

Berechnung Paris-kompatibler Emissionspfade mit dem ESPM am Beispiel der EU

DOI 10.5281/zenodo.5076254

veröffentlicht auf [Zenodo](#)

Prof. Manfred Sargl
M.Sc. M.A. Dr. Daniel Wiegand
M.Sc. Kerstin Doerenbruch
Dipl.-Mathematiker Günter Wittmann
Dipl.-Volkswirt Andreas Wolfsteiner

Stand: 06.07.2021

Das hier verwendete Extended Smooth Pathway Model (ESPM) bietet einen Rahmen,
um Paris-kompatible nationale Emissionspfade herzuleiten.

Am Beispiel der EU werden exemplarische Emissionsziele gezeigt.

Bei dem vorliegenden Papier handelt es sich im Wesentlichen um eine Aktualisierung aufgrund neuerer verfügbarer
Daten einer Veröffentlichung im Journal „Wirtschaftsdienst“, Februar 2021, [DOI: 10.1007/s10273-021-2854-0](https://doi.org/10.1007/s10273-021-2854-0):

Berechnung Paris-kompatibler Emissionspfade mit dem ESP-Modell am Beispiel der EU

Die europäische Umweltagentur (EEA) hat im Juni 2021 die Emissionen der EU in 2019 veröffentlicht.

Inhalt

Einleitung	3
Globale CO ₂ -Budgets	4
Das Extended Smooth Pathway Model	6
Bestimmung nationaler Budgets	6
Bestimmung nationaler Emissionspfade	6
Szenariotypen aus einer klimapolitischen Gesamtschau	8
Mengen-Overshoot.....	9
Exemplarische Emissionsziele für die EU.....	11
Verbleibendes globales Budget 420 Mrd. t	11
Welche globalen Budgets korrespondieren mit dem 55%-Ziel der EU?.....	11
Grafische Darstellung der RM-Szenariotypen bei einem globalen Budget von 580 Mrd. t.....	13
Schlussfolgerungen.....	15
Tools zum ESPM.....	16
Literaturverzeichnis	17

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Exemplarische jährliche Reduktionssätze der EU – globales Budget 580 Mrd. t.....	14
Abb. 2: Exemplarische EU-Emissionspfade – globales Budget 580 Mrd. t.....	14

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Verbleibende globale CO ₂ -Budgets ab 2018.....	4
Tab. 2: Übersicht RM-Szenariotypen.....	7
Tab. 3: Exemplarische Emissionsziele für die EU – globales Budget 420 Mrd. t.....	11
Tab. 4: EU-2030-Ziel 55% - korrespondierende globale Budgets	12

Einleitung

CO₂ reichert in sich der Atmosphäre an. Daher ist die Summe an CO₂-Emissionen entscheidend für die Einhaltung bestimmter Grenzen der Erderwärmung. Das ist die naturwissenschaftliche Grundlage für die Forderung von z. B. „Fridays for Future“, dass sich nationale Emissionspfade an einem verbleibenden globalen CO₂-Budget orientieren sollten.

Dabei stellen sich jedoch folgende Fragen:

- An welchem konkreten globalen CO₂-Budget und an welcher Aufteilung dieses Budgets sollen sich Staaten bei ihren NDCs orientieren?¹
- Wie kann ein daraus resultierendes nationales CO₂-Budget in einen nationalen Emissionspfad übersetzt werden?
- Nach der Entscheidung der EU das Emissionsziel für 2030 auf -55% anzuheben, stellt sich für die EU zudem die Frage, was dieser Schritt für Paris-kompatible Emissionsziele nach 2030 bedeutet.

Das hier präsentierte Extended Smooth Pathway Model (ESPM) bietet einen Rahmen, um diese Fragen beantworten zu können.

¹ Das Konzept der Nationally Determined Contributions (NDCs) wurde im Artikel 4 des Pariser Abkommen eingeführt. Da ein Top-Down-Ansatz nicht durchsetzbar war, soll dieser Ambitionsmechanismus (eine Mischung aus Top-Down und Bottom-Up) zum Ziel führen. Spätestens bis Ende 2020 sollten alle Vertragsstaaten ihre Ziele für das Jahr 2030 nachschärfen und Langfristpläne für ihre klimaneutrale Entwicklung im Rahmen nachgebesserter NDCs vorlegen (vgl. BMU, 2019). Die EU hat am 17.12.2020 ein neues NDC eingereicht, welches die Anhebung des EU-Ziels für 2030 auf -55% und das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 enthält (vgl. UNFCCC, 2020). Inoffiziell wurde diese erste Nachbesserungsrunde bis zur coronabedingt verschobenen Klimakonferenz in Glasgow (COP26) im November 2021 verlängert. Bis dahin will das UNFCCC auch einen aktualisierten Synthesebericht vorlegen (cf. UNFCCC, 2021). Falls die erste Nachbesserungsrunde nicht zu in Summe Paris-kompatiblen Zielen führen sollte, erscheint die für 2025 vorgesehene zweite Nachbesserungsrunde im Angesicht der schon bis 2030 notwendigen Reduktionen als spät angesetzt. In 2023 sieht das Pariser Abkommen eine globale Bestandsaufnahme (Global Stocktake) über die Fortschritte zur Erreichung der Pariser Klimaziele vor.

Globale CO₂-Budgets

Zu den verbleibenden globalen CO₂-Budgets hat der IPCC in seinem Sonderbericht 2018 folgende Zahlen veröffentlicht:

Ungefähre Erwärmung gegenüber 1850 - 1900	Verbleibende CO ₂ -Budgets ab 2018		Schlüsselunsicherheiten und Variationen					
			Erdsystemrückkopplungen	Nicht-CO ₂ : Szenariovariation	Nicht-CO ₂ : Unsicherheit bzgl. Strahlungsantrieb und Reaktion	Unsicherheit bzgl. TCRE-Verteilung ²	Unsicherheit bzgl. historischer Temperaturen	Unsicherheit bzgl. jüngerer Emissionen
<i>Einhaltungswahrscheinlichkeiten:</i>	50%	67%						
[°C]	[Mrd. t]	[Mrd. t]	[Mrd. t]	[Mrd. t]	[Mrd. t]	[Mrd. t]	[Mrd. t]	[Mrd. t]
~ 1,50	580	420	Budgets auf der linken Seite reduzieren sich über Jahrhunderte um etwa 100	±250	-400 to +200	+100 to +200	±250	±20
~ 1,57	710	530						
~ 1,60	770	570						
~ 1,67	900	680						
~ 1,75	1.040	800						

Tab. 1: Verbleibende globale CO₂-Budgets ab 2018³

In der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger führt der IPCC dazu aus:

*“C.1.3 Limiting global warming requires limiting the total cumulative global anthropogenic emissions of CO₂ since the preindustrial period, that is, staying within a total carbon budget (high confidence). (...) The associated remaining budget is being depleted by **current emissions of 42 ± 3 GtCO₂ per year (high confidence)**. (...) Using global mean surface air temperature (...) gives an estimate of the **remaining carbon budget [from 2018] of 580 GtCO₂ for a 50% probability of limiting warming to 1.5°C, and 420 GtCO₂ for a 66% probability (medium confidence)**. (...) **Uncertainties in the size of these estimated remaining carbon budgets are substantial and depend on several factors.** (...)”* (IPCC, 2018b, p. 14).⁴

Die Notwendigkeit der Bewertung sozioökonomischer Folgen bei der Geschwindigkeit der Dekarbonisierung und die angegebenen Wahrscheinlichkeiten/Bandbreiten machen deutlich, dass die Entscheidung über ein globales CO₂-Budget, an dem sich NDCs orientieren, zwar wissenschaftlich basiert aber letztendlich eine politische sein muss. Das deutsche Bundesverfassungsgericht hat in seinem wegweisenden Urteil 2021 klargestellt: Klimapolitik muss sich an verbleibenden CO₂-Restbudgets orientieren (vgl. BVerfG, 2021).⁵

² Unsicherheit bzgl. vorübergehender Reaktion des Klimas auf kumulative CO₂-Emissionen.

³ Grundlage für Tab. 1 ist die Tabelle 2.2 im IPCC Sonderbericht 2018, die hier jedoch nicht eins zu eins wieder gegeben wird (vgl. IPCC, 2018a). Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten beziehen sich darauf, in wie viel Prozent der untersuchten Szenarien das Temperaturziel eingehalten wurde (vgl. MCC, 2020). Zu den weiteren naturwissenschaftlichen Hintergründen verweisen wir auf den IPCC-Bericht.

⁴ Hervorhebungen und [from 2018] nicht im Original.

⁵ Auszug aus den wesentlichen Erwägungen des Bundesverfassungsgerichts:

“Die verfassungsrechtlich maßgebliche Temperaturschwelle von deutlich unter 2 °C und möglichst 1,5 °C kann prinzipiell in ein globales CO₂-Restbudget umgerechnet werden, das sich dann auf die Staaten verteilen lässt. Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) hat für verschiedene Temperaturschwellen und verschiedene Eintrittswahrscheinlichkeiten aufgrund eines qualitätssichernden Verfahrens unter Offenlegung der verbleibenden Unsicherheit konkrete globale CO₂-Restbudgets benannt. Auf dieser Grundlage hat der Sachverständigenrat für Umweltfragen auch für Deutschland ein ab 2020 verbleibendes konkretes nationales Restbudget ermittelt, das mit dem Paris-Ziel vereinbar wäre. Aufgrund der hierin enthaltenen Ungewissheiten und Wertungen kann die ermittelte Budgetgröße zwar derzeit kein zahlengenaues Maß für die verfassungsgerichtliche Kontrolle bieten. Dem Gesetzgeber bleibt Entscheidungsspielraum. Diesen darf er jedoch nicht nach politischem Belieben ausfüllen. Besteht wissenschaftliche Ungewissheit über umweltrelevante Ursachenzusammenhänge, erlegt Art. 20a GG dem Gesetzgeber eine besondere Sorgfaltspflicht auf. Danach müssen bereits belastbare Hinweise auf die Möglichkeit gravierender oder irreversibler Beeinträchtigungen berücksichtigt werden. Derzeit kann ein Verstoß gegen diese Sorgfaltspflicht nicht festgestellt werden. Zwar folgt daraus, dass Schätzungen des IPCC zur Größe des verbleibenden globalen CO₂-Restbudgets zu berücksichtigen sind, obwohl darin Ungewissheiten enthalten sind. Durch die

Wenn die Vertragsstaaten bei ihren NDCs ein dahinterstehendes globales CO₂-Budget und einen Verteilungsschlüssel transparent machen, kann dies zudem einen Diskurs in Gang setzen, der zu konvergierenden globalen Orientierungsgrößen führt.⁶

in § 4 Abs. 1 Satz 3 KSG in Verbindung mit Anlage 2 geregelten Emissionsmengen würde das vom Sachverständigenrat für Umweltfragen auf der Grundlage der Schätzungen des IPCC ermittelte Restbudget bis zum Jahr 2030 weitgehend aufgebraucht. Das Maß an Verfehlung bildete jedoch verglichen mit den derzeit in der Berechnung des Restbudgets enthaltenen Unsicherheiten keine hinreichende Grundlage für eine verfassungsgerichtliche Beanstandung” (BVerfG, 2021).

⁶ Vgl. dazu u. a. unser Papier zu Paris-kompatiblen Emissionszielen für die sechs größten Emittenten: (Sargl, et al., 2021b).

Das Extended Smooth Pathway Model

Das ESPM besteht aus zwei Teilschritten: Im ersten Schritt werden nationale Budgets bestimmt; im zweiten Schritt werden von diesen Budgets plausible nationale Emissionspfade abgeleitet.⁷

Bestimmung nationaler Budgets

Es sind viele Kriterien denkbar, um nationale Budgets von einem globalen Budget abzuleiten.⁸ Peters et al. betonen dabei die besondere Aussagekraft der Kombination der beiden Kriterien “Bevölkerung” und “aktuelle Emissionen”: *“these two alternatives act as bounds to a range of blended options, and demonstrate how national quotas can be allotted using any mix of the two alternatives”* (Peters, et al., 2015, p. 3). Daher verwenden wir folgenden gewichteten Verteilungsschlüssel, der je nach Gewichtung alle Kombinationen der beiden Kriterien abbilden kann:

$$B^i = \left(C * \frac{P_{BY}^i}{P_{BY}} + (1 - C) * \frac{E_{BY}^i}{E_{BY}} \right) * B$$

Dabei sind:

E_{BY} bzw. E_{BY}^i globale Emissionen bzw. Emissionen des Landes i im Basisjahr; hier: $BY = 2019$

P_{BY} bzw. P_{BY}^i globale Bevölkerung bzw. Bevölkerung des Landes i im Basisjahr

B verbleibendes globales CO₂-Budget; hier ab 2020

B^i verbleibendes nationales CO₂-Budget des Landes i ; hier ab 2020

C Gewichtung der Bevölkerung

Andere Ansätze zur Ermittlung eines nationalen Budgets lassen sich ebenfalls ins ESPM integrieren.

Bestimmung nationaler Emissionspfade

Um Emissionspfade abzuleiten, die ein bestimmtes Budget einhalten, werden bisher vor allem folgende Methoden verwendet:

- (1) Linearer Reduktionspfad (Emissionspfad ist eine Gerade)

Dabei werden die Jahre bis zur Erreichung der Emissionsneutralität mit folgender Formel berechnet: $2 * B^i / E_{BY}^i$ (vgl. z. B. SRU, 2020).

- (2) Konstanter jährlicher Reduktionssatz (Emissionspfad ist konvex)






Dabei wird iterativ berechnet, mit welchem konstanten jährlichen Reduktionssatz das vorgegebene Budget bzw. Klimaziel eingehalten werden kann (vgl. z. B. UNEP, 2019).

⁷ Diese Vorgehensweise ist inspiriert von (Raupach, et al., 2014). In Modellen mit konvergierenden Pro-Kopf-Emissionen, wird dagegen ein globaler Pfad auf Länder aufgeteilt [vgl. (Sargl, et al., 2017) und (Wittmann, 2021)].

⁸ Folgende Prinzipien lassen sich grundsätzlich unterscheiden: historische Verantwortung, Leistungsfähigkeit, Gleichheit, derzeitige Realität (Grandfathering). Die hier verwendete Gewichtungformel bildet die Prinzipien Gleichheit und Grandfathering ab.

Aus einer klimapolitischen Gesamtschau heraus können andere Verläufe der Emissionspfade und insbesondere der jährlichen Reduktionssätze jedoch sinnvoller sein (s. a. Kapitel: Szenariotypen aus einer klimapolitischen Gesamtschau).

Das ESPM bietet sechs idealtypische Szenariotypen an (siehe Abb. 1 und Abb. 2 zur grafischen Darstellung der Szenariotypen bzw. unsere Web-App <http://eu.climate-calculator.info>). Dabei unterscheiden sich die Szenariotypen RM 1 – 5 in der Annahme über den Verlauf der jährlichen Reduktionssätze.⁹ RM-6 geht von einem konstanten jährlichen Reduktionsbetrag aus. Die Emissionspfade ergeben sich daher indirekt über die Bestimmung der jährlichen Reduktionssätze bzw. des jährlichen Reduktionsbetrages. Die Szenariotypen ermöglichen damit eine letztendlich politische Entscheidung über den Verlauf des angestrebten Emissionspfades. Tab. 2 gibt einen Überblick über die RM-Szenariotypen.¹⁰ Für eine umfassende mathematische Beschreibung der RM-Szenariotypen verweisen wir auf: (Wolfsteiner & Wittmann, 2021a).

Szenariotyp	Verlauf der jährlichen Reduktionssätze (siehe Abb. 1)		Mathematische Modellierung der Reduktionssätze	Verlauf der jährlichen Reduktionsbeträge	Verlauf der Emissionspfade (siehe Abb. 2)
RM-1-const	konstant		$y = \text{konstant}$	konkav	konvex
RM-3-lin	linear		$y = ax + b$	u-förmig	s-förmig (erst konkav dann konvex)
RM-4-quadr	konkav		$y = ax^2 + b$	u-förmig	
RM-5-rad	konvex		$y = a\sqrt{x} + b$	u-förmig	
RM-6-abs	konkav		-	konstant	linear

Tab. 2: Übersicht RM-Szenariotypen

In Bezug auf den Anstieg¹¹ der jährlichen Reduktionssätze bei monotonem Verlauf, können folgende vier Grundtypen unterschieden werden:

- (1) Konstant: konstanter jährlicher Reduktionssatz (RM-1-const)
- (2) Linear: linearer Anstieg (RM-3-lin)
- (3) Konkav: anfangs unterproportionaler Anstieg (RM-4-quadr, RM-6-abs)
- (4) Konvex: anfangs überproportionaler Anstieg (RM-5-rad)

Der Szenariotyp RM-1-const liefert mit dem konstanten jährlichen Reduktionssatz einen wertvollen Hinweis auf die Größe der Herausforderung. Für die politische Bestimmung eines Emissionspfades

⁹ Da RM-2-exp in den Ergebnissen nahezu äquivalent zu RM-4-quadr ist (vgl. Wiegand, et al., 2021), wird RM-2 in diesem Papier nicht miteinbezogen.

¹⁰ Die Abkürzung „RM“ steht für Regensburger Modell, in dem die RM-Szenariotypen zur Bestimmung von globalen Pfaden verwendet werden. Beim Regensburger Modell handelt es sich um ein Konvergenzmodell, bei dem sich die Pro-Kopf-Emissionen schrittweise bis zur vollständigen Konvergenz angleichen (vgl. Sargl, et al., 2017). Das ESPM und das RM können unter Resource Sharing Models subsumiert werden (vgl. Sargl, et al., 2021a).

¹¹ „Anstieg“ bezieht sich hier auf den Absolutbetrag der Reduktionssätze.

ist er weniger geeignet, wenn der sich ergebende Reduktionssatz insbesondere am Anfang als unrealistisch eingeschätzt wird. Auch beim Szenariotyp RM-6-abs kann der anfängliche Reduktionssatz nicht auf der Basis einer realistischen Einschätzung vorgegeben werden, sondern ergibt sich wie bei RM-1 endogen. Bei RM 3 – 5 hingegen, ist der Startveränderungssatz ein frei zu wählender Parameter. Bei den folgenden exemplarischen Emissionszielen für die EU wurde dabei ein Veränderungssatz für 2020 von rund -4% unterstellt. Dieser orientiert sich am Ist-Reduktionssatz im Jahr 2019 (vgl. EEA, 2021).

Da die Reduktionssätze bei den Szenariotypen RM-4-quadr und RM-6-abs anfangs nur langsam steigen, ist später ein starker Anstieg der jährlichen Reduktionssätze notwendig (siehe Abb. 1). Der Szenariotyp RM-5-rad ist gekennzeichnet durch anfangs relativ schnell steigende jährliche Reduktionssätze, womit die Reduktionssätze in den 2040er Jahren weniger drastisch steigen müssen. Der Szenariotyp RM-3-lin stellt durch seinen linearen Anstieg der Reduktionssätze eine Art Kompromiss zwischen den konvexe und konkaven Szenariotypen dar.

Die hier vorgestellten idealtypischen Szenariotypen decken die Bandbreite plausibler Möglichkeiten gut ab. Das ESPM ist jedoch offen für weitere Szenariotypen.¹² In der Realität werden die Reduktionssätze nicht die idealtypischen Verläufe der RM-Szenariotypen aufweisen, da Krisen, konjunkturelle Auf- oder Abschwünge, technische und politische Entwicklungen etc. den Verlauf mitbestimmen werden. Die Szenariotypen sollen aber auch nicht der Prognose dienen, sondern helfen, anstehende politische Entscheidungen vorzubereiten und zu fundieren.

Szenariotypen aus einer klimapolitischen Gesamtschau

Wir halten die Forcierung eines wissenschaftlich basierten Diskurses darüber für notwendig, welcher Verlauf der jährlichen Reduktionssätze klimapolitisch sinnvoll ist.¹³ Dabei stellen sich folgende zentrale Fragen:

- (1) Welche Reduktionssätze sind wann realistisch?

¹² Es ist auch möglich, für den Emissionspfad direkt eine bestimmte Funktion zu verwenden (vgl. Wittmann, 2021, Kapitel 3.2). Mathematisch ist dieses Vorgehen jedoch nicht einfacher.

¹³ Auch das deutsche Bundesverfassungsgericht hat in seinem Urteil 2021 klargestellt, dass die Politik sich der Frage stellen muss: Welche Reduktionen müssen wir heute schon erbringen und welches Ausmaß an Reduktionen können wir in die Zukunft verschieben, ohne die Freiheit zukünftiger Generationen über Gebühr zu beschränken.

Auszug aus den wesentlichen Entscheidungsgründen des Bundesverfassungsgerichtes:

“Als intertemporale Freiheitssicherung schützen die Grundrechte die Beschwerdeführenden (...) vor einer umfassenden Freiheitsgefährdung durch einseitige Verlagerung der durch Art. 20a GG aufgegebenen Treibhausgaserminderungslast in die Zukunft. (...) Ein umfangreicher Verbrauch des CO₂-Budgets schon bis 2030 verschärft (...) das Risiko schwerwiegender Freiheitseinbußen, weil damit die Zeitspanne für technische und soziale Entwicklungen knapper wird, mit deren Hilfe die Umstellung von der heute noch umfassend mit CO₂-Emissionen verbundenen Lebensweise auf klimaneutrale Verhaltensweisen freiheitsschonend vollzogen werden könnte. (...) Danach darf nicht einer Generation zugestanden werden, unter vergleichsweise milder Reduktionslast große Teile des CO₂-Budgets zu verbrauchen, wenn damit zugleich den nachfolgenden Generationen eine radikale Reduktionslast überlassen und deren Leben umfassenden Freiheitseinbußen ausgesetzt würde“ (BVerfG, 2021).

Die RM-Szenariotypen erlauben ein Operationalisierung dieser Fragestellung.

- (2) Implizieren anfänglich langsam steigende Reduktionssätze (\approx RM-4 und RM-6) eine nicht vertretbare Hypothek für die Zukunft, da diese später sehr hohe Reduktionssätze erfordern?
- (3) Oder sind spätere hohe Reduktionssätze wie in RM-4 oder RM-6 sogar sinnvoll, weil dadurch ein größerer zeitlicher Vorlauf für die notwendigen Investitionen besteht?¹⁴
- (4) Vermitteln anfangs schnell steigende Reduktionssätze (\approx RM-3 und RM-5) eine glaubwürdigere Klimaschutzpolitik, die Planungssicherheit für öffentliche und private Investitionen in eine fossilfreie Zukunft schafft?

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) empfiehlt z. B. „von einem linearen Reduktionspfad abzusehen. Eine frühzeitige überproportionale Reduktion bis 2030 erlaubt langfristig noch Spielraum, erfordert aber, dass erhebliche Maßnahmen jetzt angestoßen werden. Ein langsamer Einstieg, der auf steile Emissionsreduktionen in späteren Jahren hofft, gefährdet die Einhaltung des Budgets und der Klimaziele“ (SRU, 2020, p. 56). Wie die Abb. 1 und Abb. 2 zeigen, entsprechen die Szenariotypen RM-3-lin und RM-5-rad weitgehend diesen Empfehlungen des SRU.¹⁵ Die Kritik an einem linearen Reduktionspfad (RM-6-abs) des SRU würde dagegen auch auf RM-4-quadr zutreffen. Solche Emissionspfade - mit später stark ansteigenden jährlichen Reduktionsraten - würden voraussetzen, dass die eingesetzten Klimaschutzinstrumente und die dahinterstehende Klimapolitik eine sehr hohe Glaubwürdigkeit aufweisen, so dass die Wirtschaftsakteure tatsächlich die notwendigen hohen Reduzierungen in der Zukunft antizipieren. Diese Glaubwürdigkeit zu erreichen, würde eine große Herausforderung darstellen.

Mengen-Overshoot

Ein Mengen-Overshoot bedeutet im ESPM ein zeitweises Überschreiten eines vorher festgelegten CO₂-Budgets. Diese überschießende Menge wird dann durch Netto-Negativ-Emissionen bis 2100 ausgeglichen.¹⁶

¹⁴ Die notwendigen Investitionen könnten mehr im Rahmen normaler Investitionszyklen vonstattengehen. Die Notwendigkeit der Entwertung bestehender Investitionen könnte durch Verschiebung der hohen Reduzierungen nach hinten minimiert werden.

¹⁵ Der SRU stellt die Forderung auf, dass der zu bevorzugende Emissionspfad anfangs unterhalb eines korrespondierenden linearen Emissionspfades liegen sollte. Bei den Szenariotypen RM 3 – 5 kann der Startveränderungssatz frei gewählt werden. Wird ein Wert unter dem sich im Szenariotyp RM-6-abs ergebenden gewählt, liegen die Emissionspfade von RM 3 – 5 anfangs oberhalb dem korrespondierenden linearen Reduktionspfad (RM-6-abs). Die Emissionspfade von RM-3-lin und RM-5-abs schneiden aber relativ schnell den linearen Reduktionspfad (siehe Abb. 2). Soll der Emissionspfad von Anfang an unter dem korrespondierenden linearen Reduktionspfad liegen, kann dies bei den Szenariotypen RM 3 – 5 dadurch gewährleistet werden, dass als Startveränderungssatz ein Wert über dem korrespondierenden Wert, der sich bei RM-6-abs ergibt, gewählt wird. Ist der Wert beim linearen Reduktionspfad bereits relativ hoch, würde dies bedeuten, dass bei den Szenariotypen RM 3 – 5 ein noch höherer Wert gewählt werden müsste. Dies kann einen unrealistischen Startveränderungssatz bedingen. Auch im Sinne des SRU könnte es daher sinnvoller sein, statt zu verlangen, dass der Emissionspfad von Anfang an unter dem korrespondierenden linearen Reduktionspfad liegt, einen überproportionalen oder zumindest linearen Anstieg der jährlichen Reduktionssätze am Anfang zu fordern, wie dies bei den Szenariotypen RM-3-lin und RM-5-rad der Fall ist.

¹⁶ Netto-Negativ-Emissionen ergeben sich, wenn die negativen CO₂-Emissionen größer sind als die positiven CO₂-Emissionen und gehen damit über Netto-Null-Emissionen hinaus. Klimaneutralität bedeutet Netto-Null-Emissionen über alle Treibhausgase hinweg in CO₂eq. Folgende Möglichkeiten werden u. a. diskutiert, um negative CO₂-Emissionen zu realisieren: (1) Geologische Speicherung von

Dabei ist jedoch zu beachten:

- (1) Das Potential von Negativemissionen ist technisch, wirtschaftlich und in Bezug auf deren Dauerhaftigkeit¹⁷ sehr unsicher (vgl. SRU, 2020).
- (2) Auch ein Mengen-Overshoot kann zur Überschreitung von Kipppunkten im Klimasystem (vgl. PIK, 2018) führen, obwohl rechnerisch ein Budget eingehalten wird, das mit der angestrebten Begrenzung der Erderwärmung korrespondiert.

Negativemissionen sind zur Erreichung von Klimaneutralität grundsätzlich erforderlich, um (noch) nicht vermeidbare Treibhausgasemissionen wie z. B. Methan oder Lachgas aus der Landwirtschaft kompensieren zu können. Die entscheidende Frage ist, ob darüber hinaus auch ein Mengen-Overshoot einkalkuliert werden sollte, um vorher zu hohe CO₂-Emissionen auszugleichen.

In den folgenden exemplarischen Emissionszielen für die EU wurde auf die Einbeziehung eines Mengen-Overshoots verzichtet. In (Wiegand, et al., 2021) zeigen wir exemplarische Ergebnisse unter Berücksichtigung von Mengen-Overshoots.

CO₂, welches vorher bei der Verbrennung von Biomasse abgetrennt (BECCS), direkt aus der Luft gefiltert (DACCS) oder durch Pyrolyse von Biomasse gebunden (PyCCS) wurde. (2) Erhöhung der globalen Biomasse z. B. durch Aufforstung, Umwandlung von Ackerland zu Grünland oder mehr Humusbildung. (3) Mineralische Bindung von CO₂ durch Verwitterung von Basaltgestein, das auf Felder ausgebracht wird.

In Abgrenzung zum IPCC: Dort bezeichnet ein Overshoot die zeitweise Überschreitung eines bestimmten Niveaus globaler Erwärmung (vgl. IPCC, 2018b, p. 24).

¹⁷ Aufgeforstete Wälder können z. B. auch durch die Folgen des Klimawandels wieder vernichtet werden.

Exemplarische Emissionsziele für die EU

Verbleibendes globales Budget 420 Mrd. t

Den exemplarischen Emissionszielen in Tab. 3 liegen folgende Rahmendaten zu Grunde:

- (1) Verbleibendes globales CO₂-Budget ab 2018: 420 Mrd. t
($\approx 1,5^\circ\text{C}$ -Grenze / Einhaltungswahrscheinlichkeit 67%; siehe Tab. 1)
- (2) Gewichtung der Bevölkerung mit 50%¹⁸
- (3) Daraus ergibt sich ein verbleibendes CO₂-Budget für die EU ab 2020 von 21,2 Mrd. t.¹⁹

Szenariotyp	RM-1-const	RM-3-lin	RM-4-quadr	RM-5-rad	RM-6-abs
Zieljahr	Reduktionssätze gegenüber den Emissionen im Referenzjahr 1990				
(2019)	-23% (Ist-Wert)				
2025	-64%	-54%	-48%	-58%	-53%
2030	-81%	-82%	-84%	-82%	-78%
2035	-90%	-96%	-100%	-94%	-100%
2040	-95%	-100%	-100%	-98%	-100%
2050	-99%	-100%	-100%	-100%	-100%
Jahr CO ₂ -Neutralität	2051	2039	2034	2042	2034

Tab. 3: Exemplarische Emissionsziele für die EU – globales Budget 420 Mrd. t

Bei den hier unterlegten Rahmendaten müsste die EU z. B. im Szenariotyp RM-6-abs ihre Emissionen bis 2030 um 78% gegenüber 1990 senken und bereits in 2034 CO₂-Neutralität erreichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einhaltung eines globalen CO₂-Budgets von 420 Mrd. t (ohne Berücksichtigung eines Mengen-Overshoots) nicht mehr als realistisch erscheinen kann.

In unseren Tools (s. a. Kapitel: „Tools zum ESPM“) können u. a. andere globale Budgets, Gewichtungen der Bevölkerung und Potentiale für Netto-Negativ-Emissionen (und damit für Mengen-Overshoots) vorgegeben werden. In unseren Excel-Tools kann auch ein temporärer Corona-Effekt berücksichtigt werden.

Welche globalen Budgets korrespondieren mit dem 55%-Ziel der EU?

In Tab. 4 wird gefragt, mit welchem globalen CO₂-Budget ein CO₂-Reduktionsziel für die EU von 55% korrespondiert.²⁰ Es wird also im jeweiligen Szenariotyp geschaut, auf welche Höhe das globale

¹⁸ Hier wird ein verbleibendes globales Budget ab 2020 aufgeteilt und damit die Gewichtung der Bevölkerung ab 2020 angewendet. Der SRU spricht sich beispielsweise für eine Gewichtung der Bevölkerung mit 100% ab 2016 aus, da 2015 das Pariser Klimaabkommen verabschiedet wurde (vgl. SRU, 2020). Wir haben 2020 als Startpunkt u. a. gewählt, da die Vertragsstaaten bis 2020 nachgebesserte NDCs vorlegen sollten.

¹⁹ Berechnung der EU-Budgets: Laut EEA beliefen sich die gesamten CO₂-Emissionen (einschließlich „international transport“ und LULUCF) der EU27 in 2019 auf 2,92 Mrd. t (EEA, 2021). Gemäß GCP beliefen sich die globalen CO₂-Emissionen in 2019 auf 43 Mrd. t (GCP, 2021). Damit hatte die EU27 in 2019 einen Anteil an den globalen Emissionen von 6,8%. Die EU27 hat einen Anteil von 5,8% an der globalen Bevölkerung (UN, 2019). Damit ergibt sich ein gewichteter Verteilungsschlüssel von 6,3% bei einer Gewichtung der Bevölkerung mit 50%. Für 2018 wurden 42 Mrd. t und für 2019 wurden 43 Mrd. t vom globalen Budget ab 2018 abgezogen (GCP, 2021).

²⁰ In unserem ESPM-Excel-Tool kann auch untersucht werden, mit welcher Gewichtung der Bevölkerung oder mit welchem Potenzial für Netto-Negativ-Emissionen ein vorzuziehendes Ziel für 2030 korrespondiert. Außerdem kann das korrespondierende globale Budget,

Budget mindestens angehoben werden müsste, um ein 55%-Ziel für 2030 abbilden zu können (bei Beibehaltung der Gewichtung der Bevölkerung mit 50%).

Szenariotyp	RM-3-lin	RM-4-quadr	RM-5-rad	RM-6-abs
Globales CO₂-Budget ab 2018 in Mrd. t	804	691	884	672
EU-CO ₂ -Budget ab 2020 in Mrd. t	45,2	38,1	50,2	36,9
∑ EU-Emissionen 2020 – 2030 in Mrd. t	24,6	24,8	24,5	24,8
Zieljahr	Reduktionssätze gegenüber den Emissionen im Referenzjahr 1990			
2025	-42%	-41%	-42%	-41%
2030	-55%	-55%	-55%	-55%
2035	-68%	-71%	-66%	-70%
2040	-77%	-84%	-75%	-85%
2050	-90%	-98%	-87%	-100%
Jahr CO ₂ -Neutralität	2071	2052	2086	2045

Tab. 4: EU-2030-Ziel 55% - korrespondierende globale Budgets

Die Ergebnisse in Tab. 4 zeigen, dass sich die Klimaziele der EU mit den Szenariotypen RM-3 und RM-5 nicht abbilden lassen. Das 55%-Ziel für 2030 lässt sich nur mit einem hohen globalen Budget (> 800 Mrd. t) abbilden. Dies liegt daran, dass diese Szenariotypen eigentlich am Anfang ein schnelles Ansteigen der jährlichen Reduktionssätze implizieren. Durch ein weniger ambitioniertes Ziel für 2030, wird diese Eigenschaft „ausgebremst“, was innerhalb dieser Szenariotypen nur durch ein hohes Budget ausgeglichen werden kann. Innerhalb dieser Szenariotypen würde auf der anderen Seite CO₂-Neutralität erst weit nach 2050 erreicht; wobei sich die EU Klimaneutralität bis 2050 als Ziel gesetzt hat. Die bestehenden EU-Ziele lassen sich daher nur mit später stark steigenden jährlichen Reduktionssätzen mit den Szenariotypen RM-4 und RM-6 annähernd abbilden. Außerdem würde eine Orientierung an einem globalen Budget größer 800 Mrd. t nicht zur Grundaussage der EU passen, dass die Einhaltung der 1,5°C-Grenze weiterhin anstrebt würde.

Wie aus der Folgeabschätzung hervor geht, hat sich die EU bei der Herleitung ihres 55%-Ziel für 2030 eher an linearen Emissionspfaden (RM-6) orientiert (vgl. European Commission, 2020, p. 9). Wenig bewusst dürften bisher die dann notwendigen herausfordernden Zwischenziele für 2035 und 2040 sein (auch wenn die Bevölkerung mit nur 50% gewichtet und bereits ein relativ hohes globales Budget unterlegt wird; siehe Tab. 4). Zu beachten ist auch das notwendige Zwischenziel für 2025 von gut -40% (wobei bis 2019 erst -23% erreicht wurden).

Falls die EU sich an einem globalen Budget deutlich unter 700 Mrd. t orientieren wollte (und damit näher an der 1,5°C-Grenze), wäre erklärungsbedürftig, mit welchem Emissionspfad und insbesondere welchem Verlauf der jährlichen Reduktionssätze dies mit dem beschlossenen Ziel für 2030 von -55% vereinbar sein könnte.

Gewichtung der Bevölkerung oder Potenzial für Netto-Negativ-Emissionen zu einem vorzuziehenden Jahr der Emissionsneutralität gesucht werden.

Der SRU schreibt zur Frage des verbleibenden globalen Budgets: „Zusammenfassend kann ein restliches globales CO₂-Budget, das sich auf die Begrenzung der Temperaturerhöhung auf maximal 1,5 °C bezieht, gut begründet werden. Für eine 50 %ige Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung beläuft sich dieses auf 580 Gt CO₂ ab 2018. Für die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,75 °C mit einer 67 %igen Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung beträgt es 800 Gt CO₂ ab dem Jahr 2018. Dieses kann als maximales Budget aus den Vorgaben des Pariser Klimaabkommens abgeleitet werden“ (SRU, 2020, p. 47). Der SRU hält damit maximal ein globales verbleibendes Budget von 800 Mrd. t noch mit der Einhaltung der 2°C-Grenze für vereinbar. Wollte man die 1,5°C-Grenze mit einer Wahrscheinlichkeit von wenigstens 67% einhalten, so ergäbe sich ein Restbudget in einer Größenordnung von 420 Mrd. t, das ohne massive Netto-Negativ-Emissionen nicht mehr erreichbar ist.

Es ist einschränkend darauf hinzuweisen, dass die EU-Ziele sich auf alle Treibhausgase beziehen. Die hier gezeigten Emissionsziele beziehen sich nur auf CO₂. Daher sind die Werte nicht eins zu eins vergleichbar, wenn unterschiedliche Treibhausgase unterschiedlich stark gesenkt werden sollen.²¹

Grafische Darstellung der RM-Szenariotypen bei einem globalen Budget von 580 Mrd. t

Abb. 1 und Abb. 2 zeigen exemplarisch die sich ergebenden jährlichen Reduktionssätze und Emissionspfade für die EU bei einem verbleibenden globalen CO₂-Budget ab 2018 von 580 Mrd. t (bei Beibehaltung der Gewichtung der Bevölkerung mit 50%).²² Das notwendige Emissionsziel für 2030 gegenüber 1990 würde bei diesen Rahmendaten beispielsweise im Szenariotyp RM-6 -61% betragen. Das EU-Parlament hatte im Trilog zum EU-Klimagesetz eine Anhebung auf -60% gefordert.

²¹ In 2018 betrug der Anteil der CO₂-Emissionen an den gesamten Treibhausgasemissionen der EU in CO₂eq rund 82%. Aufgrund der ausgeprägten Budgeteigenschaft von CO₂, könnte ein separates EU-Ziel und ein separates EU-Budget für CO₂ sinnvoll sein. Aufgrund der großen Unsicherheiten (methodisch, Datenerhebung, Dauerhaftigkeit) bei CO₂-Emissionen durch Landnutzungsänderungen (LULUCF) könnte es sinnvoll sein, zumindest parallel ein separates EU-Ziel (und ein separates EU-Budget) nur für CO₂ aus fossilen Quellen und Zementherstellung zu verfolgen. Wir bieten unter <http://www.save-the-climate.info> auch ein ESPM-Excel-Tool an, das mit solchen CO₂-Budgets rechnet (Wolfsteiner & Wittmann, 2021b).

²² Der konstante jährliche Reduktionssatz in RM-1 beträgt hier -8,4%. Der konstante jährliche Reduktionsbetrag im Szenariotyp RM-6 beträgt -0,13 Mrd. t bei einem Startreduktionssatz in 2020 von -4,5%.

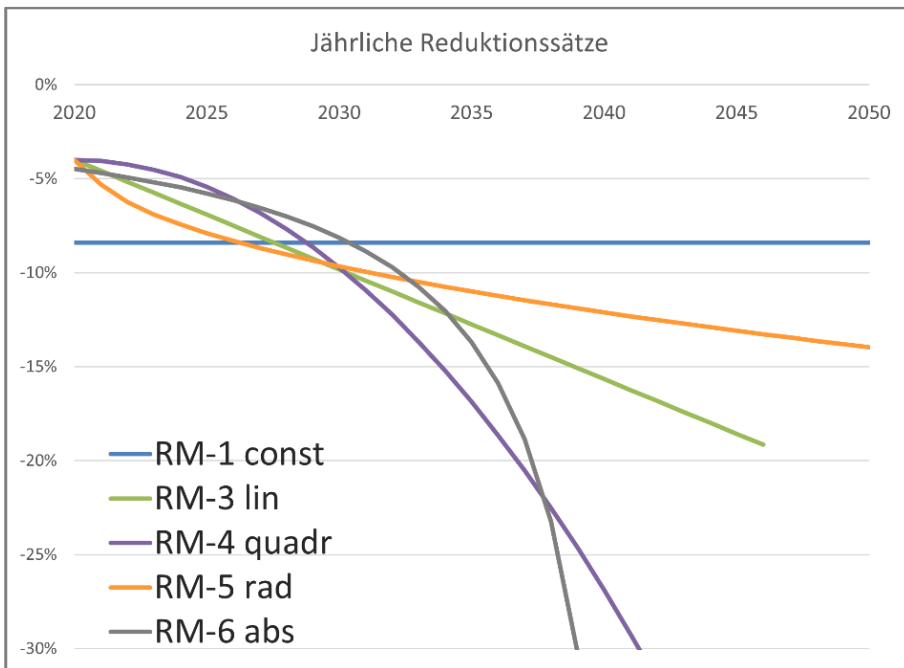


Abb. 1: Exemplarische jährliche Reduktionssätze der EU – globales Budget 580 Mrd. t

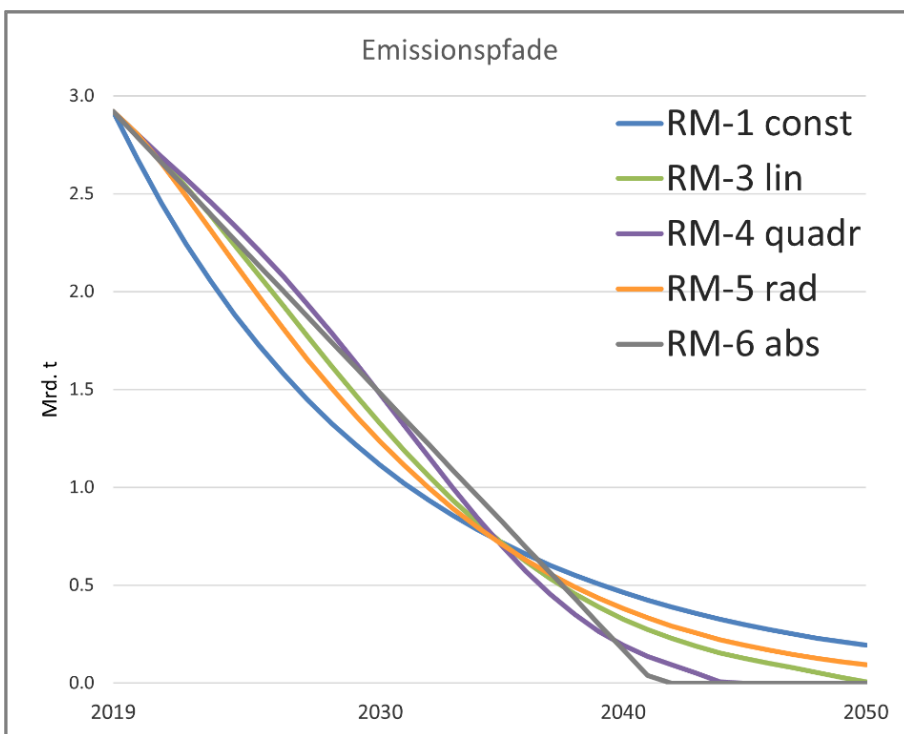


Abb. 2: Exemplarische EU-Emissionspfade – globales Budget 580 Mrd. t

Schlussfolgerungen

Es konnten und sollten hier nur exemplarische Emissionsziele für die EU gezeigt werden, da wichtige Rahmendaten letztendlich politisch noch eingehend diskutiert und entschieden werden müssen.

Daher schlagen wir folgende politische Agenda vor:

- Rahmendaten auf Basis des wissenschaftlichen Kenntnisstands konkretisieren, insbesondere was das globale CO₂-Budget und den Umfang von negativen Emissionen betrifft.
- Auf dieser Basis nationale CO₂-Budgets ableiten, die einer fairen und ökonomisch sinnvollen Aufteilung eines globalen CO₂-Budgets gerecht werden.
- Sich bei Emissionszielen an einem klimapolitisch sinnvollen Verlauf der jährlichen Reduktionssätze orientieren.
- Die Rahmendaten und Reduktionsziele regelmäßig auf der Basis neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse und technischer/realer Entwicklungen nachsteuern.

Unabhängig von den konkret gewählten Rahmendaten, lassen die gezeigten exemplarischen Emissionsziele für die EU folgende Schlüsse zu:

Das 55%-Ziel für 2030 erfordert die Festlegung ambitionierter weiterer Zwischenziele für 2025, 2035 und 2040, damit in Summe ein Paris-kompatibles CO₂-Budget für die EU eingehalten und die notwendige Planungssicherheit für Investitionen gegeben werden kann.

Bei einer stärkeren Orientierung an der 1,5°C-Grenze, müsste wohl auch das 2030er Ziel noch einmal angefasst werden und ambitionierter ausfallen.

Die jeweils notwendigen Größenordnungen können mit dem ESPM transparent und nachvollziehbar ermittelt werden.

Tools zum ESPM

- Webanwendungen
 - Unter <http://eu.climate-calculator.info> bieten wir eine Webanwendung für die EU an.
 - Unter <http://espm.climate-calculator.info> bieten wir ein universell anwendbare Webanwendung an. Das einzuhaltende Budget muss hier jedoch bekannt sein.
- Auf unserer Webseite <http://www.save-the-climate.info> stellen wir außerdem Excel-Tools zur Verfügung, mit denen für jedes Land der Welt Referenzwerte mit dem ESPM-Ansatz berechnet werden können.
 - Zur Berechnung der exemplarischen Emissionsziele der EU in diesem Papier wurde das universell anwendbare Tool ‚Paths_RM_ST‘ verwendet (Wolfsteiner & Wittmann, 2021c), das auch auf [Zenodo](#) veröffentlicht wurde. Die Ergebnisse können grundsätzlich auch mit der Webanwendung <http://eu.climate-calculator.info> nachvollzogen werden. Aufgrund eines etwas anderen iterativen Lösungsverfahrens und weniger Eingabemöglichkeiten, können die Ergebnisse leicht variieren.
 - Das Excel-Tool ‚ESPM‘ enthält eine Datenbank mit den Emissionsdaten aller Länder der Welt auf der Basis fossiler Emissionen und Zementherstellung (Wolfsteiner & Wittmann, 2021b). Mit diesem Tool können daher Paris-kompatible Emissionspfade für alle Länder der Welt ermittelt werden. Das Tool haben wir auch auf [Zenodo](#) veröffentlicht.

Literaturverzeichnis

BMU, 2019. *Hintergrundpapiere zum 10. Petersberger Klimadialog*. [Online]

Available at: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ambitionsmechanismus_pariser_abkommen_bf.pdf

BVerfG, 2021. *Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021 - 1 BvR 2656/18 -, Rn. 1-270*. [Online]

Available at: http://www.bverfg.de/e/rs20210324_1bvr265618.html

EEA, 2021. *EEA greenhouse gas - data viewer*. [Online]

Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>

[Accessed 01 06 2021].

European Commission, 2020. *Impact Assessment - Stepping up Europe's 2030 climate ambition*. [Online]

Available at: https://ec.europa.eu/germany/news/20200917-neues-klimaziel_de

GCP, 2021. *Global Carbon Project*. [Online]

Available at: <https://www.globalcarbonproject.org/>

[Accessed 27 2 2021].

IPCC, 2018a. *Special Report 1.5°C. Chapter 2: Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development*. [Online]

Available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

IPCC, 2018b. *Special Report 1.5°C. Summary for Policymakers*. [Online]

Available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

MCC, 2020. *Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change*. [Online]

Available at: <https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html>

[Accessed 21 12 2020].

Peters, G. P., Andrew, R. M., Solomon, S. & Friedlingstein, P., 2015. Measuring a fair and ambitious climate agreement using cumulative emissions.

Environmental Research Letters, 15 October, Band 10.

PIK, 2018. *Auf dem Weg in die "Heißzeit"? Planet könnte kritische Schwelle überschreiten*. [Online]

Available at: <https://www.pik-potsdam.de/aktuelles/pressemitteilungen/auf-dem-weg-in-die-heisszeit-planet-koennte-kritische-schwelle-ueberschreiten>

[Accessed 25 06 2019].

Raupach, M. R. et al., 2014. Sharing a quota on cumulative carbon emissions. *Nature Climate Change*, Volume 4, pp. 873 - 879.

Sargl, M., Wiegand, D., Wittmann, G. & Wolfsteiner, A., 2021a. *Distribution of a Global CO2 Budget - A Comparison of Resource Sharing Models*.

[Online]

Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4603032>

Sargl, M., Wiegand, D., Wittmann, G. & Wolfsteiner, A., 2021b. *Paris-kompatible Emissionsziele für die sechs größten Emittenten*. [Online]

Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4764408>

Sargl, M., Wolfsteiner, A. & Wittmann, G., 2017. The Regensburg Model: reference values for the (I)NDCs based on converging per capita emissions. *Climate Policy*, 17(5), p. 664 – 677.

SRU, 2020. *Umweltgutachten 2020*. [Online]

Available at: <https://www.umweltrat.de>

UN, 2019. *World Population Prospects 2019*. [Online]

Available at: <https://population.un.org/wpp/>

UNEP, 2019. *Emissions Gap Report 2019*. [Online]

Available at: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2019>

UNFCCC, 2020. *NDC of the EU*. [Online]

Available at: <https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/pages/Party.aspx?party=EUU>

UNFCCC, 2021. *NDC Synthesis Report*. [Online]

Available at: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/nationally-determined-contributions-ndcs/ndc-synthesis-report>

Wiegand, D. et al., 2021. Berechnung Paris-kompatibler Emissionspfade mit dem ESP-Modell am Beispiel der EU. *Wirtschaftsdienst*, 20 2, pp. 127 - 133.

Wittmann, G., 2021. *Resource Sharing Models – A Mathematical Description*. [Online]

Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4405448>

Wolfsteiner, A. & Wittmann, G., 2021a. *Mathematical Description of the Regensburg Model Scenario Types RM 1 – 6*. [Online]

Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4540475>

Wolfsteiner, A. & Wittmann, G., 2021b. *Tool for the Calculation of Paris-compatible Emission Paths with the ESPM*. [Online]

Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4580310>

Wolfsteiner, A. & Wittmann, G., 2021c. *Tool for the Calculation of Paris-compatible Global Emission Paths with the RM Scenario Types*. [Online]

Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4584562>