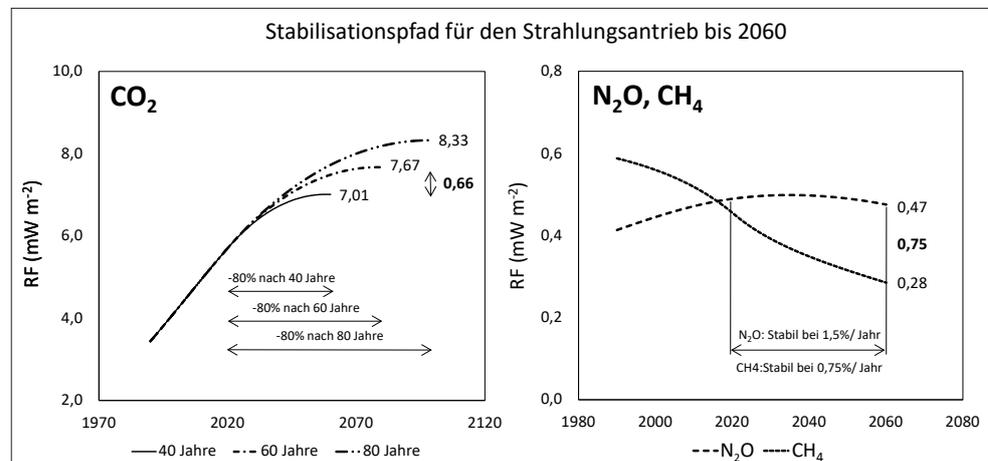


Abbildung 18: Simulation eines stabilisierenden Emissionspfades bis 2060 in Österreich

Bildbeschreibung: Für die Zeit der nächsten zwei Generationen an Menschen wurden für CO₂ drei verschiedene Reduktionspfade definiert. Eine Reduktionsrate von 2 % pro Jahr ab 2020 führt im ersten Pfad zu keinem weiteren Anstieg von RF. Die Restmenge an fossiler Energie beträgt dann 20 %, die Reduktion 80 %. Stellt sich dieser Rückgang um 20 bzw. 40 Jahre verspätet ein, dann steigt RF deutlich weiter. Jede Verspätung um 20 % wird dann dem gesamten Potenzial eines stark reduzierten, aber standortgerechten RF-Potenzials von N₂O + CH₄ entsprechen. Dieser Wert liegt bei 0,70 mWm⁻².



Abbildung 19: Wirkungskomponenten im Simulationsset

Bildbeschreibung: Um noch einmal die zeitliche Wirkungsdynamik darzustellen, werden in Abbildung 19 zwei Zeitpunkte in der Vergangenheit (1920 bzw. 2020) und zwei Zeitpunkte in der Zukunft (2060 bzw. 2080) dargestellt. Jeder Zeitpunkt zeigt sich wieder mit seinem Ausschnitt aus der gesamten Wirkungswelle aller THG. Wir können nun beobachten wie ein sehr konstanter Anteil an RF von N_2O und CH_4 von den CO_2 -Wirkungen immer weiter nach oben geschoben wird. Es wird deutlich: Wenn wir bei CO_2 nicht ausreichend schnell bremsen, wird RF in lichte Höhen steigen. Derzeit, also im Frühjahr 2022, ruft das IPCC zum raschen Handeln auf und veröffentlicht dafür ebenfalls Emissionspfade mit verschieden starkem Reduktionspotenzial. Die Stabilisierung im Jahr 2060 würde nach IPCC-Angaben zu einem Temperaturanstieg von $2.1\text{ }^\circ\text{C}$ führen, die Stabilisierung im Jahr 2080 zu $2,4\text{ }^\circ\text{C}$.

reihe überspannt, bei einem Generationenintervall von 30 Jahren, eine Anzahl von mindestens fünf Generationen. Als eine stabile Spanne für die Umsetzung von zentralen gesellschaftlichen Handlungen darf die Zeit von der Geburt einer Großelterngeneration bis zur Geburt ihrer Enkel gelten.

In *Abbildung 20* werden jene fünf Generationspaare (Großeltern-Enkel) in ihrem Beitrag zu Klimaerwärmung gezeigt, die zwischen 1900 und 2080 möglich sind. Wieder ist die Kurve des Strahlungsantriebes von CO_2 bestimmend. Menschen die 1900 geboren sind hinterlassen dabei ihren Enkeln, diese werden 1960 geboren, einen zusätzlichen Strahlungsantrieb von $1,4\text{ mWm}^{-2}$. Das Maximum haben Menschen erreicht die 1960 geboren sind und die ihren Enkeln 4 mWm^{-2} , das ist etwa die Hälfte des in unseren Szenarien bis 2010 erreichten Endwertes, als Erbe

hinterlassen. Die hier angesprochene Generation ist im Wohlstand des letzten Viertels des 20. Jahrhunderts aufgewachsen und gestaltet derzeit die Zukunft an maßgeblichen Stellen mit.

N₂O spielt in der Übergabe der Verantwortung mehrerer Generationen ebenso eine Rolle wie CO₂. Allerdings ist diese Rolle bedeutend kleiner und der zusätzliche Beitrag steigt im Wesentlichen kaum über 0,2 mWm⁻². CH₄ ist als einziges THG in den beiden jetzt möglichen Paarungen von Großeltern und Enkeln in der Lage bereits einen Rückgang im Strahlungsantrieb von -0,1 bis -0,3 mWm⁻² zu verzeichnen. Das Narrativ um die Schädigung von Wiederkäuern in Österreich ist damit vollständig widerlegt. Die Geschichte um die Schuldfrage muss neu erzählt werden. Sie ist die Geschichte unseres Wohlstandes in deren Kern die Wirtschaftsmodelle der Gegenwart stehen.

3.7 Vergleich von GWP₁₀₀, RF und AGWP

Weil die verwendeten Metriken RF und AGWP der breiten Masse nicht bekannt sind, ist es notwendig am Ende dieses Kapitels einen Quervergleich zu den gängigen Metriken GWP₂₀ bzw. GWP₁₀₀ herzustellen. Abbildung 21 ergänzt die einleitende Abbildung im Methodenteil nun um diese beiden Metriken. Wir können deutlich erkennen, dass GWP auf der Basis gegenwärtiger Emissionen

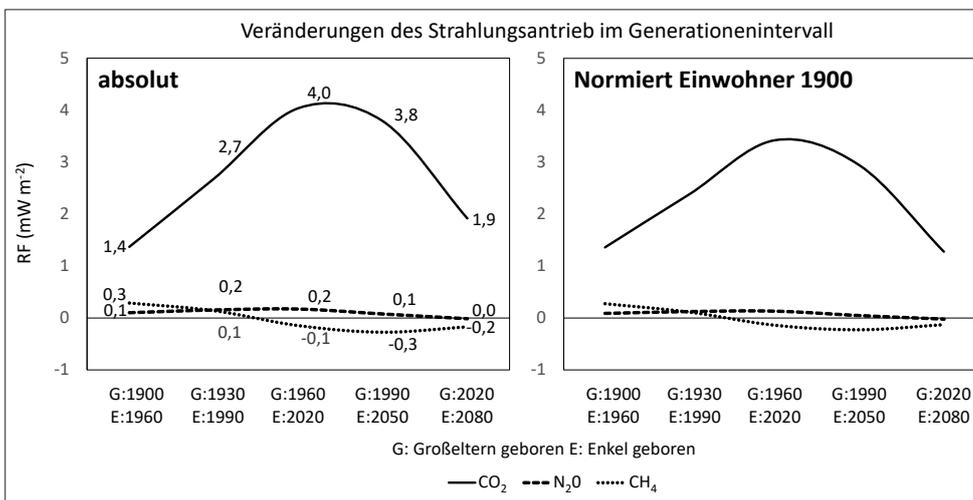


Abbildung 20: Das Generationenintervall

eine Verantwortung für die Zukunft ableitet. GWP steht damit AGWP wie wir es verwenden nahe. Dabei wird, wie auch wir es gemacht haben, eine Abbruchbedingung definiert. Der Unterschied liegt dabei vor allem in der Definition der Abbruchbedingung. Wir definieren für CO₂ einen Jahreswert in der weiten Vergangenheit (860 Jahre) um einen adäquaten Teil der Wirkung von CO₂ zu berücksichtigen. Für N₂O und CH₄ brechen wir bei einem Restwert von 1 % ab. GWP hat sich dazu entschieden für alle THG einen festen Jahreswert, gängig sind derzeit 20 und 100 Jahre, zu nutzen. Zusätzlich unterscheidet sich der hier genutzte AGWP-Wert von GWP durch die Normierung. Während AGWP nicht normiert ist, nutzt GWP CO₂ als Normierungsfaktor. GWP kann also als zeitlich reduziertes, normiertes Gewichtungssystem für THG bezeichnet werden.

Tabelle 7 zeigt, dass normierte Wirkungen einen starken Einfluss auf die Kommunikation nehmen. CO₂ wird auf 1 gesetzt und erscheint damit neutral. Als scheinbar zu bewegende Größen verbleiben N₂O und CH₄ die je nach Argumentationswünsche extrem weit von der ursprünglichen Annahme abweichen. Die Methodik der Normierung auf die Zeit und ein Referenzgas ist nicht robust. GWP ist ein

Kommunikationsmaßstab der für sich allein genutzt zu einer vollständigen Fehldeutung der tatsächlichen Zusammenhänge führt. Dieser Faktor macht im horizontalen Vergleich erst dann einen Sinn, wenn die GWP-Last, das ist die Multiplikation von Emissionsmenge und GWP-Faktor, interpretiert wird. Die Wirkungsfaktoren, also in der Regel 265 für N₂O und 28 für CH₄ haben sich dank der medialen Aufbereitung des Themas zu einem Allgemeinwissen entwickelt. Die nationale Inventur bewertet immer die Fracht, aber das wird in der Regel nur für die Fachwelt sichtbar.

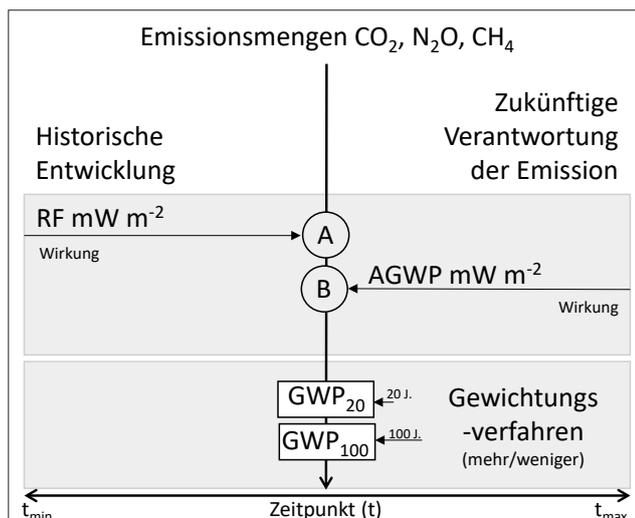


Abbildung 21: Die Metriken und Methoden

Tabelle 7: Wirkungsfaktoren und Normierung

		Wirkungsfaktoren f(t, THG)		
		CO ₂	N ₂ O	CH ₄
Gesamtmenge bis zum Abau	n-faches einer Emissionseinheit	394,4	119,3	11,39
Radiativ Forcing (RF)	mWm ⁻² Mt ⁻¹	0,00175	0,42218	0,14571
Zukünftige Wirkungsmenge (AGWP)	mWm ⁻² Mt ⁻¹	0,7	50,4	1,7
Normierung AGWP		1,0	73,0	2,4
Normierung GWP ₁₀₀		1,0	265	28
Normierung GWP ₂₀		1,0	264	84

Der vertiefende Vergleich zwischen den vier möglichen Metriken wird über zwei Paare geführt. Zuerst soll das Ergebnis von RF mit dem Ergebnis von GWP₂₀ verglichen werden (siehe *Tabelle 8*).

Beide Metriken liegen mit ihrer Bewertung nahe am Bewertungszeitpunkt und können deshalb im Zusammen mit dem Wunsch nach aktivem, zeitnahem Handeln in Verbindung gebracht werden. RF gibt dabei Auskunft über den aktuellen Strahlungsantrieb im Bewertungsjahr, GWP₂₀ über die Wirkung von aktuellen Emissionen in den nächsten 20 Jahren. RF zeigt, dass der gesamte Strahlungsantrieb ansteigt und steht damit in enger Verbindung zur Klimaerwärmung. GWP₂₀ kennt den aggregierenden Zusammenhang nicht und kann nur die Wirkung der Emissionsmenge zum Zeitpunkt bewerten. RF-Gesamt steigt deshalb kontinuierlich an, GWP₂₀ sinkt ab 2018 ab. RF ist damit das Maß der Wirkung und GWP₂₀ eine normierte, erste Ableitung der Wirkung. Die vertikale Entwicklung ist noch verständlich, der horizontale Vergleich (graue Box) der THG entgleist. CH₄ erhält eine Bedeutung, die sich so nicht im Strahlungsantrieb niederschlagen kann. CH₄ in GWP₂₀ so zu erhöhen kann strategisch Sinn machen, wenn große, nicht natürliche Emittenten wie offene fossile Lagerstätten unter Druck gebracht werden sollen, für Emissionen aus natürlichen biogenen Systemen wie wir sie in Österreich vorfinden ist das maßlos überzogen.

Tabelle 8: Vergleich der kurzfristigen Beobachtungen von RF und GWP₂₀

Physikalische Wirkung	Kurzfristig					Kurzfristig						
	Aktueller Strahlungsantrieb (RF)					Global Warming Potenzial 20 Jahre						
	Jahr	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	Gesamt	Jahr	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	Gesamt		
	RF mW m ⁻²					GWB ₂₀ Mt						
	1890	?	0,1868	0,2028	0,2871	0,6767	1890	?	7,0	2,0	15,8	24,8
	1990	?	3,4424	0,4136	0,5881	4,4441	1990	?	61,9	4,2	27,6	93,8
	2018	?	5,5576	0,4869	0,4703	6,5148	2018	?	68,1	3,4	18,9	90,4
	2040	S	6,7269	0,4978	0,3487	7,5735	2040	S	40,5	2,3	15,1	58,0
	2060	S	7,0091	0,4756	0,2849	7,7697	2060	S	13,5	1,3	12,4	27,3
	Verteilung %					Verteilung %						
1890	?	27,6	30,0	42,4	100,0	1890	?	28,2	8,0	63,8	100,0	
1990	?	77,5	9,3	13,2	100,0	1990	?	66,0	4,5	29,4	100,0	
2018	?	85,3	7,5	7,2	100,0	2018	?	75,3	3,8	20,9	100,0	
2040	S	88,8	6,6	4,6	100,0	2040	S	69,9	4,0	26,0	100,0	
2060	S	90,2	6,1	3,7	100,0	2060	S	49,5	4,9	45,6	100,0	
THG Index					THG Index							
1890	?	100,0	100,0	100,0	100,0	1890	?	100,0	100,0	100,0	100,0	
1990	?	1843,0	203,9	204,8	656,7	1990	?	884,4	212,4	174,2	377,4	
2018	?	2975,5	240,1	163,8	962,7	2018	?	972,4	172,7	119,1	363,8	
2040	S	3601,5	245,5	121,5	1119,2	2040	S	579,1	116,2	95,3	233,3	
2060	S	3752,6	234,6	99,2	1148,2	2060	S	193,0	66,4	78,4	109,7	

S Pfad zur Stabilisierung von RF bis 2060: CO₂ -2% pro Jahr, N₂O -1,5% pro Jahr, CH₄ -0,75% pro Jahr
 CO₂: kein weiteres Wachstum, N₂O: unvermeidbare Emissionen erreicht, CH₄: Ausgangswert von 1890 erreicht

Tabelle 9: Ergebnisse aller Metriken an verschiedenen Zeitpunkten

Gesamtverantwortung	Langfristig					Langfristig						
	Zukünftiges Wirkungspotenzial (AGWP)					Global Warming Potenzial 100 Jahre						
	Jahr	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	Gesamt	Jahr	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	Gesamt		
	AGWP mW m ⁻² J ⁻¹					GWB ₁₀₀ Mt						
	1890	?	4,82	0,38	0,32	5,52	1890	?	7,0	2,0	5,4	14,4
	1990	?	42,64	0,81	0,56	44,01	1990	?	61,9	4,2	9,4	75,6
	2018	?	46,89	0,66	0,38	47,92	2018	?	66,6	3,4	6,4	76,4
	2040	S	27,93	0,54	0,31	38,03	2040	S	40,5	2,3	5,2	48,0
	2060	S	9,31	0,44	0,25	38,03	2060	S	13,5	1,3	4,2	19,1
	Verteilung %					Verteilung %						
1890	?	87,3	6,9	5,8	100,0	1890	?	48,6	13,9	37,6	100,0	
1990	?	96,9	1,8	1,3	100,0	1990	?	81,9	5,6	12,5	100,0	
2018	?	97,8	1,4	0,8	100,0	2018	?	87,1	4,5	8,4	100,0	
2040	S	73,4	1,4	0,8	100,0	2040	S	84,4	4,8	10,7	100,0	
2060	S	24,5	1,2	0,7	100,0	2060	S	70,8	6,9	22,2	100,0	
THG Index					THG Index							
1890	?	100,0	100,0	100,0	100,0	1890	?	100,0	100,0	100,0	100,0	
1990	?	884,4	212,4	174,2	796,9	1990	?	884,3	211,6	174,2	524,4	
2018	?	972,4	172,7	119,1	867,9	2018	?	950,9	172,0	119,1	530,6	
2040	S	579,2	141,2	95,2	688,7	2040	S	579,1	116,2	95,3	333,3	
2060	S	193,1	116,3	78,4	688,7	2060	S	193,0	66,4	78,4	132,4	

S Pfad zur Stabilisierung von RF bis 2060: CO₂ -2% pro Jahr, N₂O -1,5% pro Jahr, CH₄ -0,75% pro Jahr
 CO₂: kein weiteres Wachstum, N₂O: unvermeidbare Emissionen erreicht, CH₄: Ausgangswert von 1890 erreicht

Langfristige Metriken stellen sich einer mehr oder weniger langen Gesamtverantwortung. Methodisch ist AGWP mit GWP insofern verwandt, als alle drei ein Integral der Wirkung über die Zeit sind. Alle Methoden sind für die Bewertung des einzelnen Emissionspfades eines THG gleich gut geeignet. Dies ist gut am identischen Verlauf der THG-Indizes in *Tabelle 8*, *GWB₂₀* und *Tabelle 9*, beide Metriken, zu sehen. Im vertikalen Vergleich (grau Box) wird die Wirkung der verkürzten Beobachtung nur auf der Höhe einer vergleichbaren Methode sichtbar. Während AGWP ganz klar die zentrale Verantwortung von CO₂ zeigt, weist GWP₁₀₀ für CH₄ und N₂O noch eine anteilige Wirkung aus.

4 Zusammenfassung

Auf der Basis einer zwischen 1860 und 2020 vollständigen Datenreihe österreichischer Treibhausgasemissionen (CO_2 , N_2O , CH_4) der produzierenden Sektoren wurde unter Verwendung spezifischer Abbaukurven eine vollständige Wirkungsmatrix als Sachbilanz erstellt. Diese wurde mit dem Strahlungsantrieb (RF), das ist die eigentliche physikalische Wirkung der Treibhausgase, multipliziert. Da jede jährliche Teilwirkung in der Wirkungsmatrix sowohl das Emissions- als auch das Wirkungsjahr kennt, können folgende Methoden umgesetzt werden:

- (A) Berechnung des jährlichen, nationalen Strahlungsantriebs (RF) in mWm^{-2}
- (B) Abschätzung des zukünftigen, nationalen Gesamtwirkungspotenzials (AGWP) in $\text{mWm}^{-2}\text{J}^{-1}$

Das sind die zentralen Ergebnisse aus der Modellierung:

- Der Strahlungsantrieb RF im Jahr 2018 beträgt in Österreich $6,51 \text{ mWm}^{-2}$. Ein Volk unserer Größe dürfte im globalen Schnitt nur $3,17 \text{ mWm}^{-2}$ als Schädigung beanspruchen.
- Der gegenwärtige Strahlungsantrieb wird von CO_2 -Emissionen dominiert. Dieses Treibhausgas ist wegen der hohen Emissionsmengen und der langen Lebensdauer auch bei einer geringeren physikalischen Wirkung stark aggregationsfähig und hat RF seit 1890 von $0,19 \text{ mWm}^{-2}$ auf $5,56 \text{ mWm}^{-2}$ angehoben. Das ist das 30ig-fache der Ausgangswirkung und 92 % der Gesamtwirkung im Emissionszeitraum (1890: $0,68 \text{ mWm}^{-2}$, 2018: $6,51 \text{ mWm}^{-2}$). Der Entwicklungsvektor von CO_2 -Emissionen flacht derzeit auf hohem Niveau langsam ab.
- N_2O und CH_4 haben zu 4,9 % bzw. 3,1 % zu dieser Entwicklung beigetragen. Aktuell beträgt der gemeinsame Strahlungsantrieb $0,96 \text{ mWm}^{-2}$. Die Entwicklungsvektoren sinken bereits merkbar bis stark und es besteht kein Zweifel, dass die Gesellschaft die Pfade zum minimalen Fußabdruck der beiden in Österreich biogen verursachten THG vorbereitet hat. Dieser liegt nach der Etablierung einer standortgerechten Landwirtschaft (Guggenberger et al., 2020) bei etwa $0,7 \text{ mWm}^{-2}$ und besteht dann im Wesentlichen aus der kaskadischen Nutzung von nicht ackerfähigen Grünlandflächen, dem minimal notwendigen Futtergetreide, der Verwertung von Nebenprodukten des Ackerbaus durch Wiederkäuer und den verbleibenden N_2O -Emissionen aus den Böden.
- Die Abbildungen der Gesamtwirkungswelle (*Abbildung 10 bis 12*) beschreiben im Gegensatz zum Strahlungsantrieb alle Wirkungen vom Anfang der Modellierung im Jahr 1770 bis zum Abebben der Welle im Jahr 2900. Ab dem Zeitpunkt der Emission bäumen sich die Wellen der einzelnen Treibhausgase in unterschiedlicher Form und mit unterschiedlicher Amplitude auf. Die gesamte Summe der Wirkung beträgt $4,4 \text{ Wm}^{-2}$. Das ist das 1,6fache eines globalen Jahres im Strahlungsantrieb.
- Während die maximale Amplitude des Strahlungsantriebs (RF) traditionell sehr stark im Fokus des Geschehens steht - die Festlegung des $1,5^\circ$ Zieles im Vertrag von Paris ist nichts Anderes als die Festlegung einer maximalen Amplitude - wird die Wirkungslänge bzw. die Wirkungsform der Gesamtwirkungswelle kaum besprochen. Das ist wenig verständlich, da die Wirkungswelle der einzelnen Treibhausgase ein völlig unterschiedliches Verhalten zeigt. Besonders bedenklich ist die Aggregationsfähigkeit von CO_2 , dass wegen der langen Abbaupzeit zu keinem Zeitpunkt (weder im Emissionsjahr noch in näherer Zukunft) eine rasche Reduktion des erreichten Strahlungsantriebs zulässt. CO_2 ist damit nicht nur einem Mengenantrieb, sondern auch einem Zeitfaktor ausgeliefert. Wird die Menge halbiert, kann nicht verhindert

werden, dass der verbleibende Rest den Strahlungsantrieb weiter nach oben treibt. Diese Erkenntnis ist äußerst unerfreulich, macht aber deutlich, dass für aggregationsfähige Treibhausgase ausschließlich AGWP als Metrik sinnvoll ist. Es geht um die Verantwortung für den Primärimpuls.

- Die Simulation eines strikten Reduktionspfades für einzelne THG bis 2040 zeigt, dass die Reduktion der Emission von CO₂ um 1 % den Wert des gesamten Strahlungsantriebs im Jahr 2040 um -0,14 % reduzieren kann. CH₄ kann bei einem Emissionsrückgang von 1 % nur mit -0,027 % wirksam werden. Die Mengenwirkung von CO₂ ist also stärker als die physikalische Wirkung von CH₄. Finale Reduktionspfade bis 2040 sind praktisch nicht umsetzbar.
- Bei der Umsetzung eines Stabilisierungspfades kommt der Strahlungsantrieb im Jahr 2060 zum Stillstand, wenn CO₂ ab 2020 jährlich um 2 % gesenkt wird. N₂O muss gleichzeitig um 1,5 % (wenn die Bodenprozesse dies überhaupt zulassen) und CH₄ um 0,75 % gesenkt werden. Bei einem erfolgreichen Abschluss wird der gesamte Strahlungsantrieb dann bei 7,8 mWm⁻² liegen. Gelingt der Stabilisierungspfad erst bis 2080, dann wird der Strahlungsantrieb bei 8,4 mWm⁻² liegen. Geschieht dies gar erst im Jahr 2100 liegt der Wert bei 9,08 mWm⁻². CO₂ nähert sich in allen Fällen im Verhalten immer mehr der Aussage von AGWP an und übernimmt nach und nach die volle Verantwortung für die Erhöhung im Strahlungsantrieb seit 1890. In allen Fällen werden dann noch ca. 25 % der aktuellen CO_{2e} wirksam sein. Das entspricht etwa der Simulation „mit zusätzlichen Initiativen“ aus dem AR6 und damit zu etwa + 2,1 °C im Jahr 2100 führen.
- Das Narrativ um die Schadwirkung von Wiederkäuern in Österreich kann im Großeltern-Enkel-Modell vollständig wiederlegt werden. Die Geschichte um die Schuldfrage ist neu zu erzählen. Sie ist die Geschichte unseres Wohlstandes durch den exzessiven Einsatz von fossiler Energie in dessen Kern die Wirtschaftsmodelle der Gegenwart stecken.
- In der Frage der Metriken erfüllt GWP genau seinen formalen Auftrag. Als emissionsgebundene Methode kann die Gesamtwirkung einer Messreihe nicht erfasst werden, als zeitlich reduzierter Beobachter verzerrt er die Verhältnisse zwischen den THG. Der Strahlungsantrieb RF selber ist als Leistungsgröße mit der Klimaerwärmung direkt verbunden und deshalb ein verzerrungsfreier, simulationsfester Ratgeber für Entscheidungen. Mit großem Interesse sehen wir der Veröffentlichung von ISO/WD TR 14082 „Radiative Forcing Management— Guidance for the quantification and reporting of radiative forcing-based climate footprints and mitigation efforts“ entgegen.

5 Empfehlung

- Ungeachtet der internationalen Verpflichtungen zum GWP-Reporting empfehlen wir für die politischen Entscheidungen in Österreich die Berechnungen des langfristigen Strahlungsantriebes für die Bewertung geplanter Maßnahmen.
- Jedem sollte nun klar sein: Es ist keine besonders gute Idee, die langlebigen und kurzlebigen THG in einem Ansatz zu behandeln. Eine Trennung von N₂O und CH₄ vom Entscheidungspfad von CO₂ würde mehr Entscheidungsstärke in die Teilprozesse bringen. Die derzeit sehr starke Ausdifferenzierung vor den Augen der Konsumenten schadet dem Gesamtprozess.
- Einzelne THG sollen sich nicht aneinander, sondern an ihrem Basisprozess orientieren. Dieser Prozess ist bei biogenen THG die Abweichung zu einer standortgerechten Landwirtschaft/Müllwirtschaft und bei CO₂ die Abweichung zum maximalen technischen Fortschritt in der Substitution fossiler Energie durch erneuerbare Energie. Für alle THG gilt gleichermaßen die Frage

nach dem absoluten Einsparungspotenzial durch den Verzicht auf Konsumgüter und Dienstleistungen.

6 Danksagung

Der vorliegende Forschungsbericht wurde in einer ersten Fassung im Rahmen einer offenen Evaluierung einer ganzen Reihe an Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen vorgelegt. Diese haben maßgeblich zur Fertigstellung der finalen Fassung beigetragen. Im Rahmen einer Abschlussbesprechung wurde dieses Dokument intensiv besprochen.

Wir danken in alphabetischer Reihenfolge: Dipl.-Ing. Anderl Michael, Umweltbundesamt Wien; Dipl.-Ing. Dr. Hörtenhuber Stefan, Universität für Bodenkultur Wien; PD Dr. Kuhla Björn, Forschungsinstitut für Nutztierbiologie Dummerdorf; DDr. Dipl.-Ing. Mag. Leidwein Alois, Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit; Dipl.-Ing. Lichtblau Günther, Umweltbundesamt Wien; Prof. Dr. Dr. habil. Reinsch Norbert, Forschungsinstitut für Nutztierbiologie Dummerdorf; Univ.Prof. Dr. Rieder Harald, Universität für Bodenkultur Wien; Dipl.-Ing. Seiringer-Gaubinger Martin, Universität für Bodenkultur Wien; Prof. Dr. Dr. habil. Windisch Wilhelm, Technische Universität München; Univ.Prof. Dr. Winiwarter Wilfried, Österreichische Akademie der Wissenschaften; Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Zollitsch Werner, Universität für Bodenkultur Wien

7 Literatur

Allen, M.R.; Fuglestvedt, J.S.; Shine, K.P.; Reisinger, A.; Pierrehumbert, R.T. und Forster, P.M. (2016): New use of global warming potentials to compare cumulative and short-lived climate pollutants. *Nature Climate Change* 6 (8), 773-776.

Archer, D. und Brovkin, V. (2008): The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO₂. *Climatic Change* 90 (3), 283-297.

Bellouin, N. (2015): AEROSOLS | Role in Climate Change. In North et al. (Eds.): *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*, Academic Press, Oxford, 76-85.

BMLFUW (1985): Bericht über die Lage der österreichischen Landwirtschaft 1984, BMLFUW, Wien, 192 S.

BMNT (2019): Grüner Bericht, Tabelle 1.2.1.8, Düngemittelabsatz im Zeitvergleich.

CEIC (2021): *Austria Energy Consumption 1965-2020 (Coal, Natural Gas, Oil)*.

Etamin, M.; Myhre, G.; Highwood, E.J. und Shine, K.P. (2016): Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letter* 43, 12,614-12,623.

Fuglestvedt, J.S.; Berntsen, T.K.; Godal, O.; Sausen, R.; Shine, K.P. und Skodvin, T. (2003): Metrics of Climate Change: Assessing Radiative Forcing and Emission Indices. *Climatic Change* 58 (3), 267-331.

Guggenberger, T.; Fritz, C.; Finotti, E.; Herndl, M.; Ofner-Schröck, E.; Terler, G. und Steinwider, A. (2020): Grundzüge einer standortgerechten Landwirtschaft, Forschungsbericht, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Forschungsgruppe Ökoeffizienz, Irdning-Donnersbachtal, 63 S.

IPCC (2006): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan.

IPCC (2019): 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines.

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 3949 S.

ISO/TC 207/SC 7 (2018): Carbon Footprint ISO 14067, Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification.

Joos, F.; Roth, R.; Fuglestedt, J.S.; Peters, G.P.; Enting, I.G.; von Bloh, W.; Brovkin, V.; Burke, E.J.; Eby, M.; Edwards, N.R.; Friedrich, T.; Frölicher, T.L.; Halloran, P.R.; Holden, P.B.; Jones, C.; Kleinen, T.; Mackenzie, F.T.; Matsumoto, K.; Meinshausen, M.; Plattner, G.K.; Reisinger, A.; Segschneider, J.; Shaffer, G.; Steinacher, M.; Strassmann, K.; Tanaka, K.; Timmermann, A. und Weaver, A.J. (2013): Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. *Atmos. Chem. Phys.* 13 (5), 2793-2825.

Kitzler, B. (2004): Der Waldboden als Quelle von Treibhausgasen. Informationstagung Achenkirch, Achenkirch, Bundesamt für Wald.

Krausmann, F. und Haberl, H. (2002): The process of Industrialization from an energetic metabolism point of view. *Socio-economic energy flows in Austria 1830-1995. Ecological Economics* 41, 177-201.

Lynch, J.; Cain, M.; Pierrehumbert, R. und Allen, M. (2020): Demonstrating GWP*: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and long-lived climate pollutants. *Environmental Research Letters* 15(4).

Myhre, G.; Shindell, D.; Bréon, F.M.; Collins, W.; Fuglestedt, J.S.; Huang, J.; Koch, D.; Lamarque, J.F.; Lee, D.; Mendoza, B.; Nakajima, T.; Robock, A.; Stephens, G.; Takemura, T. und Zhang, H. (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. In Cambridge University Press (Ed.).

Österreichische Statistik (1890): Die Ergebnisse der Viehzählung vom 31. December 1890, Band 34, Heft 1, K.K. Statistische Central-Commission, Wien.

Pierrehumbert, R.T. (2014): Short-Lived Climate Pollution. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 42 (1), 341-379.

Rast, S. (2014): Einführung in die Chemie der Atmosphäre.

Ridoutt, B. (2020): Climate neutral livestock production - A radiative forcing-based climate footprint approach. *Journal of Cleaner Production* 291 (125260), 1-8.

- Shine, K.P. (2009): The global warming potential—the need for an interdisciplinary retrieval. *Climatic Change* 96 (4), 467-472.
- Shine, K.P.; Fuglestedt, J.S.; Hailemariam, K. und Stuber, N. (2005): Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. *Climatic Change* 68, 281-302.
- Smith, S.J. und Wigley, M.L. (2000): Global Warming Potentials: 1. Climatic Implications of Emissions Reductions. *Climatic Change* 44 (4), 445-457.
- Szopa, S.; Naik, V.; Adhikary, B.; Artaxo, P.; Berntsen, T.K.; Collins, W.D.; Fuzzi, S.; Gallardo, L.; Kiendler-Scharr, A.; Klimont, Z.; Liao, H.; Unger, N. und Zanis, P. (2021): Short-Lived Climate Forcers Supplementary Material. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In IPCC (Ed.).
- Timma, L.; Dace, E. und Knudsen, M.T. (2020): Temporal Aspects in Emission Accounting—Case Study of Agriculture Sector. *energies* 13 (800), 1-21.
- UBA (2021): Austria's National Inventory Report 2021, UBA, Wien, 807 S.
- Walderorff, J. (1964): Die österreichische Erdgasversorgung. *Monatsbericht des Österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung* 4/1964, 156-161.
- Wifo (1953): Österreichs Erdölverbrauch seit dem Kriege. *Monatsbericht des Österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung* 6/1953, 189-193.
- Wifo (1962): Handelsdüngerverbrauch und Hektarerträge in Österreich. *Monatsbericht des Österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung* 11964, 25-25.

Forschungsbericht

Langzeitbewertung von Treibhausgasemissionen in Österreich

Herausgeber:

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein
A-8952 Irnding-Donnersbachtal

Druck, Verlag und © 2022

Bildquelle: www.pixabay.com