



Das Kopernikus-Projekt ENavi

DIE TRANSFORMATION DES STROMSYSTEMS MIT FOKUS KOHLEAUSSTIEG

GEFÖRDERT VOM

KOPERNIKUS
ENavi **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

IMPRESSUM

Herausgeber

Kai Hufendiek
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung (IER)
Heßbrühlstraße 49a, 70565 Stuttgart
Tel: +49 (0) 711-685-87801
E-Mail: kai.hufendiek@ier.uni-stuttgart.de
www.ier.uni-stuttgart.de

Michael Pahle
Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
P.O. Box 60 12 03, 14412 Potsdam
Tel: +49 (0) 331-288-2465
E-Mail: michael.pahle@pik-potsdam.de
www.pik-potsdam.de

Kontakt

Geschäftsstelle des Kopernikus-Projekts Energiewende-Navigationssystem | ENavi
Institute for Advanced Sustainability Studies e.V. (IASS), Berliner Straße 130, 14467 Potsdam
Tel: +49 (0) 331-28822-300, E-Mail: enavi-media@iass-potsdam.de, www.kopernikus-projekte.de/enavi

Verantwortliche Redakteurin

Claudia Hofer: claudia.hofer@ier.uni-stuttgart.de

Autoren

Fahl, U.: ulrich.fahl@ier.uni-stuttgart.de
Gaschnig, H.: hannes.gaschnig@iass-potsdam.de
Hofer, C.: claudia.hofer@ier.uni-stuttgart.de
Hufendiek, K.: kai.hufendiek@ier.uni-stuttgart.de
Maier, B.: beatrix.maier@ier.uni-stuttgart.de
Pahle, M.: michael.pahle@pik-potsdam.de
Pietzcker, R.: pietzcker@pik-potsdam.de
Quitow, R.: rainer.quitow@iass-potsdam.de
Rauner, S.: rauner@pik-potsdam.de
Sehn, V.: vera.sehn@ier.uni-stuttgart.de
Thier, P.: thier@uni-bremen.de
Wiesmeth, M.: michael.wiesmeth@ier.uni-stuttgart.de

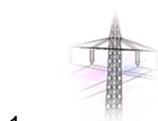
Dieser Bericht fasst die Forschungsergebnisse des Schwerpunktthemas 1 von ENavi zusammen. **Sämtliche, am Schwerpunktthema beteiligten Projektpartner haben damit direkt oder indirekt zu den Inhalten dieses Berichtes beigetragen.** Zu den 58 Verbundpartnern des Projektes gehören 23 Forschungseinrichtungen, 18 Universitätsinstitute, drei Nichtregierungsorganisationen, neun Wirtschaftsunternehmen, drei Stadtwerke und zwei Gebietskörperschaften. Über 20 Kompetenzpartner bringen zusätzlich ihre Praxiserfahrungen ein. Mehr Informationen: www.kopernikus-projekte.de/enavi

Bildnachweise

Titelbild: FONA/photothek, Ute Grabowsky

Weitere Bilder:

1. „Strommast“ - <https://search.creativecommons.org/photos/79395b31-7f04-4867-a924-88c4f7b2d7b8>
2. „Ökostrom“ - <https://search.creativecommons.org/photos/ecae3ad-4350-43f9-a58e-3edc1c6de40b>
3. „Orsoy“ - <https://search.creativecommons.org/photos/b314a37c-eba4-4b7e-a707-3fd2b46c72cf>
4. „A Living, Breathing Economy“ - <https://search.creativecommons.org/photos/f4443083-cb11-440b-bf2c-bdc64c0be599>
5. „Gänseblümchen“ - <https://search.creativecommons.org/photos/5f6878ee-477b-47ca-936b-d95757a20dd3>



Stand

08/2019

INHALT

Kurzfassung	5
1 Die Transformation des Stromsystems	6
2 Der ENavi-Prozess	7
3 Szenarien für den Kohleausstieg	8
3.1 Ausgangsszenario KSP90aE	10
3.2 Vergleichsszenario KAS	11
3.3 Vergleichsszenario COP	12
3.4 Zertifikatsstilllegung	13
3.5 Steigerung der EE-Ausbauraten	14
3.6 Vergleichsszenarien COP+ und KAS+	15
4 Modellergebnisse	16
4.1 Rückblick: Effizienz von Sektorzielen	17
4.2 Stromsystem	18
4.3 Energiesystem	26
4.4 Wirtschaftssystem, Ressourcen und Umwelt	28
5 Multikriterielle Bewertung der Szenarien	33
5.1 Bewertung der Szenarien am Beispiel KSP90aE und KAS	34
5.2 Im Detail: Effektivität 2030	35

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen nach Sektoren in Deutschland in Mt CO ₂ -Äquivalenten (2017). Quelle: UBA (2018)	6
Abbildung 2: Der ENavi-Prozess	7
Abbildung 3: Vergleich unterschiedlicher Kohleausstiegspfade für Deutschland von 2020 bis 2040.....	11
Abbildung 4: CO ₂ -Mindestpreis zwischen 2020 und 2050	12
Abbildung 5: Gesamtsstilllegungsmengen über den Zeitraum 2020 bis 2050	13
Abbildung 6: Mindest-Anteil EE-Erzeugung am Bruttostromverbrauch.....	14
Abbildung 7: Schematische Übersicht über den Aufbau der Szenarien.....	15
Abbildung 8: Gliederung der Modellergebnisse entlang der Systemebene	16
Abbildung 9: Drei Themenbereiche zur Strukturierung der Folgenabschätzung.....	16
Abbildung 10: Treibhausgas-Emissionen in 2030 und 2050 nach Sektoren in Abhängigkeit von Sektorzielen und sektorübergreifenden Zielen	17
Abbildung 11: Kohleverstromung in Deutschland in 2030 und 2050 zweier Szenarien	17
Abbildung 12: Vergleich der Stromerzeugung nach Energieträgern der Modelle LIMES und TIMES je Szenario.....	18
Abbildung 13: Kraftwerkskapazitäten nach Energieträgern in 2015, 2030 und 2050 basierend auf unterschiedlichen Szenarien (links: LIMES, rechts: TIMES).....	19
Abbildung 14: Endogen berechneter ETS-Preis von 2015 bis 2050 in LIMES und TIMES.....	20
Abbildung 15: Stromerzeugung aus Steinkohle zwischen 2020 und 2035 gemäß der Szenarien KAS (links) und KAS+ (rechts)	21
Abbildung 16: Nettostromexporte von 2010 bis 2050 je Szenario in LIMES und TIMES	22
Abbildung 17: CO ₂ -Emissionen der Energieumwandlung zwischen 2015 und 2045 je Szenario in LIMES und TIMES.....	23
Abbildung 18: Kumulierte Stromemissionen zwischen 2020 und 2050 [Gt CO ₂].....	24
Abbildung 19: Strompreisentwicklung von 2010 bis 2050 je Szenario (LIMES).....	25
Abbildung 21: Stromerzeugung aus KWK-Anlagen von 2020 bis 2050 je Szenario	26
Abbildung 20: Fernwärmeerzeugung frei Netz von 2020 bis 2050 je Szenario	26
Abbildung 22: Primärenergieverbrauch Erdgas von 2010 bis 2050	27
Abbildung 23: Mittelfristiger Zusammenhang zwischen Bruttoinlandsprodukt und Emissionsreduktion	28
Abbildung 24: CO ₂ -Preise in 2030 und 2050 nach Szenarien.....	29
Abbildung 25: Auswirkung verschiedener Verteilungsmechanismen auf die Belastung der Haushalte der Einkommensgruppe mit 2100 – 2740 Euro Monatseinkommen.....	30
Abbildung 26: Wasserentnahme nach Energieträger und Szenario zwischen 2010 und 2050	31
Abbildung 27: Flächenverbrauch nach Energieträger und Szenario zwischen 2010 und 2050	31
Abbildung 28: Anzahl vorzeitiger Todesfälle in Abhängigkeit von EU-Klimaschutzziel.....	32
Abbildung 29: Geografische Verteilung der vorzeitigen Todesfälle bei starkem und schwachem EU-Ziel.....	32
Abbildung 30: Die zehn Bewertungskriterien des ENavi-Ansatzes	33
Abbildung 31: Vergleich der multikriteriellen Bewertung des Ausgangsszenarios KSP90aE mit dem Kohleausstiegsszenario KAS.....	34
Abbildung 32: Die Bewertung der Unterkategorien für das Kriterium "Effektivität" für verschiedenen Szenarien	35

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Instrumente der Szenarien in der Energiewirtschaft.....	8
Tabelle 2: Maßnahmen zur Emissionsreduktion	9
Tabelle 3: Deutsche Sektorziele zur Emissionsreduktion gegenüber 1990.....	10
Tabelle 4: Nationaler CO ₂ -Mindestpreis der Vorreiterallianz	10

KURZFASSUNG

Der Dekarbonisierung des Stromsystems kommt eine zentrale Rolle bei der Erreichung nationaler und internationaler Klimaschutzziele zu, da eine zunehmende Elektrifizierung in anderen Sektoren nur dann eine positive Klimaschutzwirkung entfalten kann, wenn der dafür benötigte Strom CO₂-arm hergestellt wurde. Deshalb wird im Schwerpunktthema 1 des Kopernikus-Projekts ENavi die Transformation des Stromsystems analysiert. Dabei wird der Kohleausstieg als nächster wichtiger Schritt aufgrund der aktuellen politischen Diskussionen besonders in den Fokus gerückt. Der erarbeitete „ENavi-Prozess“ bietet eine systematische Vorgehensweise zur Identifikation, Analyse und Bewertung verschiedener Transformationsszenarien für das deutsche Energiesystem. Dabei werden sowohl Kernmaßnahmen zur direkten Reduktion von CO₂-Emissionen, als auch flankierende Maßnahmen zur Reduktion unerwünschter Folgen interdisziplinär untersucht, multikriteriell bewertet und in einem transdisziplinären Diskurs mit Stakeholdern reflektiert und adaptiert.

Die analysierten Szenarien beinhalten ein Ausgangsszenario (KSP90aE), die zwei Grundszzenarien, die auf den jeweiligen primären Maßnahmen „Ordnungsrechtlicher Kohleausstieg“ (KAS) bzw. „CO₂-Mindestpreis“ (COP) aufbauen. Diese wurden im Hinblick auf die Reduktion unerwünschter Nebeneffekte durch erweiterte Szenarien (KAS+ und COP+) mit den flankierenden Maßnahmen „Zertifikatsstilllegung“ und „Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien“ ergänzt. Alle fünf Szenarien stellen eine Zielerreichung in den Sektoren Wärme und Verkehr sicher und berücksichtigen daher z. B. einen Strommehrbedarf aus diesen Sektoren. Sie werden mit unterschiedlichen Modellen berechnet, um Auswirkungen im gesamten System abschätzen zu können: Wechselwirkungen innerhalb des Stromsystems ebenso wie im Energiesystem zwischen den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr sowie im gesamten Wirtschaftssystem und Auswirkungen im Bereich der Ressourcen und der Umwelt. Die in den inter- und transdisziplinären Diskurs integrierte systemische Sichtweise ermöglicht eine ganzheitliche und umfassende Analyse der Transformationspfade.

Aus der Analyse ergeben sich verschiedene Erkenntnisse: Sektorübergreifende Reduktionsziele sind gesamtwirtschaftlich effizienter und damit kostengünstiger als sektorspezifische Klimaschutzziele. Außerdem führt die Reduktion der deutschen Emissionen ohne eine gleichzeitige Stilllegung der entsprechenden Zertifikate im EU-ETS zu einem Absinken des ETS-Preises und damit zu einer Erhöhung der Emissionen in anderen EU-Ländern („Wasserbetteffekt“), so dass insgesamt in der EU der deutsche Kohleausstieg ohne gleichzeitige Stilllegung einer adäquaten Menge von Zertifikaten zu keinen nennenswerten Emissionsminderungen führen würde. Ein weiterer Nebeneffekt ist der „Rebound-Effekt“: Der Mehrbedarf in der Stromproduktion durch die ordnungsrechtliche Abschaltung von Kohlekraftwerken wird nur zu einem Teil durch andere Energieträger ersetzt. Ein beachtlicher Teil wird durch eine erhöhte Auslastung der weiter in Betrieb befindlichen modernen Steinkohlekraftwerke substituiert (Kohle-Rebound). Ebenso steigt die Erdgasnutzung an (Gas-Rebound). Der Rebound-Effekt muss ebenso durch die Stilllegung von Zertifikaten begrenzt werden. Alternativ verhindert auch eine CO₂-Bepreisung beide o. a. Effekte und erreicht dies bei in Summe niedrigeren Systemkosten.

Neben diesen systemischen Effekten müssen jedoch auch die Auswirkungen auf den Endverbraucher berücksichtigt werden, denn je nach Umverteilungsmechanismus und politischer Instrumentierung ergeben sich unterschiedliche Kostenbelastungen für die Haushalte. Es zeigt sich, dass bei Einführung einer CO₂-Bepreisung die geringsten spezifischen Emissionsminderungskosten im System entstehen, aber aufgrund der damit verbundenen erheblichen zusätzlichen Einnahmen für den Staat, deutliche Mehrbelastungen für die Haushalte entstehen. Die Effizienz der CO₂-Bepreisung kommt daher nur bei gleichzeitiger Einführung entsprechender Kompensationsmaßnahmen bei den Haushalten an.

Diese und weitere Ergebnisse des Schwerpunktthemas „Die Transformation des Stromsystems“ werden im folgenden Endbericht zusammenfassend dargestellt und erläutert.

1 DIE TRANSFORMATION DES STROMSYSTEMS

Der Dekarbonisierung des Stromsystems kommt eine zentrale Rolle bei der Erreichung nationaler und internationaler Klimaschutzziele zu.

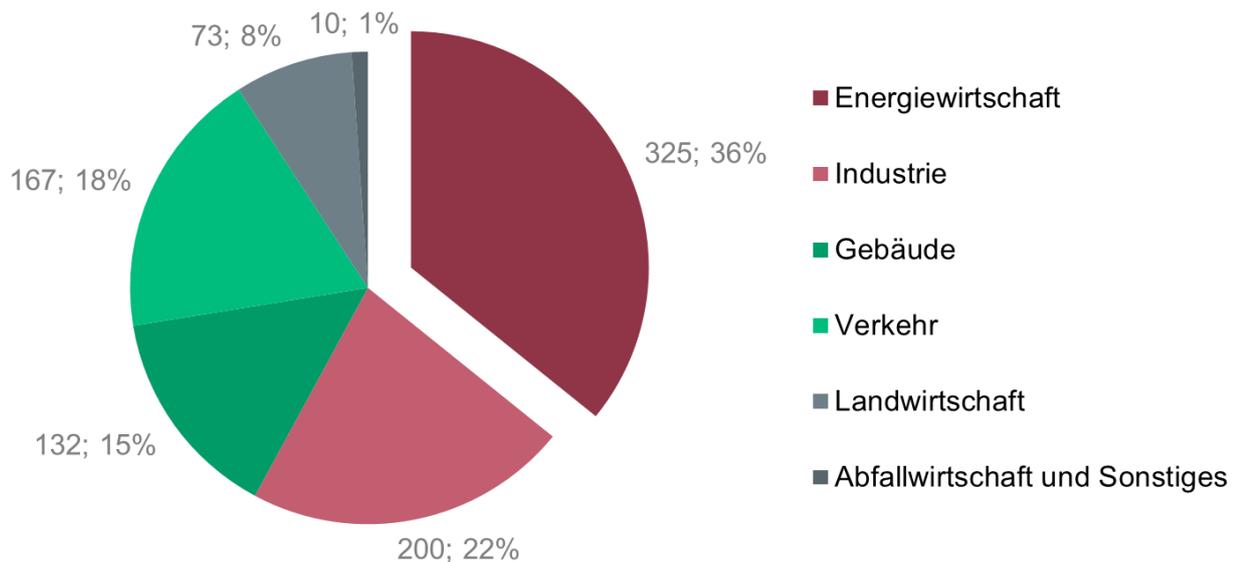


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen nach Sektoren in Deutschland in Mt CO₂-Äquivalenten (2017).
Quelle: UBA (2018)

Im Rahmen der Energiewende hat sich Deutschland **ambitionierte langfristige Klimaschutzziele** gesetzt. Stufenweise sollen die Treibhausgasemissionen bis 2050 um mindestens 80% ggü. 1990 reduziert werden.

Auf der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris hat sich die weltweite Staatengemeinschaft verpflichtet, die **Steigerung der globalen Durchschnittstemperatur** auf deutlich **unter zwei Grad Celsius** gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.

Der **Sektor "Energiewirtschaft"** verursachte 2017 mit 325 Mt CO₂-Äquivalenten ca. **36% der nationalen Treibhausgasemissionen** von insgesamt 907 Mt CO₂-Äquivalenten.

Die **Stromerzeugung durch Kohle** hat mit 223 Mt CO₂-Äquivalenten einen **Anteil von fast 70%** daran und stellt somit einen bedeutenden Stellhebel bei der Reduzierung der Treibhausgasemissionen dar.

Der **Dekarbonisierung des Stromsektors** kommt also eine zentrale Rolle im Kontext der Energiewende zu.

Erst durch **CO₂-armen Strom** ist eine zunehmende **Elektrifizierung** im Verkehr, in der Industrie und im Gebäudebereich mit einer positiven **Klimaschutzwirkung** verbunden.

2 DER ENAVI-PROZESS

Der ENavi-Prozess bietet eine systematische Vorgehensweise zur Identifikation, Analyse und Bewertung verschiedener Transformationsszenarien für das deutsche Energiesystem.

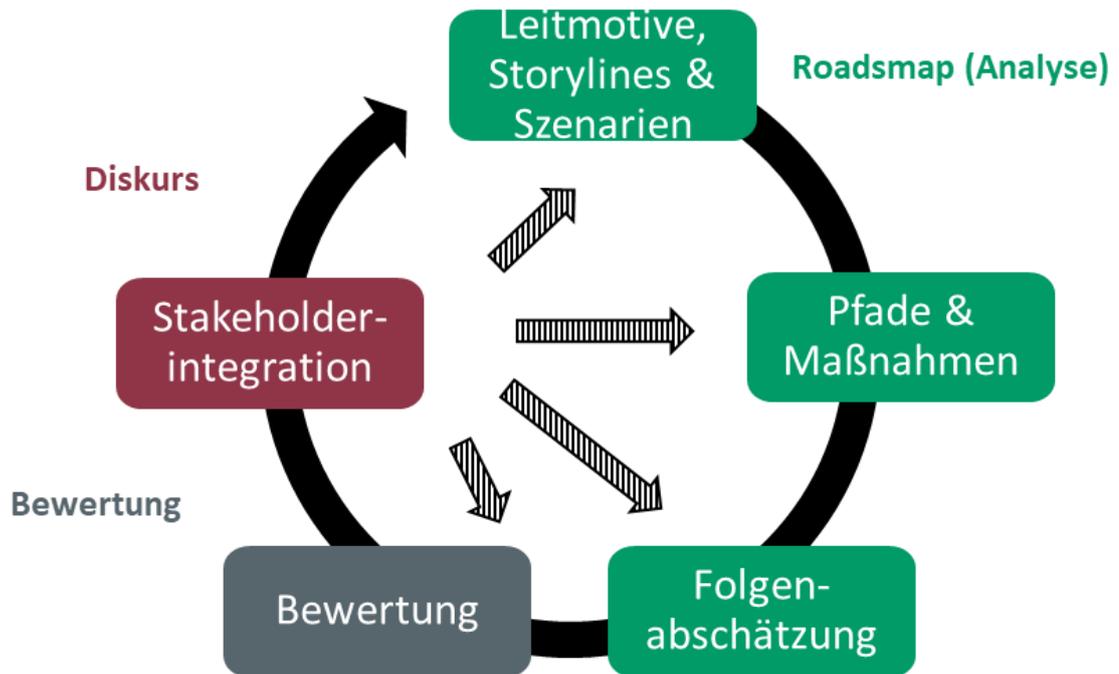


Abbildung 2: Der ENavi-Prozess

Der ENavi-Prozess erfolgt in **fünf iterativen Schritten**, die in die **Bereiche „Analyse“, „Bewertung“ und „Diskurs“** untergliedert sind.

Zuerst werden vor dem Hintergrund übergeordneter Storylines **Szenarien** entworfen und durch das Design von „Policy Packages“, d. h. von **Maßnahmenbündeln**, konkretisiert.

Kernmaßnahmen dienen dabei der direkten **Reduktion von CO₂-Emissionen** und werden ergänzt durch flankierende Maßnahmen, welche beispielsweise die **gesellschaftliche Akzeptanz** der Kernmaßnahmen erhöhen oder unerwünschte Folgen reduzieren sollen.

Die resultierenden **Transformationspfade** sind die Grundlage der anschließenden quantitativen und qualitativen Folgenabschätzung.

In der **Bewertungsphase** werden die einzelnen **Wirkungen integriert betrachtet** und evaluiert sowie Maßnahmen abgewogen.

Der **„Diskurs“** dient dem **transdisziplinären Austausch mit Stakeholdern** und Entscheidungsträgern. So sollen mögliche **Zielkonflikte** identifiziert und die praktische Umsetzbarkeit der Maßnahmenbündel sichergestellt werden.

Idealerweise findet die Integration von Stakeholdern über den gesamten Prozess statt.

3 SZENARIEN FÜR DEN KOHLEAUSSTIEG

Übersicht über die im Ausgangsszenario sowie den ENavi-Vergleichsszenarien enthaltenen Politikmaßnahmen in der Energiewirtschaft.

Tabelle 1: Instrumente der Szenarien in der Energiewirtschaft

Orientierung	Einzelmaßnahme	Ausgangsszenario (KSP90aE)	Vergleichsszenario mit Policy Package Variante			
			Abschaltung (KAS)	Abschaltung + (KAS+)	CO ₂ -Preis + (COP+)	CO ₂ -Preis (COP)
Ordnungsrecht	Schnelle Variante eines Ordnungsrechtlichen Kohleausstiegs durch Vorgabe eines Ausstiegsfahrplans (KAS).	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein
	EEG-Reform zur Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien durch Erhöhung der Ausschreibungsmengen für Versteigerungen (+EE)	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein
Markt	Nutzung der vorhandenen ETS-Option zur nationalen Stilllegung von CO₂-Zertifikaten bei der Reduktion von Emissionen in der deutschen Energiewirtschaft (ZS)	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein
	Implementierung eines CO₂-Mindestpreises im ETS für energiewirtschaftliche Anlagen im deutschen Handelsraum (COP)	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja

Im Rahmen des ENavi-Prozesses werden wahrscheinliche **Folgen** potentieller **Politikmaßnahmen** bzw. **Maßnahmenbündel** szenariobasiert bewertet. Ein besonderer Fokus wird dabei auf den **Kohleausstieg** gelegt.

Dazu werden **fünf Szenarien** definiert: Das Ausgangsszenario **KSP90aE** sowie die vier Vergleichsszenarien **KAS**, **KAS+**, **COP** und **COP+**.

Für die Ausgestaltung der Vergleichsszenarien wird ein Set verschiedener **marktlicher sowie ordnungsrechtlicher Einzelmaßnahmen** für den Sektor Energiewirtschaft herangezogen.

Die resultierenden Vergleichsszenarien bestehen aus dem **Szenariorahmen** und einem **zusätzlich implementierten Maßnahmenbündel** aus je ein bis drei Einzelmaßnahmen zur Emissionsreduktion.

Das Ausgangsszenario **KSP90aE** geht über den existierenden EU-Emissionshandel (ETS) von **keinen weiteren Maßnahmen** innerhalb der Energiewirtschaft aus und stellt somit eine Bewertung des bestehenden Rechtsrahmens im Stromsektor dar. Es unterstellt jedoch ohne Definition konkreter Maßnahmen, dass die **Minderungsziele des Klimaschutzplans 2030 und 90% 2050 in den Sektoren Wärme und Verkehr** u. a. durch verstärkten Stromeinsatz **erreicht** werden.

Das Vergleichsszenario **KAS** sieht einen **schnellen ordnungsrechtlichen Kohleausstieg** vor. In Kombination mit den **flankierenden Maßnahmen „Zertifikatsstilllegung“** sowie **„Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien“** ergibt sich das Vergleichsszenario **KAS+**.

Das Vergleichsszenario **COP** beschreibt die **Einführung eines nationalen CO₂-Mindestpreises** innerhalb des Europäischen Emissionshandelssystems. In Verbindung mit den genannten **flankierenden Maßnahmen** liegt das Szenario **COP+** vor.

DEFINITIONSEBENEN DER SZENARIEN

Übersicht über den nationalen, europäischen und globalen Szenariorahmen für das Ausgangsszenario sowie die ENavi-Vergleichsszenarien.

Tabelle 2: Maßnahmen zur Emissionsreduktion

	Szenarien		Deutschland		Europäische Union		Welt
			Energie-wirtschaft	Restliche Sektoren	Länder der Vorreiterallianz	Restliche Länder	
Basis- / Vergleichs-szenarien	KSP90aE	Basisszenario für Vergleich	D_MMS	KSP90	COP	EU_MMS	INDC
	KAS	Hauptmaßnahme	KAS	KSP90	COP	EU_MMS	INDC
	COP	Hauptmaßnahme	COP	KSP90	COP	EU_MMS	INDC
Policy Packages	KAS+	mit flankierenden Maßnahmen (ZS+EE)	KAS + EE + ZS	KSP90	COP	EU_MMS	INDC
	COP+	mit flankierenden Maßnahmen (ZS+EE)	COP + EE + ZS	KSP90	COP	EU_MMS	INDC

Alle betrachteten Szenarien setzen sich allgemein aus einem **gemeinsamen Szenariorahmen** und einem variierten, **räumlich gegliederten** Maßnahmenbündel bzw. Policy Package zusammen. Es wird unterschieden zwischen Maßnahmen zur Emissionsreduktion auf **deutscher, europäischer** sowie auf **globaler Ebene**.

Auf **nationaler Ebene** werden innerhalb der Energiewirtschaft ausgewählte **Politikmaßnahmen und -ziele** ergänzt, die prinzipiell beschlossen werden können, um die „**Stromwende**“ und insbesondere den „**Kohleausstieg**“ in Deutschland **voranzubringen**.

Die Policy Packages sollen zusätzlich auf **europäischer Ebene** eine **Klimaschutzwirkung** entfalten.

In den restlichen **EU-Ländern** wird das **EU Reference Scenario** verfolgt unter **Beibehaltung des**

ETS. Bestehende nationale und europäische Instrumente bleiben zwar wirksam, die Anstrengungen werden jedoch nicht verstärkt (**schwacher Klimaschutz**), außer in den Ländern einer **Vorreiterallianz**, die einen **CO₂-Mindestpreis** einführen.

Auf **globaler Ebene** erfolgt der Klimaschutz gemäß den **INDCs**. Diese werden auch erfüllt ohne dass konkrete Maßnahmen definiert werden, um die entsprechenden Ziele zu erreichen.

Die Aktivitäten der einzelnen EU-Länder werden ebenso wie die globale Ebene nicht näher beleuchtet.

Das sich hieraus ergebende **Ausgangsszenario KSP90aE** stellt den **Szenariorahmen** für alle betrachteten Szenarien dar. Aus diesem Grund genügt für die Vergleichsszenarien im weiteren Verlauf eine Vorstellung der zusätzlich enthaltenen Policy Packages.

3.1 AUSGANGSSZENARIO KSP90AE

Das Ausgangsszenario KSP90aE dient als Bezugsszenario, um die Auswirkungen der ENavi-Vergleichsszenarien einordnen und bewerten zu können.

Sektor \ Jahr	2030	2050
Gebäude	-65%	-97%
Verkehr	-40%	-94%
Industrie	-49%	-83%
Landwirtschaft	-33%	-56%

Tabelle 3: Deutsche Sektorziele zur Emissionsreduktion gegenüber 1990

CO ₂ -Mindestpreis \ Jahr	2020	2030	2040	2050
[€ ₂₀₁₅ / t CO ₂ -Äq.]	30	60	90	120

Tabelle 4: Nationaler CO₂-Mindestpreis der Vorreiterallianz

DEUTSCHLAND:

Im Ausgangsszenario wird die Umsetzung **nationaler Klimaschutzziele** gemäß dem **Klimaschutzplan 2050** in Deutschland und die Implementierung der Sektorziele angenommen.

Es wird von einer **kostenoptimalen Erreichung** der im Klimaschutzplan genannten **Sektorziele für Gebäude, Verkehr, Industrie und Landwirtschaft** ausgegangen.

Für die Energiewirtschaft (öff. Strom-/Fernwärmeerzeugung, Raffinerien, sonst. Umwandlung) ist dagegen im Ausgangsszenario das **Erreichen des Sektorziels keine Vorgabe**.

Das Ausgangsszenario beschreibt eine „**passiv-abwartende**“ **Bundespolitik**, die im Bereich des Analysegegenstands „Stromsystem“ gegenüber dem **existierenden Rechtsrahmen (EU ETS)**

keine weiteren Maßnahmen für den Klimaschutz oder dessen Flankierung ergreift.

EUROPA:

Auf europäischer Ebene werden die **Emissionsreduktionsziele** innerhalb des EU-Emissionshandelssystem für die ETS Sektoren zugrunde gelegt.

Außerdem wird die Einführung **nationaler CO₂-Mindestpreise** in den Mitgliedsländern einer sogenannten **Vorreiterallianz** angenommen. Die Vorreiterallianz besteht aus den Staaten Belgien, Dänemark, Frankreich, Luxemburg, Niederlande und Schweden.

GLOBALE EBENE:

Außerhalb der EU erfolgt der Klimaschutz gemäß den **INDCs** des Übereinkommens von Paris.

3.2 VERGLEICHSSZENARIO KAS

Schnelle Variante eines Ordnungsrechtlichen Kohleausstiegs.

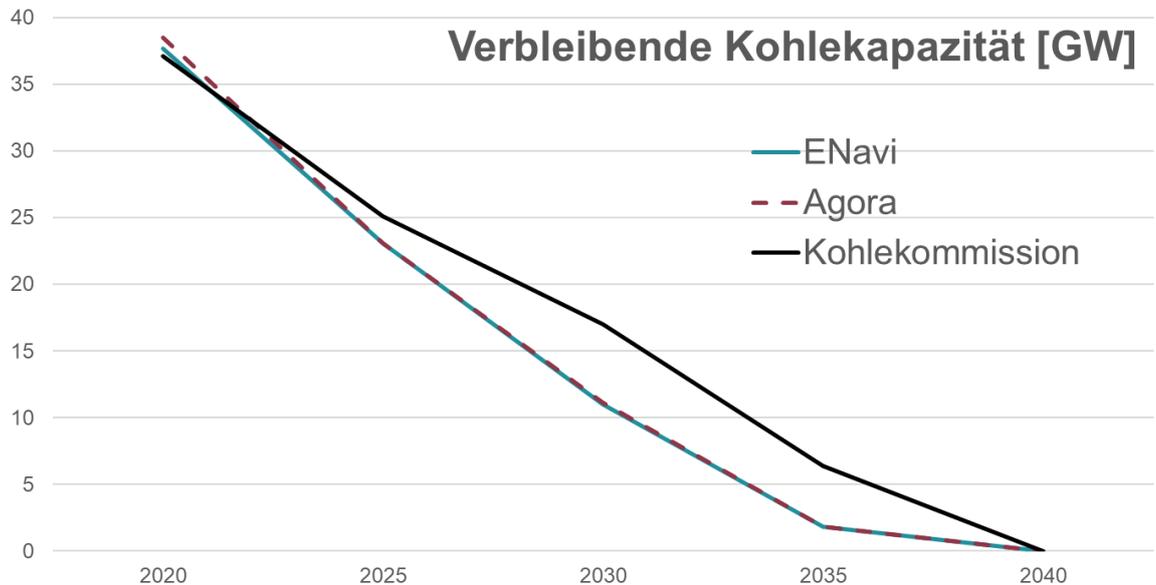


Abbildung 3: Vergleich unterschiedlicher Kohleausstiegspfade für Deutschland von 2020 bis 2040

Jahr	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Im Markt verbl. Kohlekapazität (GW)	37,7	23,1	11,0	1,8	0,0	0,0	0,0

Das Vergleichsszenario **KAS** geht von einer schnellen Variante eines **Ordnungsrechtlichen Kohleausstiegs** durch **Vorgabe eines Ausstiegsfahrplans** auf Beschluss der Deutschen Bundesregierung und des Parlaments aus.

Der Kohleausstiegspfad orientiert sich am ambitionierten **Kohleausstiegsszenario bis 2035** der Agora Energiewende.

Der Ausstiegspfad beginnt in 2020, setzt allerdings voraus, dass bereits jetzt **unterstützende Strukturwandelmaßnahmen** eingeleitet werden.

Die Kernmaßnahme des Szenarios ist die **nationale Abschaltung von Kohlekraftwerken**. Diese wird durch entsprechende gesetzliche Vorschriften

reguliert und die **Nichtbeachtung wird sanktioniert**.

Der Abschaltfahrplan wird durch die Legislative grob vordefiniert und **mit den Anlagenbetreibern ausgehandelt**.

Das Szenario sieht einen gleitenden Übergang in die **Sicherheitsbereitschaft** vor der endgültigen Stilllegung und **Beendigung der Stromerzeugung** in Kohlekraftwerken zwischen 2035 und 2040 vor.

Ausgleichszahlungen an Anlagenbetreiber, Arbeitnehmer*innen und betroffene Regionen nach Gerechtigkeitsprinzipien werden lediglich kursorisch mitdiskutiert.

3.3 VERGLEICHSSZENARIO COP

Einführung eines nationalen CO₂-Mindestpreises für alle Anlagen in der deutschen Energiewirtschaft.

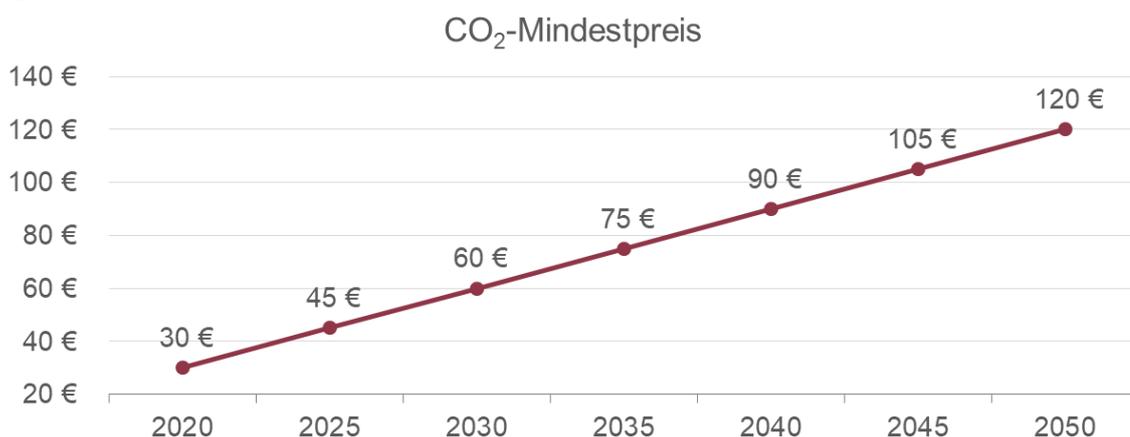


Abbildung 4: CO₂-Mindestpreis zwischen 2020 und 2050

Jahr	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CO ₂ -Mindestpreis [€ ₂₀₁₅ / t CO ₂ -Äquiv.]	30	45	60	75	90	105	120

Das Vergleichsszenario **COP** setzt auf eine **marktlich orientierte Maßnahme**. Statt der ordnungsrechtlichen Vorgabe eines Kohleausstiegs wird die Dekarbonisierung des Stromsystems durch einen **CO₂-Mindestpreis** angereizt.

Dieser wird in Deutschland als **nationaler CO₂-Mindestpreis** für alle Anlagen in der **Energiewirtschaft** eingeführt. Der Mindestpreis reguliert den Markt ab 2020 und entspricht dem CO₂-Mindestpreis der europäischen Vorreiterallianz.

Der Mindestpreis greift immer dann, wenn der ETS Preis niedriger als der Mindestpreis ist. Dieser Mechanismus wird durch die deutsche Bundesregierung und das Parlament rechtlich verankert und **durch die Emissionshandelsstelle des UBA kontrolliert**.

Die Vorgabe eines CO₂-Mindestpreises **verändert** die **relativen Preise** zugunsten CO₂-emissionsarmer Technologien und damit zulasten der Kohle und führt so zu **höheren Betriebskosten** für CO₂-intensive **(Kohle-)Kraftwerke**. Entsprechend erhöht sich der **Anreiz**, Stromerzeugung von Kohle (und anderen fossilen Energieträgern, wie etwa Gas) zu Erneuerbaren Energien zu verlagern. Das Szenario erreicht damit de facto ebenfalls einen Ausstieg aus der deutschen Kohleerzeugung.

3.4 ZERTIFIKATSSTILLEGUNG

Stilllegung von Zertifikaten (ZS) im Europäischen Emissionshandelssystem als flankierende Maßnahme.

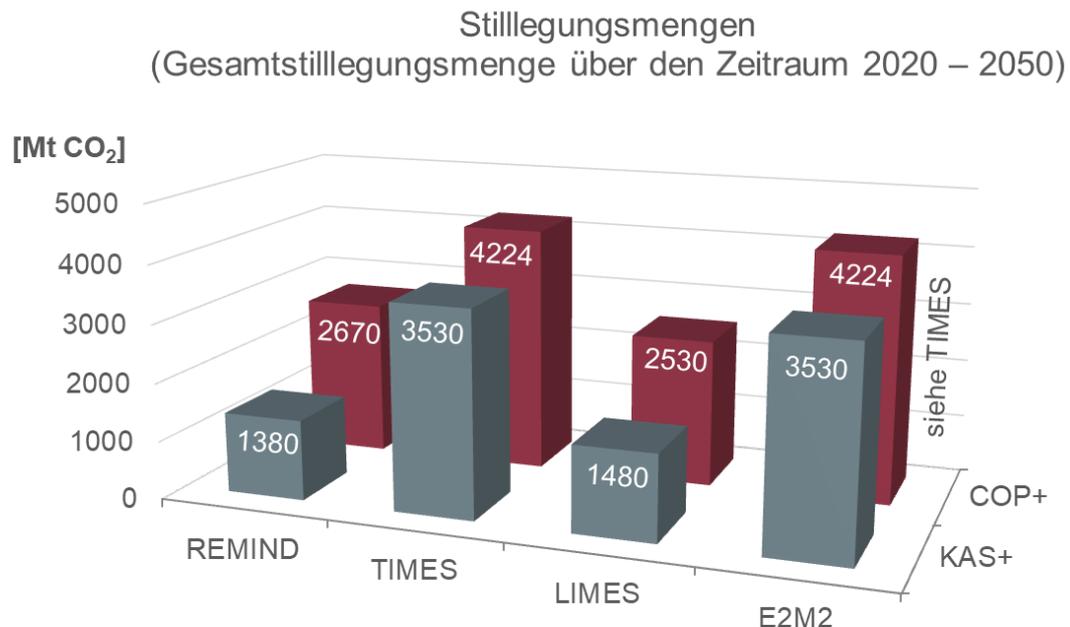


Abbildung 5: Gesamtstilllegungsmengen über den Zeitraum 2020 bis 2050

Da die Vergleichsszenarien KAS und COP zu **un-gewünschten Nebeneffekten** führen, werden zwei **flankierende Maßnahmen** untersucht.

Die erste flankierende Maßnahme setzt die freiwillige und vollständige **Löschung von in Deutschland nicht verwendeten Emissionszertifikaten** des EU-ETS durch die deutsche Emissionshandelsstelle voraus. Die Löschung erfolgt sowohl bei der vorläufigen oder endgültigen **Stilllegung von Kohlekraftwerken (KAS+)**, als auch bei in Kraft treten des **Mindestpreises (COP+)**.

Ohne die Stilllegung von CO₂-Zertifikaten führen nationale Emissionsreduktionen, etwa durch einen nationalen Kohleausstieg, nur zu einer **Verlagerung der Emissionen** in Europa bzw. zur Industrie („Wasserbett-Effekt“). Die Stilllegung von CO₂-Zertifikaten im EU-Emissionshandelssystem führt zu einer europaweiten **Verknappung** der Zertifikate in Folge nationaler Maßnahmen. Damit ergeben sich

höhere Zertifikatspreise und folglich steigt der **Anreiz**, CO₂-intensive Energieträger wie Kohle weniger einzusetzen und auf längere Sicht die entsprechenden Erzeugungskapazitäten ganz vom Markt zu nehmen.

Die Zertifikatsstilllegung (ZS) ist im **Rechtsrahmen des europäischen Emissionshandels bereits verankert** und wird in den erweiterten Vergleichsszenarien (KAS+/COP+) ab 2020 angewendet. Möglicherweise übertreffen die stillzulegenden Mengen jedoch den existierenden Rechtsrahmen, so dass weitere Anpassungen notwendig wären.

Die konkrete Umsetzung in den Modellen erfolgt in einem **zweistufigen Verfahren**. Zuerst wird die zusätzliche Emissionsreduktion der deutschen Energiewirtschaft in KAS/COP ggü. KSP90aE ermittelt. Anschließend wird die Zertifikatmenge im Szenario KAS+/COP+ um die ermittelten Emissionen reduziert.

3.5 STEIGERUNG DER EE-AUSBAURATEN

Steigerung der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien (+EE) als flankierende Maßnahme.

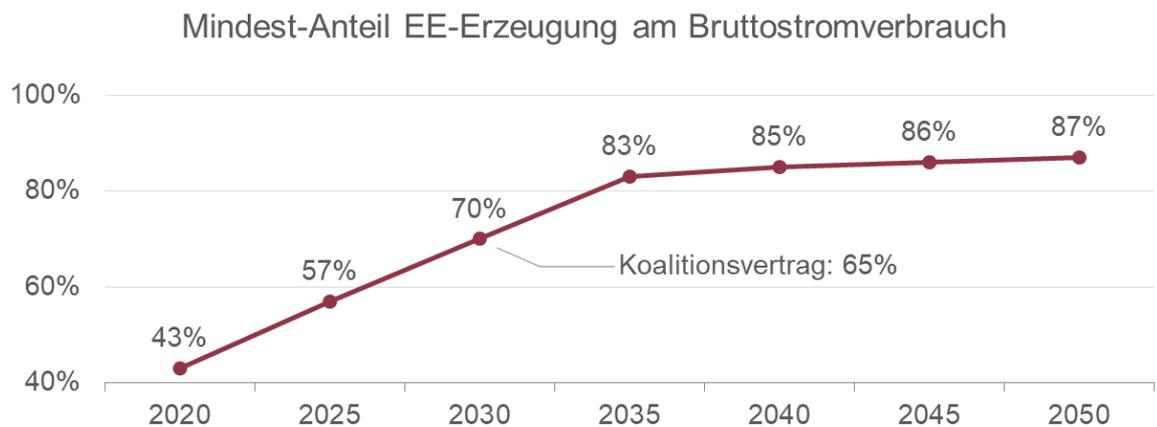


Abbildung 6: Mindest-Anteil EE-Erzeugung am Bruttostromverbrauch

Jahr	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mindest-Anteil EE-Erzeugung am Bruttostromverbrauch [%]	43	57	70	83	85	86	87

→ Koalitionsvertrag: 65 %

Die zweite flankierende Maßnahme beinhaltet die Anpassung der Förderung der **Stromerzeugung** aus **Erneuerbaren Energien** ab 2020.

Dies erfordert die **Reform** der vorgegebenen Ausbaupfade für die Stromerzeugung aus **heimischen Erneuerbaren Energien**. Es werden jedoch keine weiteren rechtlichen Anpassungen (z. B. an den Abstandsregelungen o. ä.) angenommen.

Durch die Steigerung der EE-Ausbauraten soll der **verstärkte Stromimport**, welcher in den Vergleichsszenarien KAS/COP beobachtet werden kann, abgeschwächt werden. Dies stärkt die lokale Erzeugungsstruktur und vermindert die Abhängigkeit von den Importländern.

Der Ausbaupfad für Erneuerbare Energien orientiert sich dabei am Ziel für den Anteil der Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch unter Verwendung der optimierten Installationsmengen aus den verwendeten Modellen.

3.6 VERGLEICHSSZENARIOEN COP+ UND KAS+

Kombination der ENavi-Vergleichsszenarien COP und KAS mit den flankierenden Maßnahmen Zertifikatsstilllegung (ZS) sowie Steigerung der EE-Ausbauraten (+EE).

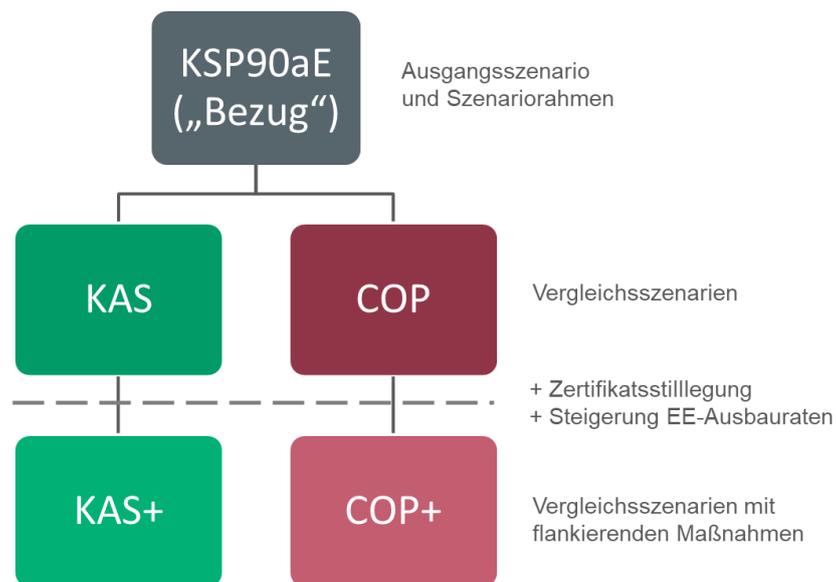


Abbildung 7: Schematische Übersicht über den Aufbau der Szenarien

Durch die **Kombination** der Hauptmaßnahmen ordnungsrechtlicher Kohleausstieg (KAS) bzw. CO₂-Mindestpreis (COP) mit den flankierenden Maßnahmen ergeben sich letzten Endes zwei weitere Vergleichsszenarien.

Das Vergleichsszenario **KAS+** baut auf dem ordnungsrechtlich orientierten Kohleausstiegsszenario

KAS auf, ergänzt um die unterstützenden Strukturwandelmaßnahmen **ZS** und **+EE**.

Das Vergleichsszenario **COP+** baut hingegen auf dem marktlich orientierten CO₂-Mindestpreisszenario **COP** auf, ebenfalls ergänzt um die flankierenden Maßnahmen **ZS** und **+EE**.

4 MODELLERGEBNISSE

Die Modellergebnisse werden anhand der Systemebenen gegliedert.

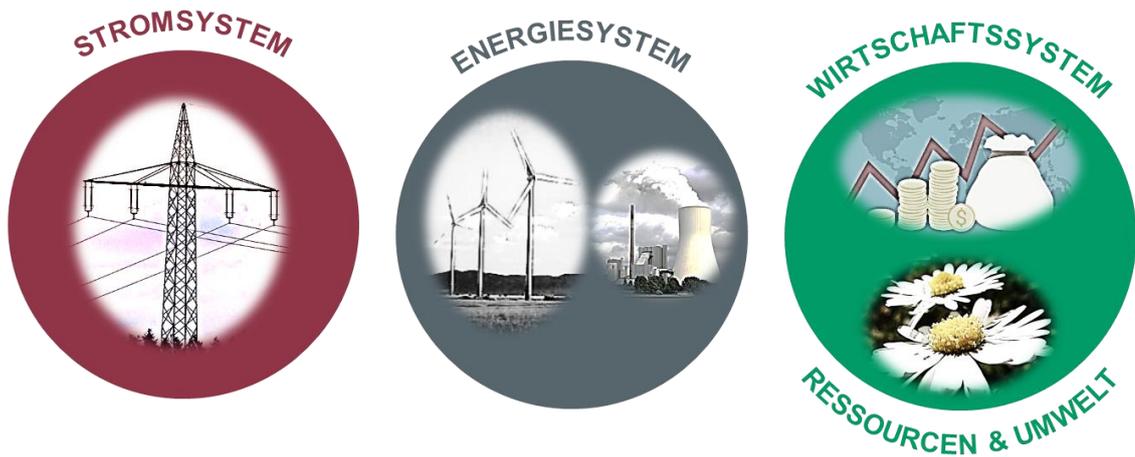


Abbildung 8: Gliederung der Modellergebnisse entlang der Systemebene

Die Modellergebnisse werden entlang der Systemebene strukturiert. Im Fokus stehen dabei zunächst die **Effekte im Stromsystem**, da dies die Systemebene ist, in der die Transformationsmaßnahmen Wirkung erzielen sollen.

Durch die Transformation des Stromsystems ergeben sich allerdings auch **Auswirkungen auf das Energiesystem**, da beispielsweise die Strom- und Wärmebereitstellung durch Technologien wie die Kraft-Wärme-Kopplung eng miteinander verzahnt sind oder die Dekarbonisierung der anderen Sektoren einen verstärkten Stromeinsatz erfordern und deshalb nicht isoliert betrachtet werden können.

Anschließend werden außerdem die **gesamtwirtschaftlichen sowie die ökologischen Effekte** der einzelnen Szenarien untersucht. Hier müssen **Rückkopplungseffekte**, etwa über Preisentwicklungen oder Konsumverschiebungen, berücksichtigt werden.

Nur durch diese **systemische Sichtweise** ist es möglich, die Auswirkungen der Policy Packages ganzheitlich und umfassend zu analysieren und zu bewerten.

Die Analyse umfasst damit unterschiedlichste Bereiche und Aspekte. Es können sowohl Schlussfolgerungen zur Erreichung der **energiepolitischen Ziele** gezogen, als auch Erkenntnisse zu den **Auswirkungen auf andere Sektoren** und der Erreichung **gesellschaftlicher Zielvorstellungen** getroffen werden.

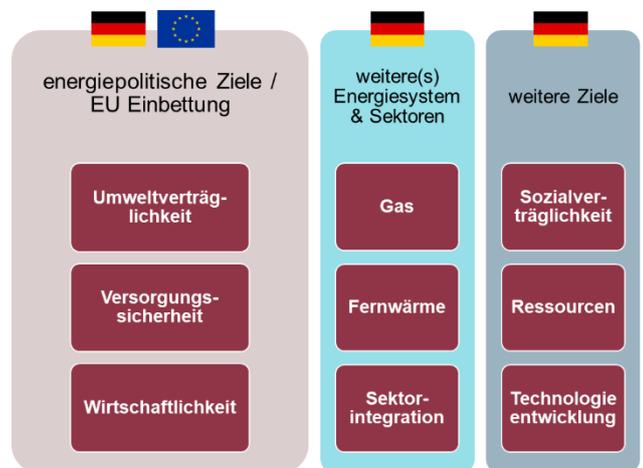


Abbildung 9: Drei Themenbereiche zur Strukturierung der Folgenabschätzung

4.1 RÜCKBLICK: EFFIZIENZ VON SEKTORZIELEN

Optimale Verteilung der Treibhausgasemissionsminderung zwischen den Sektoren in Deutschland.

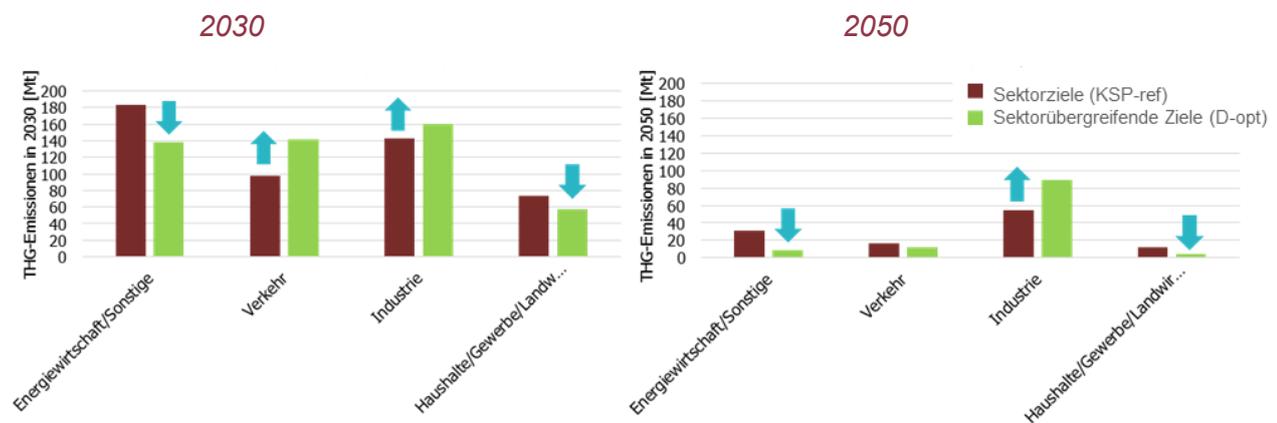


Abbildung 10: Treibhausgas-Emissionen in 2030 und 2050 nach Sektoren in Abhängigkeit von Sektorzielen und sektorübergreifenden Zielen

Vorarbeiten haben ergeben, dass **sektorübergreifende Ziele** (D-opt) ein **größeres Optimierungspotenzial** bei gleichen Gesamtemissionszielen bergen als sektorspezifische Klimaschutzziele (KSP-Ref), wie sie im Klimaschutzplan (KSP) definiert sind. Grund hierfür sind die unterschiedlich hohen spezifischen Emissionsminderungskosten der Sektoren.



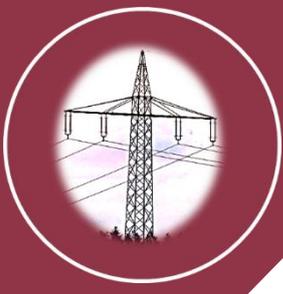
Abbildung 11: Kohleverstromung in Deutschland in 2030 und 2050 zweier Szenarien

Bei der **kosteneffizienten Verteilung** der Minderungsziele auf die Sektoren in Deutschland erfolgen **stärkere Emissionsminderungen** in der **Energiewirtschaft**, und somit eine Reduktion der Kohleverstromung.

Während die Energiewirtschaft also von sektorübergreifenden Zielen stärker belastet wird (leichte Erhöhung der CO₂-Preise) kann die Industrie von **erheblichen Entlastungen** profitieren.

Gesamtwirtschaftlich ist ein sektorübergreifendes Reduktionsziel **effizienter** und damit **kostengünstiger** zu bewerten.

Demgegenüber stehen jedoch auch einige Nachteile. So führt die stärkere Belastung der Energiewirtschaft zunächst zur **Erhöhung der Stromimporte** und auch der **Wasserbett-Effekt** fällt höher aus. Diese Nachteile können jedoch durch die beschriebenen **flankierenden Maßnahmen** abgemildert werden.



4.2 STROMSYSTEM

STROMBEREITSTELLUNG NACH ENERGIETRÄGERN

Die Zusammensetzung der zur Stromerzeugung eingesetzten Energieträger variiert zwischen den Szenarien deutlich. Ohne einen CO₂-Mindestpreis erhöht der Kohleausstieg die Erdgasnutzung.

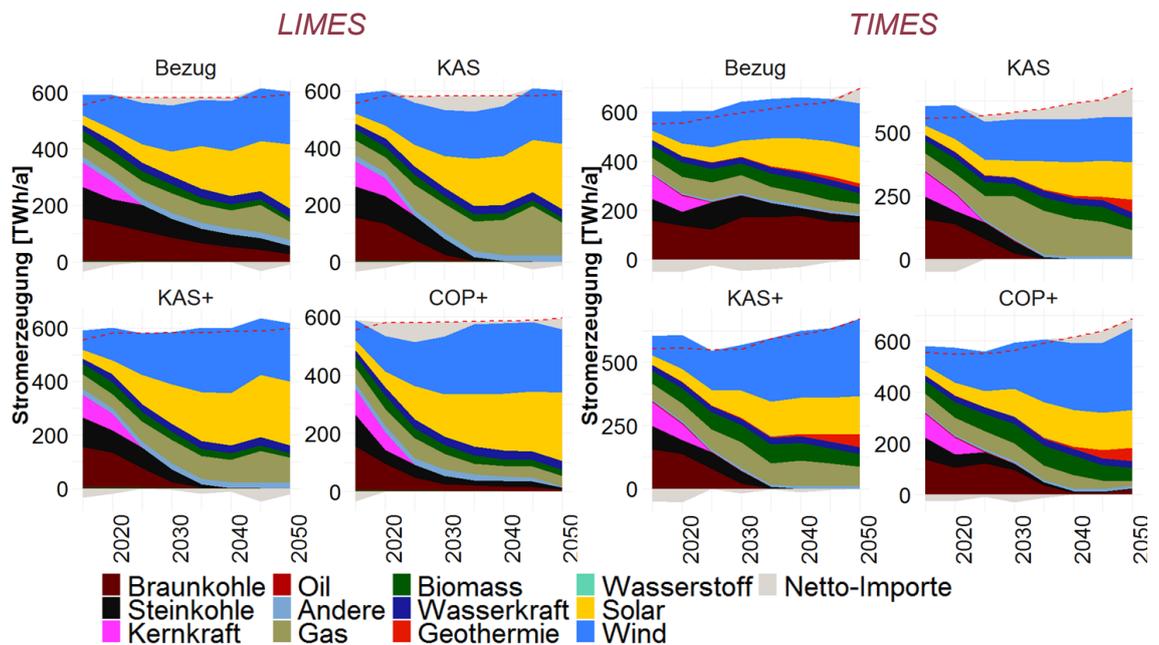


Abbildung 12: Vergleich der Stromerzeugung nach Energieträgern der Modelle LIMES und TIMES je Szenario

Die Stromerzeugung bleibt flach oder steigt leicht auf ca. 700 TWh/Jahr an.

In allen Szenarien **steigt die Nutzung erneuerbarer Energien stark an**: In LIMES wird dabei hauptsächlich Solar und Onshore-Wind ausgebaut, in TIMES mehr Offshore-Wind und Geothermie.

Der **Kohleausstieg** erhöht die **Erdgasnutzung**. Dieser Effekt kann durch einen **CO₂-Preis kompensiert** werden, da dieser die Gasnutzung verteuert (wie in COP/COP+).

Der **höhere EE-Zubau** in den Szenarien KAS+ und COP+ **verringert die Importe**.

In TIMES wird im Bezugsszenario („KSP90aE“) ohne weitere Klimaschutzpolitiken die Kohlenutzung in Folge des Kernenergieausstiegs zunächst erhöht und dann auf hohem Niveau fortgesetzt, während sie in LIMES aufgrund der günstiger angenommenen Alternativen und höherer CO₂-Preise im EU-ETS kontinuierlich reduziert wird.



INSTALLIERTE LEISTUNG IM SZENARIOVERGLEICH

Deutlicher Zubau von PV-Anlagen, Windkonvertern und Gasturbinen.

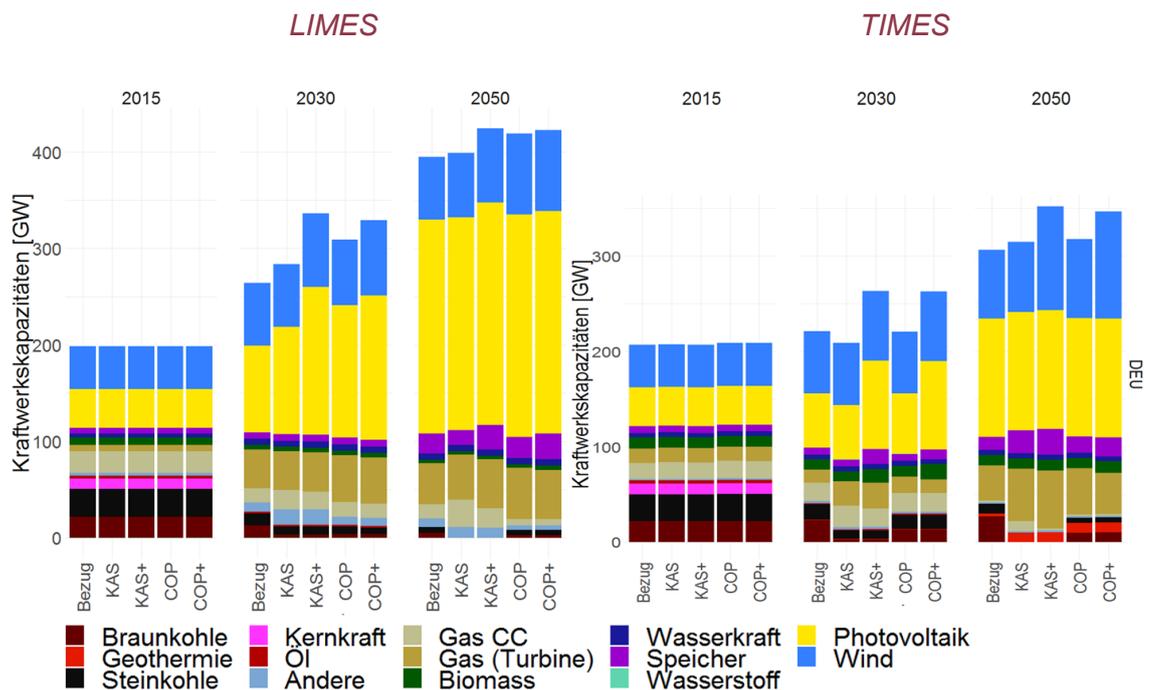


Abbildung 13: Kraftwerkskapazitäten nach Energieträgern in 2015, 2030 und 2050 basierend auf unterschiedlichen Szenarien (links: LIMES, rechts: TIMES)

In allen Szenarien findet sich langfristig ein massiver Ausbau von **Windkonvertern (on- und offshore) und PV-Anlagen**, der in den **Klimaschutzszenarien beschleunigt** wird.

Erdgas bzw. **Mineralölprodukte** stellen langfristig einen relevanten Anteil der **gesicherten Leistung**. Aufgrund der geringen Auslastung werden dafür hauptsächlich gas- bzw. ölbefeuerte **Gasturbinen** zugebaut, da sie weniger kapitalintensiv sind als effizientere Gas- und Dampfturbinenkraftwerke.

Langfristig lässt sich auch ein **Speicherzuba** auf **20-30 GW** beobachten, um einen Teil der Variabilität der EE-Einspeisung abzufedern.



RAHMEN: EUROPÄISCHES EMISSIONSHANDELSSYSTEM (ETS)

CO₂-Preise im EU-ETS sind Modellergebnis und ergeben sich aus der Menge an erlaubten Emissionen und den Kosten für Emissionsreduktionen

LIMES

TIMES

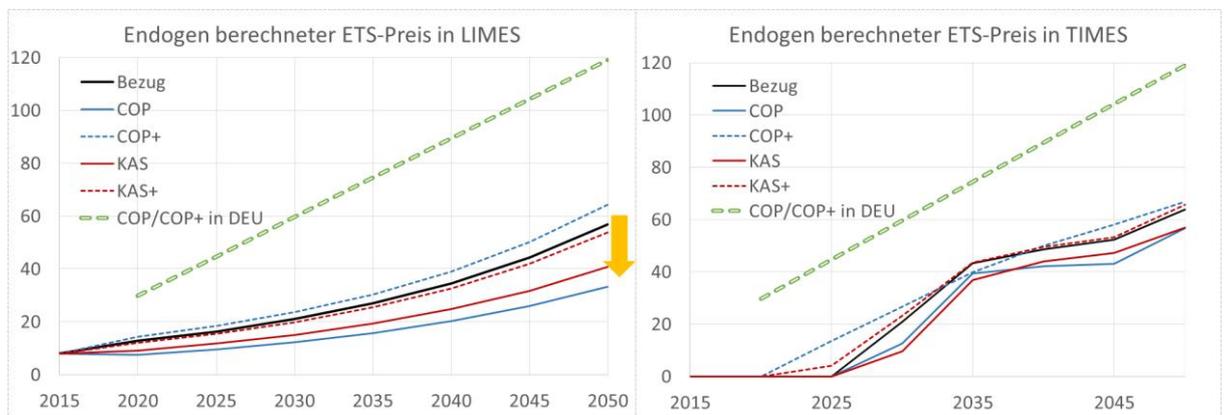


Abbildung 14: Endogen berechneter ETS-Preis von 2015 bis 2050 in LIMES und TIMES

Das europäische Emissionshandelsystem (EU-ETS) limitiert die Treibhausgas-Emissionen aus dem Stromsektor und der energieintensiven Industrie, und gibt ihnen dadurch einen **Preis**.

Unter den Standardannahmen ergibt sich aus den Zertifikatmengen in LIMES ein CO₂-Preis, der von etwa 15 €/tCO₂ in 2020 auf knapp 60 €/t CO₂ in 2050 steigt.

Durch die zusätzlichen Klimaschutzmaßnahmen im deutschen Stromsektor in KAS/COP **sinkt die Nachfrage** nach Zertifikaten, wodurch auch der **ETS-Preis sinkt**. (Vergleich: Bezug zu KAS/COP)

Dieser Effekt kann durch die **Reduktion der Zertifikatmenge** verhindert werden. Durch die **Zertifikatsstilllegung** in den Szenarien KAS+/COP+ erhöht sich der CO₂-Preis wieder in etwa auf den Wert des Bezugsszenarios KSP90aE.

In der TIMES-Modellierung ist im ETS kein **banking** der Zertifikate implementiert, deshalb ergibt sich erst nach 2025 ein positiver CO₂-Preis. Dies führt entsprechend im Bezugsszenario KSP90aE zu deutlich höherer Kohleverstromung bis 2030 als in LIMES. Ansonsten sind weitgehend die analogen Effekte wie in LIMES zu beobachten.



REBOUND-EFFEKT IN DER STEINKOHLERZEUGUNG

Zertifikatstilllegungen und verstärkter EE-Zubau reduzieren den Rebound-Effekt bei Steinkohle

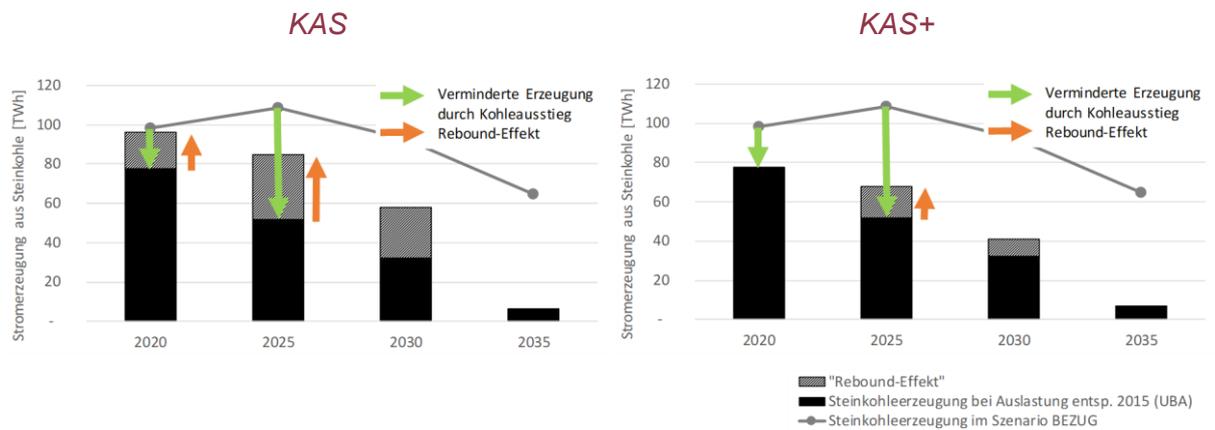


Abbildung 15: Stromerzeugung aus Steinkohle zwischen 2020 und 2035 gemäß der Szenarien KAS (links) und KAS+ (rechts)

Der ordnungsrechtliche Kohleausstieg (KAS) vermindert, verglichen mit dem Bezugsszenario KSP90aE, die Verbrennung von Kohle. Diesem Effekt steht jedoch der sogenannte **Rebound-Effekt** gegenüber:

Der Mehrbedarf in der Stromproduktion durch die ordnungsrechtliche Abschaltung von Kohlekraftwerken wird nur zu einem Teil durch andere Energieträger ersetzt. Ein beachtlicher Teil wird durch eine **erhöhte Auslastung weiter in Betrieb befindlicher moderner Steinkohlekraftwerke** substituiert.

Dieser Zusammenhang führt dazu, dass die tatsächliche Erzeugung durch Kohle deutlich weniger stark reduziert wird, als es die Politikmaßnahme vermuten ließe.

Durch entsprechende **flankierende Maßnahmen** (ZS und +EE) kann dieser **Rebound-Effekt reduziert** werden.

Eine Möglichkeit, den Rebound-Effekt zu verhindern, ist die **Implementierung eines CO₂-Preises** (Szenarien COP/COP+). Durch die Bepreisung wird auch für moderne Kohlekraftwerke der Betrieb teurer und die erneuerbaren Alternativen können somit Kostenvorteile realisieren.

Der Rebound-Effekt tritt jedoch nicht nur bei der Steinkohle auf („**Kohle-Rebound**“), sondern ist auch bei der Verfeuerung von Gas („**Gas-Rebound**“) zu beobachten. Auch hier kann der Rebound-Effekt durch die Bepreisung von CO₂ (Szenarien COP und COP+) abgemildert werden.



IMPORT- UND EXPORTSALDO

Während der Kohleausstieg und die CO₂-Bepreisung zu hohen Stromimporten führen, verschiebt ein stärkerer Ausbau erneuerbarer Energien den Saldo hin zu Stromexporten.

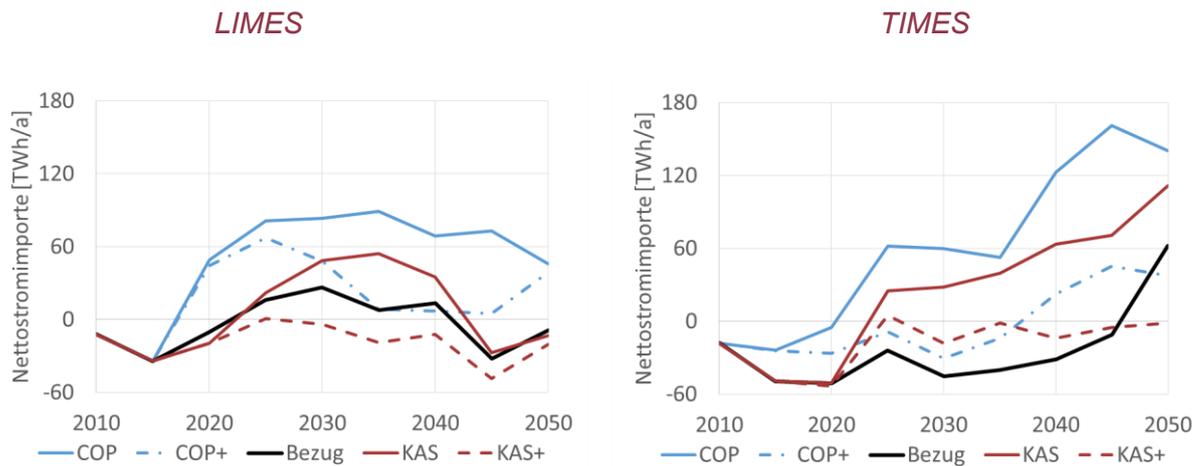


Abbildung 16: Nettostromexporte von 2010 bis 2050 je Szenario in LIMES und TIMES

Das **europäische Stromnetz** ist seit Jahrzehnten **stark vernetzt**, mit kontinuierlichen Stromex- und -importen zwischen den Ländern. Ein Grundsatz des **EU-Binnenmarkts** ist die weitere Integration **der europäischen Strommärkte**, sowohl institutionell als auch durch den Ausbau von Kuppelstellen.

Aufgrund der **niedrigen variablen Kosten** von Kohlekraftwerken und dem deutlichen Zubau von Erneuerbaren Energien war Deutschland in der **vergangenen Dekade Netto-Stromexporteur**. Auch wenn es viele Stunden mit Stromimporten gab, wurde über das gesamte Jahr gesehen bilanziell mehr Strom exportiert als importiert.

Die Modellergebnisse zeigen für die Zukunft einen **breiten Ergebnisraum** für den Stromaustausch mit den europäischen Nachbarländern.

Der **Kohleausstieg** und die **CO₂-Bepreisung** führen zu einem Anstieg der **Importe** im Vergleich zur aktuellen Situation, so dass Deutschland **Netto-Importeur** werden würde.

Der **stärkere Ausbau von Erneuerbaren Energien in Deutschland** in den „Plus“-Szenarien (KAS+/COP+) könnte den Saldo hin zu **Exporten** verschieben, da **Erneuerbare Energien** sehr **geringe variable Kosten** haben und deshalb die Produktion von Kraftwerken mit höheren variablen Kosten in anderen Ländern verdrängt wird.



EMISSIONEN IM STROMSEKTOR IN DEUTSCHLAND

Bei ordnungsrechtlichem Kohleausstieg (KAS) liegen aufgrund der verstärkten Gasnutzung nach 2040 höhere CO₂-Emissionen als beim CO₂-Mindestpreis (COP) vor.

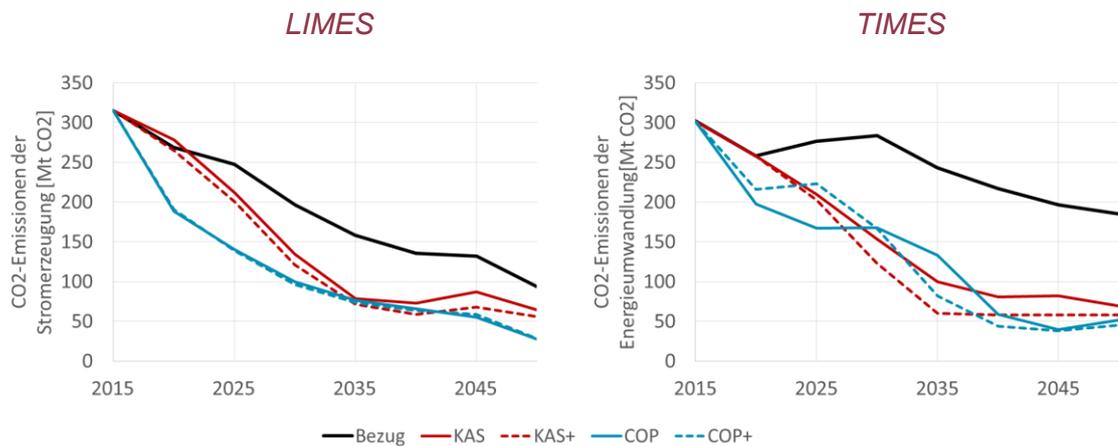


Abbildung 17: CO₂-Emissionen der Energieumwandlung zwischen 2015 und 2045 je Szenario in LIMES und TIMES

Der **höhere CO₂-Preis** in COP bewirkt **starke Emissionsreduktionen in den nächsten zehn Jahren**, weil aktuell viele **nicht ausgelastete Gaskraftwerke** vorhanden sind. Wird Kohlestrom durch einen CO₂-Preis teurer, wird er durch emissionsärmeren Gasstrom ersetzt.

Bei einem **ordnungsrechtlichen Kohleausstieg (KAS)** verbleiben nach 2040 **höhere Emissionen** als beim CO₂-Mindestpreis (COP), da langfristig ohne hohen CO₂-Preis noch mehr **Gas verstromt** wird. Dieser **Gassockel** muss vermieden werden, um die **langfristigen Reduktionsziele zu erreichen**.



EUROPÄISCHE EMISSIONSMINDERUNGEN – DER WASSERBETT-EFFEKT

Für die Auswirkungen auf die europäischen Emissionen ist die Zertifikatsstilllegung zentral – ansonsten verpufft der Großteil der deutschen Emissionsreduktionen (Wasserbett-Effekt).

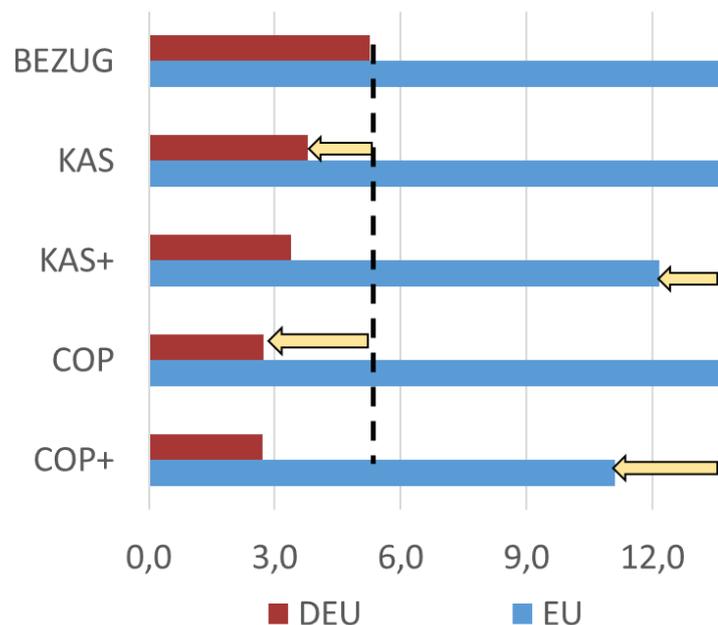


Abbildung 18: Kumulierte Stromemissionen zwischen 2020 und 2050 [Gt CO₂]

In Deutschland bewirken die zusätzlichen Klimaschutzmaßnahmen eine deutliche Reduktion der Emissionen: KAS reduziert die **kumulierten deutschen Stromsektoremissionen** um ein **Drittel**, COP sogar um die **Hälfte**.

Europäisch ist die Auswirkung der deutschen Klimaschutzmaßnahmen aber anders. Unter dem Begriff „Wasserbett-Effekt“ beschreibt man **Verlagerungseffekte** im ETS. Ein nationaler Kohleausstieg (KAS) oder nationaler Mindestpreis für CO₂ (COP) würde im ETS „verpuffen“, wenn die **Emissionsrechte andernorts eingesetzt** würden. Dies kann durch eine **Stilllegung von CO₂-Zertifikaten verhindert** (KAS+/COP+) werden.

Unter der Annahme, dass die ETS-Ziele für 2040 und 2050 nicht entsprechend verschärft werden, zeigt die Modellierung, dass die deutschen Emissionsminderungen ohne flankierende Maßnahmen fast vollständig auf der EU-Ebene verpuffen würden.

Auch die **Marktstabilitätsreserve (MSR)**, ex-post ausgerechnet, hilft nur begrenzt: Sie würde den Wasserbett-Effekt nur um etwa **9%** reduzieren.



STROMPREISENTWICKLUNG

Börsenstrompreise steigen langfristig in allen Szenarien und erhöhen sich in den ENavi-Vergleichsszenarien in Relation zum Ausgangsszenario.

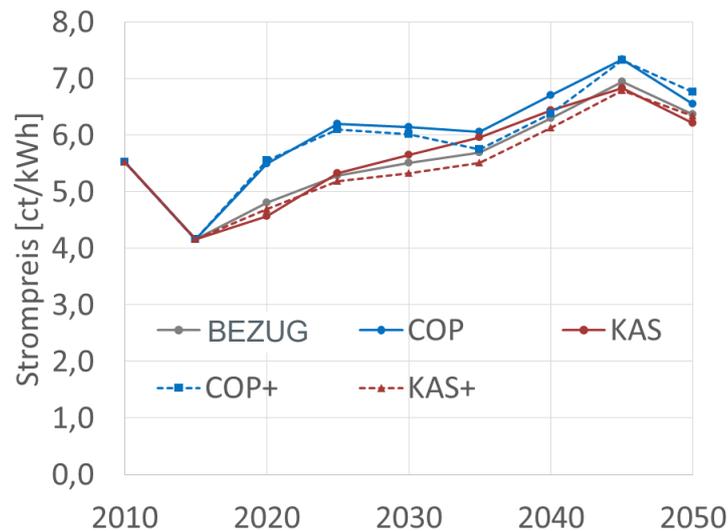


Abbildung 19: Strompreisentwicklung von 2010 bis 2050 je Szenario (LIMES)

Langfristig zeigen alle betrachteten Szenarien eine Erhöhung des **Börsenstrompreises** um 2 bis 3 ct/kWh gegenüber dem heutigen Durchschnittsniveau, womit er knapp den bisher höchsten Jahresdurchschnitt im Jahr 2008 übertreffen würde.

Relevante Faktoren für den Anstieg sind zum einen die notwendigen **Investitionen** in neue Kraftwerke sowie die **steigenden variablen Kosten** von fossilen Kraftwerken aufgrund von steigenden **Zertifikatspreisen** im EU-ETS.

Dieser Effekt führt auch zu einem **frühen Preisanstieg** in den CO₂-Mindestpreis-Szenarien COP/COP+. Der deutlich höhere CO₂-Preis zusammen mit einem zunächst hohen Anteil an fossiler Stromerzeugung führt in diesen Szenarien zu einem **frühzeitigen Preisanstieg um etwa 1 ct/kWh**.

Nach 2030 beträgt der Unterschied zwischen den Szenarien **weniger als 1 ct/kWh**, wobei sich im auf den Strommarkt spezialisierten Modell E2M2 eine **stärkere Spreizung der Strompreise** zeigt.

Grundsätzlich enthalten die hier betrachteten Börsenstrompreise allerdings keine **zusätzlichen Kostenbestandteile**, wie sie aktuell in EEG-Umlage, KWK-Umlage und Netzentgelten enthalten sind, also beispielsweise die Kosten für Sicherheitsreserve, Redispatch, marktfernen EE-Zubau oder Übertragungs- und Verteilnetzausbau.



4.3 ENERGIESYSTEM

FERNWÄRMEERZEUGUNG

Durch den Kohleausstieg und die Dekarbonisierung im Wärmesektor steigt der Einsatz von Fernwärme und KWK-Anlagen. Die flankierenden Maßnahmen und der CO₂-Mindestpreis wirken dagegen dämpfend auf den Einsatz von Fernwärme- und KWK-Technologien.

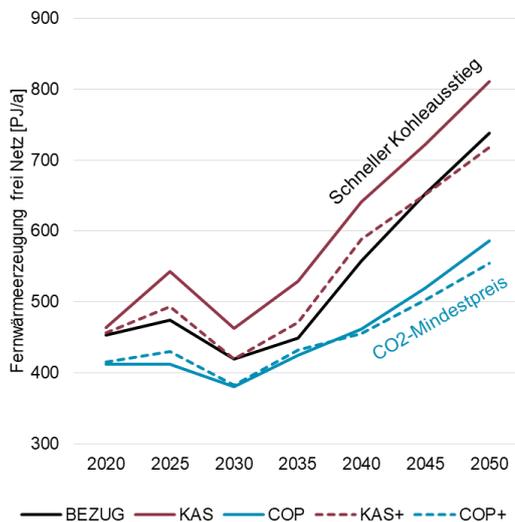


Abbildung 210: Fernwärmeerzeugung frei Netz von 2020 bis 2050 je Szenario

In allen betrachteten Szenarien besteht die **Tendenz zu einer verstärkten Nutzung der Fernwärme**, da diese eine günstige Möglichkeit zur Dekarbonisierung im Wärmesektor bietet.

Besonders deutlich ist diese Entwicklung in den Szenarien mit **ordnungsrechtlichem Kohleausstieg**, da der **CO₂-Preis im EU-ETS** hier tendenziell **niedriger als die sektorspezifischen Minderungskosten** ist. Hierdurch können Emissionen im Wärmesektor durch den Bezug von lokal emissionsfreier Fernwärme besonders kostengünstig gemindert werden. Die Emissionen der Wärmebereitstellungen fallen dann im Umwandlungssektor bei spezifisch geringeren Zertifikatekosten an.

Der **Kohleausstieg** führt dabei zu einem ausgeprägten **KWK-Einsatz**, da vormals durch Kohlekraftwerke genutzte **Zertifikatemengen** jetzt für

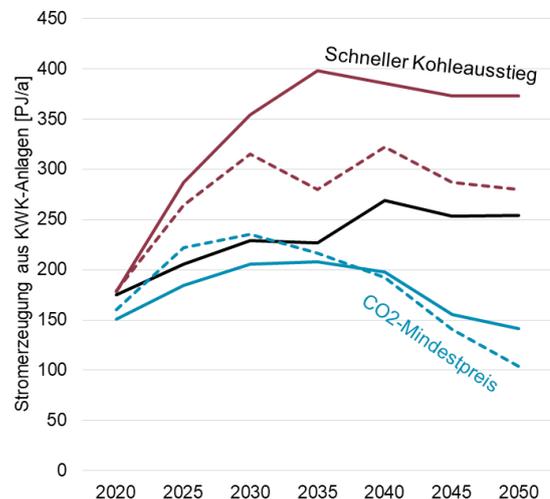


Abbildung 201: Stromerzeugung aus KWK-Anlagen von 2020 bis 2050 je Szenario

Erdgas-KWK-Anlagen mit höherer Stromkennzahl zur Verfügung stehen. Dies wirkt aber **nach 2040**, wenn die Emissionen weiter abzusinken sind, **kontraproduktiv**.

Begrenzt wird die Fernwärmenutzung aus KWK-Anlagen durch die rückläufige Rentabilität bei langfristig steigenden Preisen im EU-ETS. **Weitere Zuwächse** der Fernwärmenutzung werden anschließend durch **Power-to-Heat-Anwendungen** getragen.

Bei **KAS+** führen **flankierende Maßnahmen** (EE+ und ZS) zur **Minderung des KWK-Einsatzes**. Bei Einführung eines **CO₂-Mindestpreises** wird der **Pfad einer emissionsarmen Wärmeversorgung** aufgrund geringerer Wirtschaftlichkeit der Erdgas-KWK jedoch **deutlich früher** eingeschlagen.



RÜCKWIRKUNGEN AUF DIE ERDGASNACHFRAGE

Ein CO₂-Mindestpreis wirkt sich signifikant auf die Erdgasnachfrage aus.

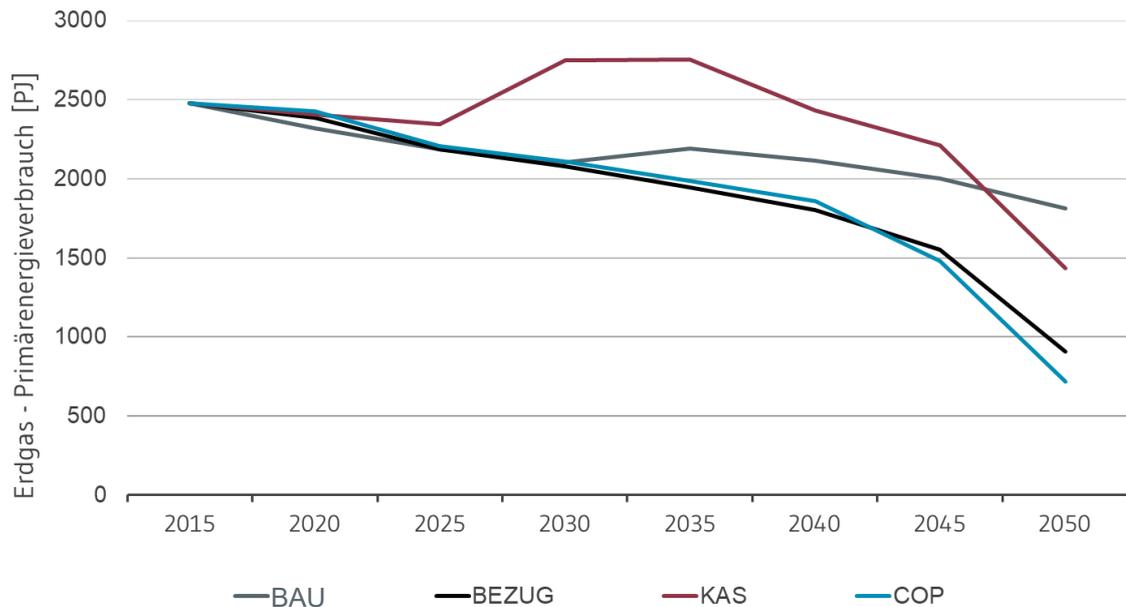


Abbildung 22: Primärenergieverbrauch Erdgas von 2010 bis 2050

Die Erdgasnachfrage verläuft in allen Szenarien vor allem durch Emissionsminderungen im Wärmesektor anfangs rückläufig und erreicht anschließend ein **Plateau bis 2025**.

Bei Umsetzung des Kohleausstiegs ergibt sich zwischen 2020 und 2040 eine **verstärkte Nutzung von Erdgas in der KWK-Fernwärmeerzeugung**, da durch den Kohleausstieg signifikante Zertifikatmengen zur Verfügung stehen und die Kosten der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen damit unter denen der verbrauchernahen Erzeugung liegen. **Nach 2040** entwickelt sich die Nachfrage jedoch **stark rückläufig**, da durch die langfristig steigenden Zertifikatskosten die Nutzung der Erdgas-KWK-Anlagen unwirtschaftlich wird.

Im Kontrast hierzu stehen die Szenarien mit **CO₂-Mindestpreis**. Hier erweist sich die Nutzung von Erdgas-KWK-Anlagen bereits frühzeitig als unwirtschaftlicher. Die Entwicklung ist in diesen Szenarien daher durch die **langfristig rückläufige Endverbrauchernachfrage nach Erdgas** im Wärmesektor dominiert.

In diesen Szenarien ist die Frage zu stellen, **inwiefern** die Möglichkeit des **kostendeckenden Betriebs von Erdgasnetzen** bei deutlich sinkenden Transportmengen besteht oder ob sich Synergien durch einen Ausbau der Wasserstoffnutzung bzw. synthetisches Gas aus regenerativen Quellen heben lassen.



4.4 WIRTSCHAFTSSYSTEM, RESSOURCEN UND UMWELT

VOLKSWIRTSCHAFTLICHE EFFEKTE

Trotz der Eingriffe zur Emissionsreduktion wächst die deutsche Wirtschaft. Die politische Ausgestaltung beeinflusst stark die Kosteneffizienz.

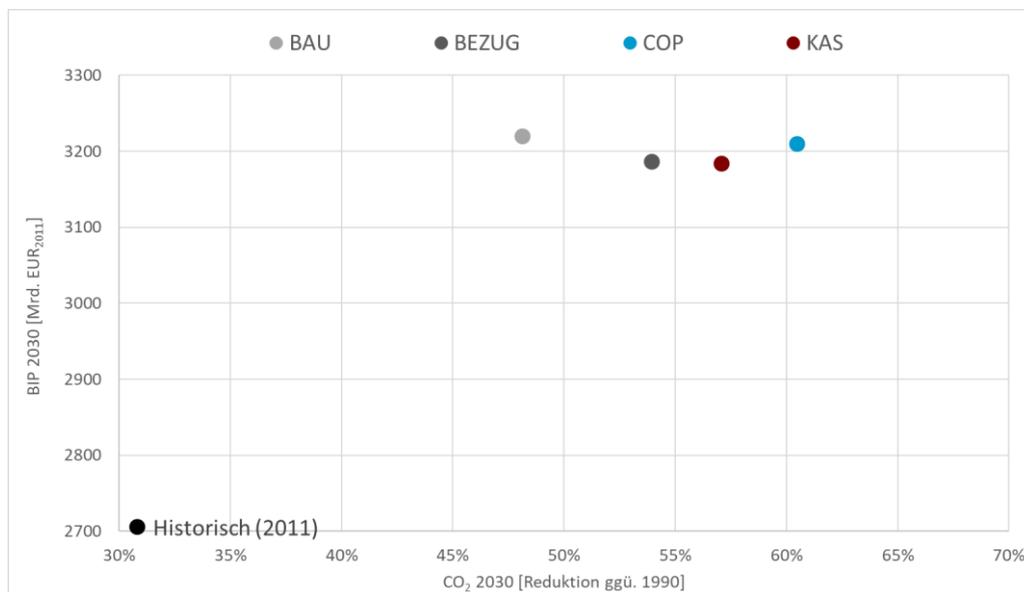


Abbildung 23: Mittelfristiger Zusammenhang zwischen Bruttoinlandsprodukt und Emissionsreduktion

Zur **Analyse der volkswirtschaftlichen Effekte** wurden verschiedene Szenarien mit dem allgemeinen Gleichgewichtsmodell NEWAGE berechnet. Die Ergebnisauswertung betrachtet unter anderem die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes (BIP), Exporte oder Beschäftigungseffekte.

Trotz der modellierten politischen Eingriffe **steigt das BIP** vom historischen Wert in 2011 (ca. 2.700 Mrd. €₂₀₁₁) auf etwa 3.200 Mrd. €₂₀₁₁ in 2030 an. Die **Unterschiede im Wirtschaftswachstum zum Business as Usual (BAU)** Szenario mit keinen weiteren Maßnahmen zum Klimaschutz gegenüber dem status quo sind **trotz erhöhter Emissionsminderungen gering**.

Je nach Szenario können bei etwa gleichbleibendem Wirtschaftswachstum jedoch erheblich höhere

Emissionsreduktionen realisiert werden. So zeigt sich, dass der **CO₂-Mindestpreis gesamtwirtschaftlich am kosteneffizientesten** ist.

Zudem geht aus vorangehenden Analysen hervor, dass sektorübergreifende Ziele den aktuell vorgegebenen Sektorzielen aus Perspektive der Kosteneffizienz vorzuziehen sind.

Die **Wettbewerbs- und Beschäftigungseffekte** zeigen ähnliche Dynamiken, da sie mit der Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes zusammenhängen. Auch hier gilt, dass sektorübergreifende Ziele und ein CO₂-Preis-Szenario die Maßnahmen darstellen, deren gesamtwirtschaftliche Auswirkungen am positivsten zu bewerten sind.



CO₂-MINDERUNGSKOSTEN

Die CO₂-Minderungskosten setzen sich aus verschiedenen Bestandteilen zusammen. Kosten die modelltechnisch nicht erfasst sind, müssen dabei zusätzlich berücksichtigt werden.

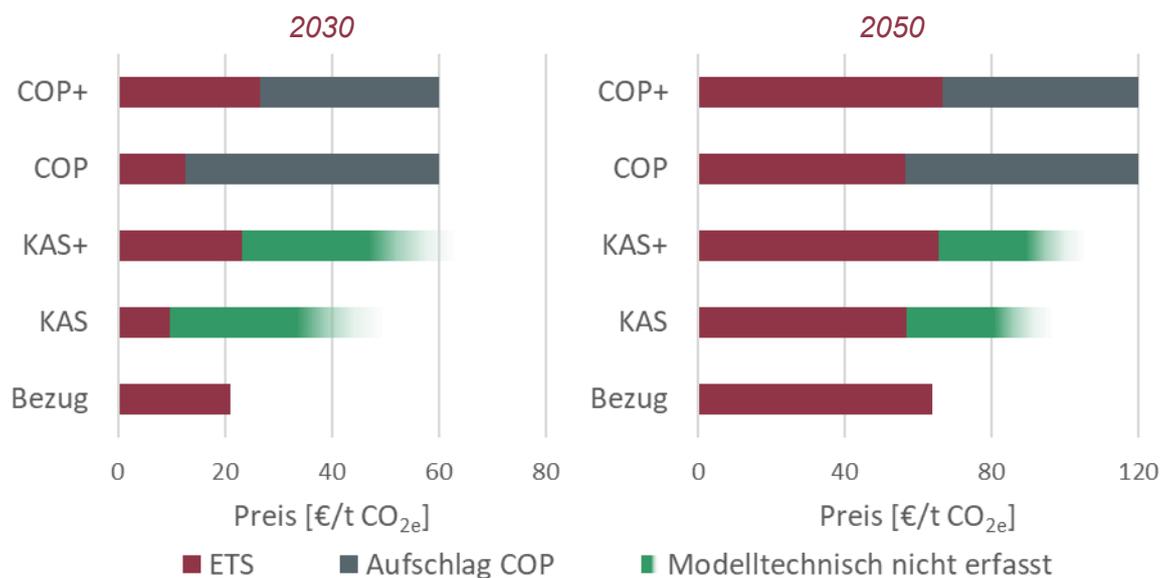


Abbildung 24: CO₂-Preise in 2030 und 2050 nach Szenarien

Die **CO₂-Preise** für die deutsche Stromwirtschaft setzen sich in Abhängigkeit der Szenarien aus **unterschiedlichen Preisbestandteilen** zusammen.

Als Basis fungiert in allen Szenarien der Zertifikatspreis aus dem Europäischen Emissionshandelsystem (EU-ETS), dieser liegt zwischen 9,60 bis 26,70 €/t (2030) bzw. 56,60 bis 66,90 €/t (2050).

In den **CO₂-Preis-Szenarien** erfolgt auf den ETS-Preis ein entsprechender **Aufschlag**, um in 2030 ein Preisniveau von 60 €/t bzw. in 2050 von 120 €/t zu erreichen.

Deutlich wird die **Wirkung des schnellen Kohleausstiegs (KAS) bzw. des CO₂-Mindestpreises (COP)** in 2030 sichtbar. Diese Maßnahmen führen jeweils zu **absinkenden Preisen im EU-ETS**.

An dieser Stelle setzt entsprechend die **Zertifikatsstilllegung** in den Szenarien KAS+ und COP+ an, um durch entsprechende Reduktion des EU-ETS-

Budgets das ursprüngliche Preisniveau für alle Regionen wiederherzustellen.

In den **KAS-Szenarien** ist **zusätzlich** zu beachten, dass die **Kosten** der Kraftwerksstilllegungen (z. B. Überführung in Reserve bzw. ggf. Entschädigungszahlungen) **modelltechnisch nicht erfasst** wurden. Die volkswirtschaftlichen, spezifischen Treibhausgasminderungskosten, die sich durch diese Maßnahme ergeben, liegen daher über dem EU-ETS-Preisniveau.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass im Falle der **COP-Szenarien** durch den höheren CO₂-Preis **erhebliche zusätzliche Einnahmen für den Staat** entstehen, die **Raum für Kompensation** für die Endverbraucher schaffen und somit gesamtwirtschaftlich nicht notwendigerweise als Kosten zu werten sind. Die um diesen Effekt **bereinigten kumulierten Emissionsminderungskosten** auf Basis der Systemkosten sind mit **ca. 90 EUR/tCO_{2e} bei COP+ ggü. ca. 120 EUR/tCO_{2e} bei KAS+ am niedrigsten**.



MONATLICHE BELASTUNG DER HAUSHALTE

Je nach Verteilungsmechanismus und politischer Instrumentierung ergeben sich unterschiedliche Kostenbelastungen für die deutschen Haushalte von hoher Relevanz.

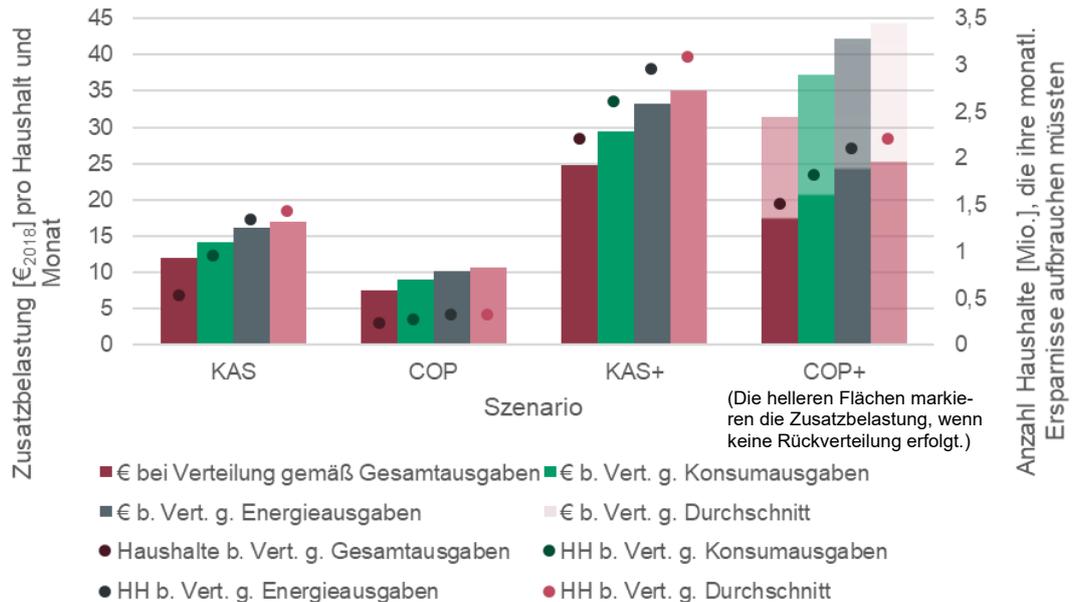


Abbildung 25: Auswirkung verschiedener Verteilungsmechanismen auf die Belastung der Haushalte der Einkommensgruppe mit 2100 – 2740 Euro Monatseinkommen

Die technologische Transformation des bestehenden Energiesystems verursacht Kosten. Diese **Kosten müssen letzten Endes von den Endverbrauchern**, also den deutschen Haushalten **getragen werden**. In diesem Zusammenhang müssen **Verteilungseffekte** und **konkrete Mehrbelastungen der Haushalte** diskutiert werden. Die **konkrete Verteilung** der Mehrkosten auf die Haushalte erfolgt durch **Kostenwälzungen in den Märkten** auf die von den Haushalten bezogene Energie, Güter und Dienstleistungen und kann mit den ENavi-Modellen nicht berechnet werden. Die **nachgelagerte Berechnung** versucht jedoch die Schwankungsbreite dieses Effekts aufzuzeigen.

Dabei zeigt sich, dass die politische Ausgestaltung die **durchschnittliche Kostenbelastung** der Haushalte erheblich beeinflusst. Während ein CO₂-Mindestpreis Mehrkosten von etwa 8-11 €/Monat und Haushalt verursacht (wenn die Zusatzeinnahmen aus den höheren CO₂-Preisen vollständig

rückverteilt werden), steigt diese Belastung bei einem ordnungsrechtlichen Kohleausstieg auf etwa 12-17 €/Monat und Haushalt an. Werden zusätzliche flankierende Maßnahmen ergriffen, so erhöhen diese auch die Kosten. Werden bei COP/COP+ die **Zusatzeinnahmen des Staates nicht rückverteilt**, ergeben sich trotz höchster Kosteneffizienz mit **bis zu 53 EUR/Monat und Haushalt die höchsten Belastungen**. Außerdem kann gezeigt werden, dass die Zusatzbelastung auch je nach Verteilungsmechanismus variiert. Dies verdeutlicht die **Wichtigkeit flankierender sozialpolitischer Maßnahmen**.

Da die Ersparnisse einkommensschwacher Haushalte bis hin zu Haushalten mit mittlerem Einkommen nicht ausreichen, um diese Mehrbelastung zu tragen, sind **unbedingt entsprechende Kompensationsmaßnahmen** mit einzuführen.¹

¹ In der Abbildung wird die „erste“ Haushaltsgruppe mit positivem Sparpotenzial abgebildet. (Quelle: Einkommens- und Ver-

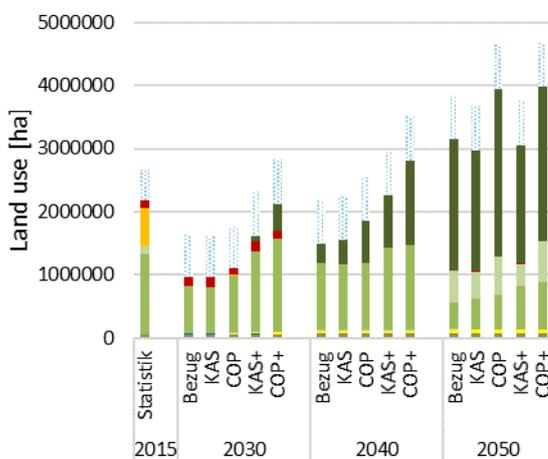
brauchsstichprobe. Einnahmen und Ausgaben privater Haushalte 2013. Fachserie 15, Heft 4, Wiesbaden 2015; eigene Berechnungen.)



LAND- UND WASSERNUTZUNG

Der Kohleausstieg erhöht den Flächenbedarf für die Energienutzung und reduziert die Wasserentnahme.

Flächenbedarf



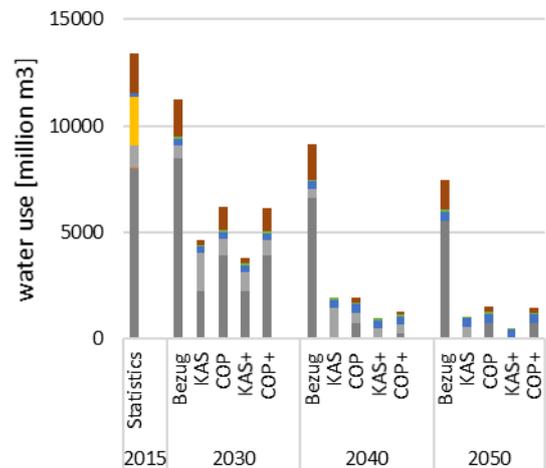
- Windkraft Parkfläche
- Zuckerrübenanbau
- Biogas andere Sektoren
- Windkraft Fundament
- Pumpspeicher
- KUP Anbau
- Rapsanbau
- Biogas Stromsektor
- Freiflächen PV
- Braunkohle

Abbildung 27: Flächenverbrauch nach Energieträger und Szenario zwischen 2010 und 2050

Bei den Szenarien mit CO₂-Preis kommt es zu einem **erhöhten Flächenbedarf** (+1 Mio ha) für die Energienutzung aufgrund einer größeren Biomassenachfrage.

700.000 ha könnten in allen Szenarien durch **Doppelbelegung Windkraft + Biomasse** bzw. Windkraft + landwirtschaftliche Nutzung weniger anderweitig genutzt werden.

Wasserentnahme des Stromsektors



- Lignite mining
- Biogas / Biofuel
- Biomass solid / Waste ren.
- Waste non renewable
- Nuclear
- Natural Gas / non renew.
- Oil
- Coal & Lignite

Abbildung 26: Wasserentnahme nach Energieträger und Szenario zwischen 2010 und 2050

Im Gegenzug kommt es zu einer stark **reduzierten Wasserentnahme** des Stromsektors aufgrund von verminderter Nachfrage nach Kühlwasser in den Szenarien mit CO₂-Preis oder Kohleausstieg. Kühlwasser wird in der Regel aus Flüssen entnommen und verursacht bei Wiedereinleitung eine **Wärmebelastung**. Der Rückgang der Kühlwassernachfrage ist daher positiv für das Flussökosystem zu bewerten.



GESUNDHEIT: LUFTVERSCHMUTZUNG IN 2030

Der EU-Klimaschutz reduziert die Luftverschmutzung deutlich. Dabei kommt der Energiewirtschaft eine Schlüsselrolle zu.

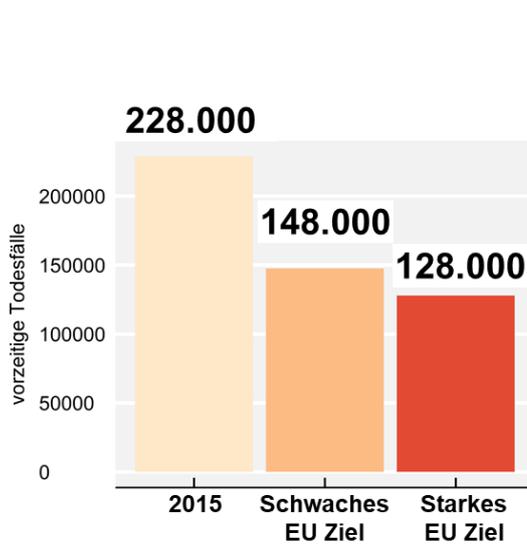


Abbildung 28: Anzahl vorzeitiger Todesfälle in Abhängigkeit von EU-Klimaschutzziel

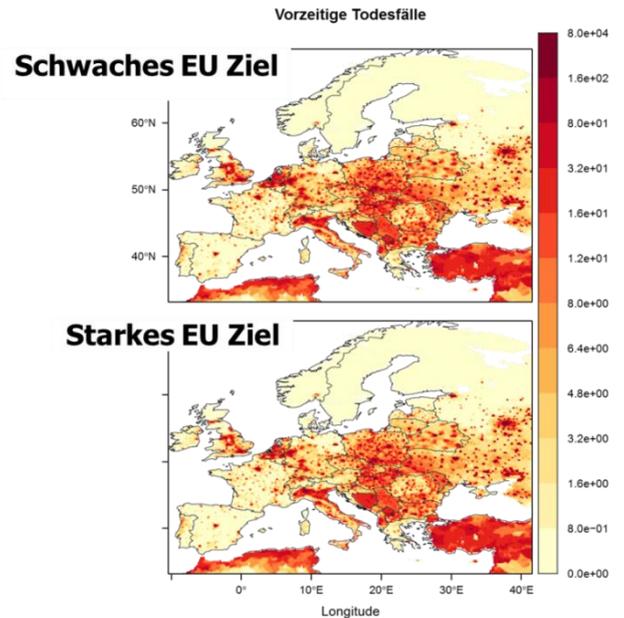


Abbildung 29: Geografische Verteilung der vorzeitigen Todesfälle bei starkem und schwachem EU-Ziel

Die **Auswirkungen** verschiedener Klimaschutzziele auf die **Luftverschmutzung** und die damit verbundenen Auswirkungen auf die **öffentliche Gesundheit** wurden ebenfalls untersucht.

Betrachtet wurden Erkrankungen der Atemwege und Lungenkrebs und die damit verbundenen Gesundheitswirkungen gemessen in **vorzeitigen Todesfällen**.

Kontrastiert wird ein **schwaches Klimaschuttszenario**, charakterisiert durch eine Fortschreibung der bisherigen Treibhausgasemissionsminderung, und ein **starkes EU-Ziel**, welches sich durch eine deutliche und zeitnah eingeleitete Treibhausgasemissionsminderung von 95% bis 2050 gegenüber dem Stand von 1990 auszeichnet.

Die Ergebnisse zeigen einen erheblichen **Reduktionseffekt** der durch Luftverschmutzungen bedingten **Gesundheitswirkungen** durch das starke EU-Klimaschutzziel. Die Zahl der modellierten **vorzeitigen Todesfälle** wird gegenüber dem heutigen Stand **fast halbiert**. Dies verdeutlicht die Schlüsselrolle der Energiewirtschaft bei der Luftreinhaltung.

Ein schwacher Klimaschutz führt durch technologischen Fortschritt und strengerer Schadstoffemissionsgrenzwerte auch zu einer Minderung, die vorzeitigen Todesfälle sind aber um etwa 20.000 Fälle höher im Vergleich zum starken Klimaschutz. Hiervon trägt **Deutschland** mit mehr als 6.000 Todesfällen die **Hauptlast**. Bei Anwendung der durch die OECD empfohlenen Methode zur Übersetzung in Kosten, entspricht das etwa 25 Mrd. €.

5 MULTIKRITERIELLE BEWERTUNG DER SZENARIEN

Um die Modellierungsergebnisse ganzheitlich einzuordnen, wurde ein multikriterieller Bewertungsansatz zur Ergebnisbewertung angewendet.

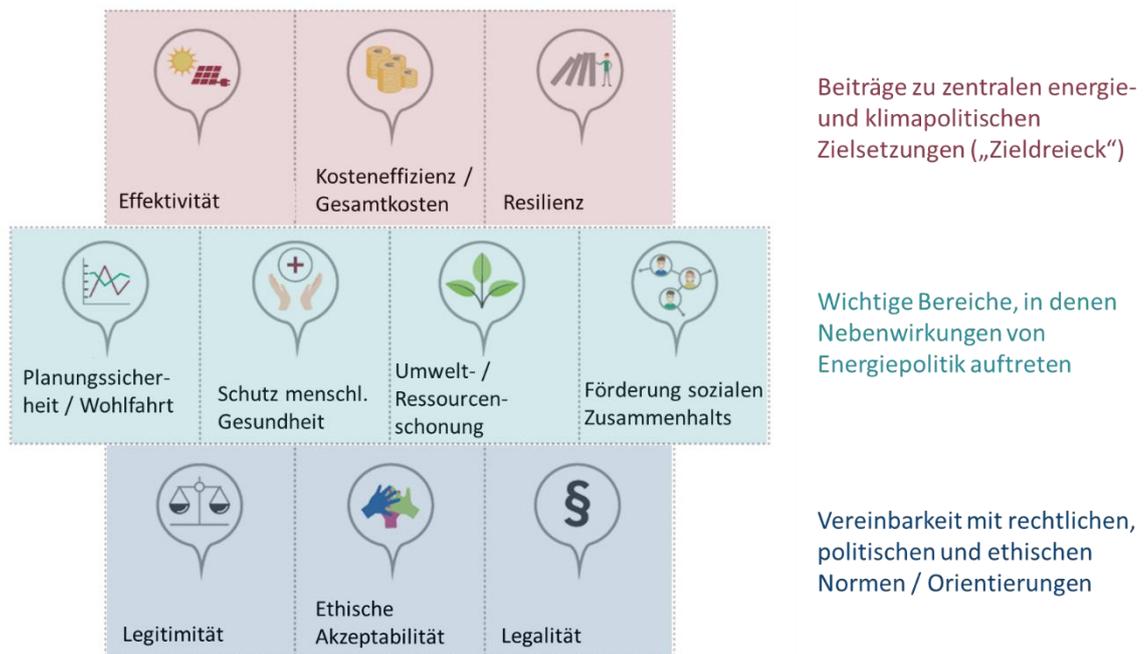


Abbildung 30: Die zehn Bewertungskriterien des ENavi-Ansatzes

Der **multikriterielle Bewertungsansatz** von ENavi beurteilt die Szenarien in Hinblick auf zehn unterschiedliche Hauptkriterien. Diese berücksichtigen verschiedene gesellschaftliche Zielgrößen.

Drei Kriterien lassen sich dem energie- und klimapolitischen Zieldreieck zuordnen: **Effektivität** (Grad der Zielerreichung im Rahmen der Energiewende, insbesondere der Klimaziele), **Kosteneffizienz/Gesamtkosten** (finanzielle Auswirkungen energiepolitischer Maßnahmen für Haushalte, Unternehmen und die Gesamtwirtschaft) und **Resilienz** (Fähigkeit eines Systems, seine Leistungsfähigkeit auch unter Stress aufrechtzuerhalten).

Vier Kriterien betrachten gesellschaftlich relevante Bereiche, in denen Nebenwirkungen der untersuchten Maßnahmen zu erwarten sind: **Wirtschaftliche Planungssicherheit/Wohlfahrt** (Möglichkeit, ein Mindestmaß an Rendite zu realisieren),

Schutz der menschlichen Gesundheit (vor schädlichen Stoffen/Lärm/Strahlen), **Umwelt- und Ressourcenschonung** (Verbräuche erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Ressourcen und Inanspruchnahme der Umwelt) und **Förderung des sozialen Zusammenhalts** (Bereitschaft in der Gesellschaft gemeinsam zur Erreichung der Energiewende beizutragen, Fähigkeit des Staates zur Daseinsvorsorge sowie wirtschaftliche Belastung (einkommensärmerer) Haushalte durch Energiekosten).

Zuletzt wird anhand von drei Kriterien geprüft, ob die Szenarien mit rechtlichen, politischen und ethischen Normen vereinbar sind: **Legitimität** (Unterstützung/Akzeptanz durch die Betroffenen), **Ethische Akzeptabilität** (Gerechtigkeit, Zumutbarkeit, Respekt vor Autonomie) und **Legalität** (Vereinbarkeit mit dem geltenden Recht).

5.1 BEWERTUNG DER SZENARIEN AM BEISPIEL KSP90AE UND KAS

Zur Veranschaulichung werden die Bewertungskriterien in Form eines Netzdiagramms dargestellt. Die Bewertung der Szenarien erfolgt nach Ampelfarben.

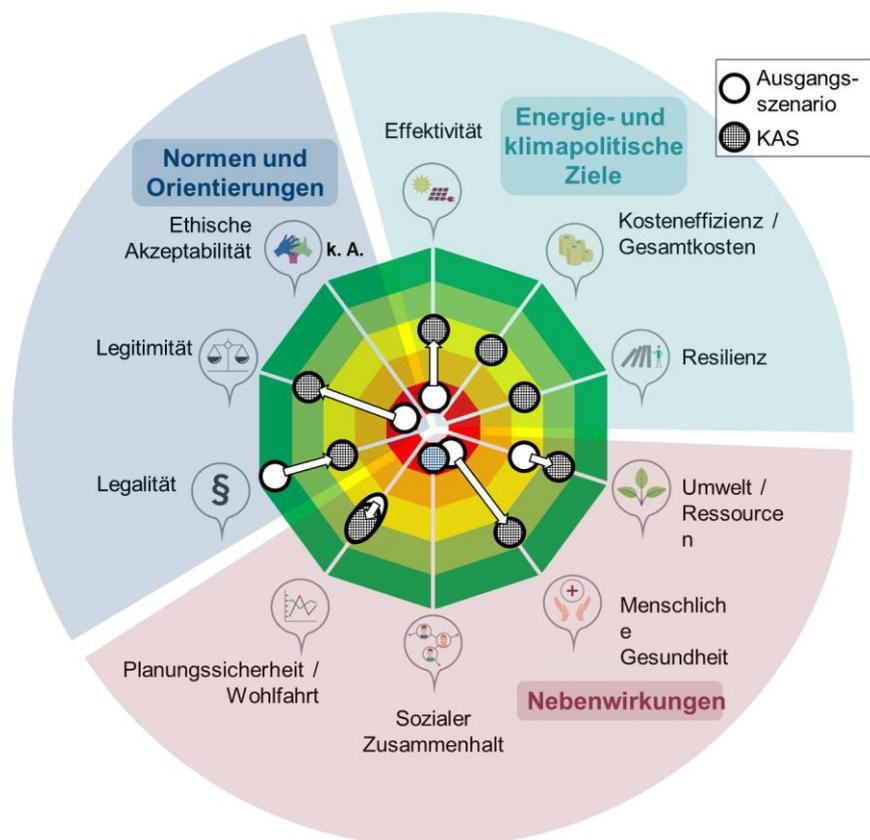


Abbildung 31: Vergleich der multikriteriellen Bewertung des Ausgangsszenarios KSP90aE mit dem Kohleausstiegsszenario KAS

Die Darstellung in Form eines Netzdiagramms ermöglicht die **parallele Betrachtung** aller Bewertungskriterien. Die einzelnen Szenarien werden mit Hilfe von unterschiedlichen Punktmarkierungen visualisiert. So kann ein **schneller und einfacher Vergleich** der Ausprägungen zweier Szenarien in den unterschiedlichen Kriterien erfolgen. Die Bewertung der Szenarien erfolgt anhand der **Ampelfarben** (rot = negative Bewertung, gelb = neutral oder ambivalent, grün = positive Bewertung).

Ein **Vergleich des Ausgangsszenarios KSP90aE mit dem Kohleausstiegsszenario KAS** zeigt beispielsweise auf, dass die Bewertung der Kriterien Effektivität, Umwelt, menschliche Gesundheit, Planungssicherheit und Legitimität durch den Kohleausstieg verbessert werden kann. Das Kriterium Legalität hingegen entwickelt sich von grün auf gelb, da für die Umsetzung eines Kohleausstiegs die Verabschiedung von neuen Gesetzen notwendig ist. Für manche Kriterien (z.B. Resilienz) ist die Bewertung aufgrund fehlender Daten noch unvollständig.

5.2 IM DETAIL: EFFEKTIVITÄT 2030

Um die Bewegungen innerhalb der einzelnen Kriterien nachvollziehen zu können, ist es ratsam, einen Blick auf die Unterkriterien zu werfen, aus denen sich das Hauptkriterium zusammensetzt.

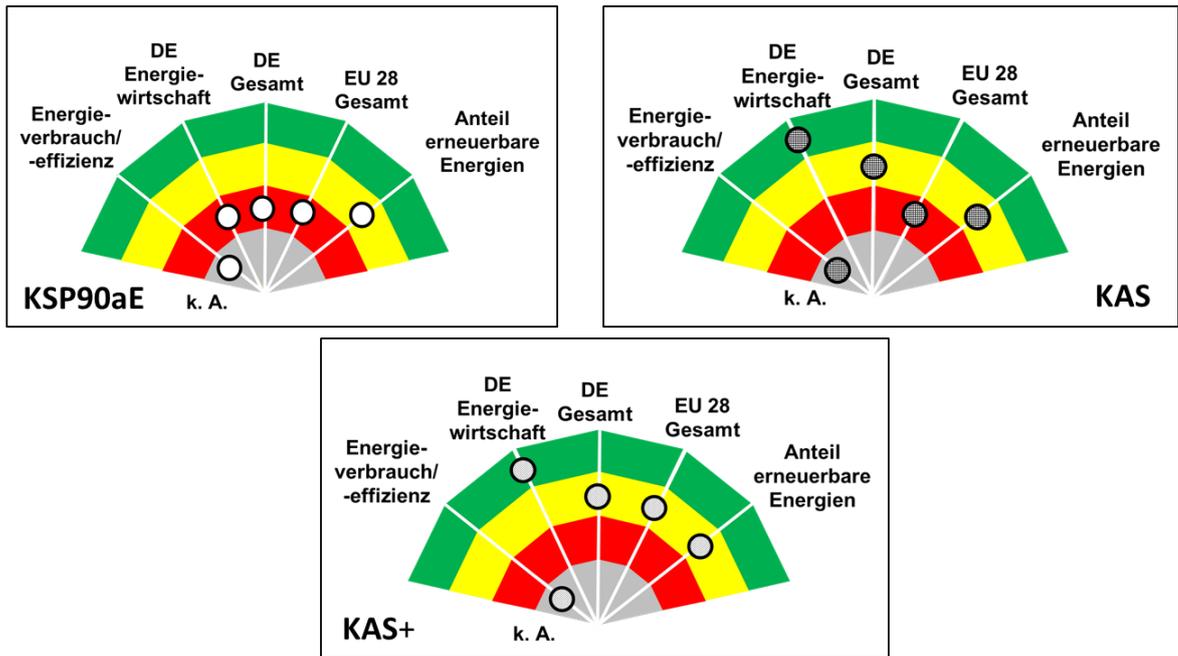


Abbildung 32: Die Bewertung der Unterkategorien für das Kriterium "Effektivität" für verschiedenen Szenarien

Die aggregierte Bewertung in den zehn Hauptkriterien ermöglicht einen ersten Überblick über die Entwicklungen im Szenarienvergleich. Die Unterkriterien, aus denen sich die Hauptkriterien zusammensetzen, ermöglichen eine vertiefte Analyse.

Betrachtet man beispielsweise das Kriterium **Effektivität** im Detail, so setzt es sich aus **fünf Unterkriterien** zusammen: Energieverbrauch/-effizienz, Emissionen der deutschen Energiewirtschaft, Gesamtemissionen Deutschlands, Gesamtemissionen der EU und Anteil der erneuerbaren Energien.

Das **Gesamtkriterium** wird für das Szenario KSP90aE mit „rot“ eingestuft, für die Szenarien KAS und KAS+ jeweils mit „gelb“. Das bedeutet jedoch nicht, dass die flankierenden Maßnahmen im Szenario KAS+ keine Wirkung haben.

Betrachtet man die **Detailansicht** wird dies ersichtlich. Während im Szenario KAS die europäischen Emissionen mit „rot“ bewertet werden, verbessert sich dieses Unterkriterium im Szenario KAS+ auf „gelb“. In der aggregierten Betrachtung des Hauptkriteriums geht dieses Detail verloren.