

**Kasten 3****Makroökonomisches Modell**

Die Simulationsrechnungen basieren auf einem rekursiven Wachstumsmodell, welches den Ansatz aus dem Jahresausblick 2024 des IWH um einen CO<sub>2</sub>-Zertifikate-Handel mit einer exogen vorgegebenen Menge an CO<sub>2</sub>-Zertifikaten ( $CAP_t^{CO_2}$ ) und ein sich aus Nachfrage und Angebot ergebender CO<sub>2</sub>-Preis ( $P_t^{CO_2}$ ) erweitert. Weiterhin wird ein dynamischer Zusammenhang zwischen Energiepreisen ( $P_t^E$ ) und Energieeffizienz ( $AE_t$ ) berücksichtigt.

$$AE_t = AE_{t-1} \left( 1 + \left( \sum_{\tau}^3 \kappa_{\tau}^{AE} \frac{P_{t-\tau}^E}{P_{t-\tau-1}^E} \right) + \eta_t^{AE} \right)$$

Die Koeffizienten werden basierend auf Känzig (2024) so kalibriert, dass ein Energiepreisanstieg von 10% nach drei Jahren einen Anstieg der Energieeffizienz von 0,5% verursacht. Erneuerbare Energien  $EC_t$  werden mit Hilfe von Kapital ( $KC_t$ ) und Arbeit ( $LC_t$ ) hergestellt. Kapital und Arbeit können nicht substituiert werden, variieren aber in Ihrer Produktivität ( $ACK_t, ACL_t$ ). Die durchschnittliche Kapitalproduktivität steigt durch Lerneffekte mit der produzierten Menge CO<sub>2</sub>-freier Energien.

$$ACK_{t+1} = ACK_t (1 - w_t^{KC}) + w_t^{KC} \left( \eta_t^{ACK} + \kappa_t^{ACK} \frac{EC_t}{EC_{t_0}} \right),$$

$$w_t^{KC} = \frac{I_t^{KC}}{KC_{t+1}}.$$

Die Lernrate ( $\kappa_t^{ACK}$ ) gibt an um wie viel die Kapitalproduktivität neuer Anlagen steigt, wenn sich die produzierte Menge von erneuerbaren Energien verdoppelt. Fraunhofer (2021) gehen von einer Lernrate von 20% aus (vgl. Tabelle K3). Die Investitionsentscheidung wird unter klassischen Annahmen bezüglich der Nutzenmaximierung eines repräsentativen Haushaltes mit myopischen Erwartungen hergeleitet. Der Preis für erneuerbare Investitionen steigt mit höheren Investitionsvolumen.

$$IC_t = IC_0 \cdot \left( \frac{\beta \cdot RC_t - a_{EC}}{c_{EC}} \right),$$

Die Investitionen in erneuerbare Energien steigen mit der Kapitalrendite ( $RC_t$ ) CO<sub>2</sub>-freier Technologien, welche der marginalen Kapitalproduktivität entspricht. Die marginale Kapitalproduktivität leitet sich ab aus der Gewinnmaximierung CO<sub>2</sub>-freier Energieproduzenten.

$$\max_{KC_t, LC_t} PEC_t EC_t - RC_t KC_t - WC_t LC_t,$$

$$EC_t = \min(ACK_t \cdot KC_t, ACL_t \cdot LC_t).$$

Unter der Bedingung, dass Produktionsfaktoren nicht unnötig eingesetzt werden, ergibt sich folgender Ausdruck für die Rendite von Kapital eingesetzt in der Produktion für CO<sub>2</sub>-freie Energie.

$$RC_t = PEC_t ACK_t - WC_t \frac{ACK_t}{ACL_t}.$$

Die Rendite für Kapital aus CO<sub>2</sub>-freier Produktion steigt mit höheren Energiepreisen  $PE_t$ , höherer Kapitalproduktivität ( $ACK_t$ ), Arbeitsproduktivität ( $ACL_t$ ) und fällt mit höheren Löhnen ( $WC_t$ ).

Das Optimierungsproblem für fossile Energien unterscheidet sich durch die Nutzung von importierter fossiler Energie ( $EDIM_t$ ), welche zu Weltmarktpreisen ( $PEDIM_t$ ) eingekauft werden. Außerdem, müssen fossile Energieproduzenten für jede ausgestoßene Tonne CO<sub>2</sub> ein Zertifikat erwerben.

$$\max_{KC_t, LC_t} PED_t ED_t - RD_t KD_t - WD_t LD_t - PEDIM_t EDIM_t - PCO_{2,t} CO_{2,t},$$

Der CO<sub>2</sub>-Preis stellt sicher, dass die Null-Gewinn Bedingung hält und es keinen Anreiz gibt mehr fossile Energien zu produzieren.

Energie ( $E_t$ ) wird zusammen mit Kapital ( $K1_t$ ) und Arbeit ( $L1_t$ ) kombiniert um Dienstleistungen und Güter für Investitionen ( $I_t$ ), privaten Konsum ( $C_t$ ), dem Außenhandel ( $NX_t$ ) und den öffentlichen Sektor bereit zustellen

( $G_t$ ). Eine Vielzahl repräsentativer Firmen maximiert Ihre Gewinne unter perfektem Wettbewerb.

$$\begin{aligned} & \max_{K1_t, L1_t, EC_t, ED_t} PY_t Y_t - R1_t K1_t - W1_t L1_t - PED_t ED_t - PEC_t EC_t, \\ & s. t. Y_t = \left( (1 - \gamma) (A1_t K G_t^\zeta K1_t^\alpha L1_t^{1-\alpha})^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \gamma E_t^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}, \\ & E_t = \left( (1 - \omega^c) ED_t^{\frac{\sigma^c-1}{\sigma^c}} + \omega^c EC_t^{\frac{\sigma^c-1}{\sigma^c}} \right)^{\frac{\sigma^c}{\sigma^c-1}}, \\ & ED_t \kappa^{CO_2} \leq CAP_t^{CO_2}. \end{aligned}$$

Gewinne werden maximiert unter der Nebenbedingung, dass die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht die vorgegebene Menge an CO<sub>2</sub>-Zertifikaten überschreiten. Im CO<sub>2</sub>-Marktpreis-Szenario führt die Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Preises zur Erhöhung der Energiepreise und zur Einhaltung dieser Nebenbedingung, während im Feinsteuerszenario die Begrenzung des CO<sub>2</sub>-Preises weiter nicht marktbasierende Maßnahmen notwendig macht. Für den Fall, dass die Energiepreise nicht stark genug steigen repräsentiert eine Schlupfvariable ( $\mu_t^D$ ) den Wert einer Lockerung des CO<sub>2</sub>-Deckels für die Firma.

$$PED_t = PE_t (1 - \omega^c) \left( \frac{E}{ED_t} \right)^{\frac{1}{\sigma^c}} + \mu_t^D \kappa^{CO_2}.$$

Eine Feinsteuerung führt zu einer suboptimalen Verwendung von fossiler Energie und somit zu einer Abweichung des Grenzproduktes von Energie zu seinem jeweiligen Marktpreis. Gleichzeitig muss die Null-Gewinn Bedingung halten.

$$PY_t Y_t = PED_t ED_t + PEC_t EC_t + R1_t K1_t + W1_t L1_t.$$

Eine CO<sub>2</sub>-Preis-Obergrenze reduziert den Kostendruck für die Unternehmen. Diese sind ohne den energiesparenden technischen Fortschritt weniger produktiv. Die geringere Produktionsmenge führt ceteris paribus zu höheren Durchschnittspreisen.

**Tabelle K3**  
Kalibrierung des Modells

Parameter/Initialisierung	Wert	Quelle
Kapitalanteil:	$\alpha$	0,35
	$\gamma$	0,05
	$\zeta$	0,1
	$\sigma$	0,2
Energieimporte:	$\frac{p^E (im_1^E E_1^C + im_1^D E_1^D)}{BIP_1}$	3%
Arbeits- und Kapitalverteilung:	$\frac{L_1^C}{L_1}, \frac{L_1^D}{L_1}, \frac{K_1^C}{K_1}, \frac{K_1^D}{K_1}, \frac{K_1^E}{K_1}$	0,2%; 0,6%; 1,4%; 0,8%; 13%
Investitionsquoten:	$s = \frac{I_1}{BIP_1}, s^G = \frac{I_1^G}{BIP_1}$	22,1%; 3%
Abschreibungsraten:	$d^{NE}, d^C, d^D, d^G$	2,6%; 5%; 2%, 2,6%
Lernrate Kapitalproduktivität CO <sub>2</sub> -freier Energien		20%
Energieeffizienzpreiselastizität ( $\kappa_{1, \dots, 3}^{AE}$ )		5/300, 5/200, 5/100
Substituierbarkeit CO <sub>2</sub> -freier versus fossiler Energien $\sigma^c$		10 (perfekte Substitute)

<sup>1</sup> Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose: Klimaschutz ohne Produktionseinbußen: Die Rolle energiesparenden technischen Fortschritts, in: Hintergrundpapier zum Schwerpunktthema, Frühjahr 2023. – <sup>2</sup> Drygalla, A.; Holtemöller, O.; Kiesel, K.: The effects of fiscal policy in an estimated DSGE model—The case of the German stimulus packages during the Great Recession, Macroeconomic Dynamics, 24(6), 2020, 1315–1345. – <sup>3</sup> Bönke, T.; et al.: DIW-Konjunkturprognose: Deutschland hinkt der Weltwirtschaft hinterher, in: DIW Wochenbericht, Nr. 36/37, 471–503, 2023. – <sup>4</sup> Fraunhofer ISE: (2021), a.a.O. – <sup>5</sup> Känzig (2024), a.a.O. – <sup>6</sup> Arbeitskreis Konjunktur des IWH: Grüne Transformation und Schuldenbremse: Implikationen zusätzlicher Investitionen für öffentliche Finanzen und privaten Konsum, in: Konjunktur aktuell, Jg. 11 (4), 2023.