

Integrierte Analyse von Klima und Wirtschaft

Die Modellierung optimaler klimapolitischer Entscheidungen erfordert die Berücksichtigung von Unsicherheiten in der zukünftigen Entwicklung des Klimas und der Wirtschaft. Stochastische Varianten des Nobelpreis-gekrönten DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy)-Modells ermöglichen die Untersuchung solcher Unsicherheiten, doch klassische numerische Methoden stoßen schnell an ihre Grenzen.

Auf diesem Poster zeigen wir, wie das Least-Squares-Monte-Carlo-Verfahren (LSMC) zur Lösung stochastischer optimaler Kontrollprobleme in klimaökonomischen Modellen eingesetzt werden kann. Aufgrund der Modellkomplexität verwenden wir künstliche neuronale Netze zur Approximation bedingter Erwartungen anstelle klassischer Regressionsmethoden.

Wir erstellen Prognosen für die Verteilung künftiger Temperaturpfade, simulieren klimabedingte Schäden an der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, und diskutieren das Potenzial für eine verbesserte Entscheidungsunterstützung in der Klimapolitik sowie im Risikomanagement bei Banken und Versicherungen.

Künstliche neuronale Netze für stochastische Kontrollprobleme

Das stochastische DICE-Modell stellt ein klassisches stochastisches Kontrollproblem dar, dessen Ziel darin besteht, den erwarteten Gesamtnutzen zu maximieren:

$$V_0(x) = \sup_{\pi} \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^{\infty} \rho^t R_t(X_t, \pi_t) \mid X_0 = x; \pi \right],$$

wobei π die Kontrolle, X der kontrollierte Zustand und R_t Belohnungs- bzw. Nutzenfunktionen sind. Die numerische Lösung erfolgt mittels der Bellman-Gleichung:

$$V_t(x) = \sup_{\pi_t \in \mathcal{A}_t} \left\{ R_t(x, \pi_t) + \mathbb{E} \left[\rho V_{t+1}(X_{t+1}) \mid X_t = x; \pi_t \right] \right\}.$$

Bei der LSMC-Methode approximiert man die bedingte Erwartung

$$\Phi_t(X_t, \pi_t) = \mathbb{E} \left[\rho V_{t+1}(X_{t+1}) \mid X_t; \pi_t \right]$$

mittels eines Regressionsschemas.

Da der Zustandsvektor X hochdimensional sein kann, wählen wir neuronale Netze, um Φ_t zu approximieren. Sei dafür $\psi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ eine nichtlineare Aktivierungsfunktion. Ein einfaches neuronales Netz hat dann die Form ($n \in \mathbb{N}$):

$$\mathbb{R}^n \ni x \mapsto \psi(\langle \alpha, x \rangle + \gamma), \quad \alpha \in \mathbb{R}^n, \gamma \in \mathbb{R}.$$

Unter der Annahme ausreichender Integrierbarkeit ist die bedingte Erwartung Φ_t eine orthogonale Projektion. Universelle Approximationsresultate liefern einen theoretischen Beweis dafür, dass neuronale Netze die bedingte Erwartung beliebig gut approximieren können.

Klimabedingter Value-at-Risk

Mithilfe des stochastischen DICE-Modells können klimabedingte Risiken für die Entwicklung der Gesamtwirtschaft quantifiziert werden. Definiert man etwa den totalen, klimabedingten Verlust als die aggregierte, diskontierte Summe aller künftigen Einbußen des Bruttoinlandsprodukts (BIP), so erhält man eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, auf deren Basis Risikokennzahlen, wie etwa der klimabedingte Value-at-Risk (VaR), berechnet werden können. Abbildung 2 zeigt die Verteilung des klimabedingten Schadens an der Gesamtwirtschaft (dargestellt in Relation zum BIP des Basisjahres) für unterschiedliche Szenarien, darunter „Business as usual“ (keine Änderung/Verbesserung der Klimamaßnahmen), „Net-Zero“ (Reduktion industrieller Emissionen auf Null), und das „Kosten-Nutzen-optimale“ Szenario.

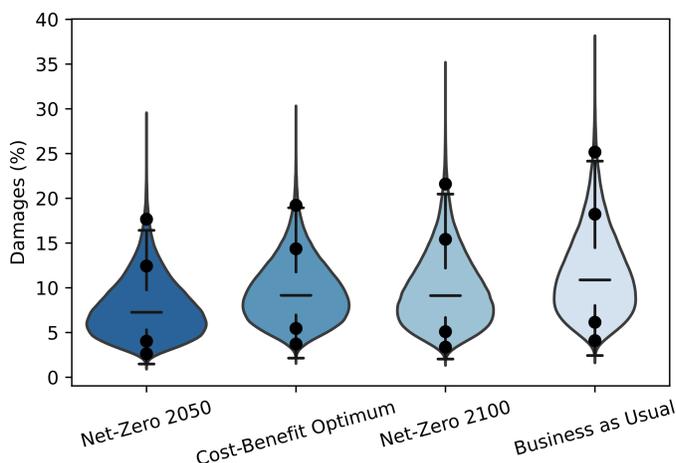


Abbildung 2

DICE Modell

Das DICE-Modell sucht nach Strategien π , welche die soziale Wohlfahrtsfunktion V maximieren, also die mit ρ diskontierte Summe über alle zukünftigen Zeitpunkte t des mit der Größe L_t der Wertbevölkerung gewichteten Nutzens u des Pro-Kopf-Konsums c_t :

$$V = \sup_{\pi} \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t L_t u(c_t). \quad (1)$$

Dabei sind z.B. folgende Effekte in das Modell eingebaut:

- Wirtschaftswachstum setzt Kohlenstoff in Form von CO_2 in die Atmosphäre frei.
- Steigende CO_2 -Konzentration erhöht die globalen Temperaturen.
- Steigende Temperaturen verringern die Produktion und schädigen somit die Wirtschaft.
- Der Konsum c_t hemmt den Anstieg des Wirtschaftskapitals.
- Die Emissionsminderungsrate μ_t reduziert die CO_2 -Emissionen, was jedoch mit Kosten verbunden ist.

Ziel dabei ist es, ein optimales Gleichgewicht zwischen dem Nutzen aus dem Pro-Kopf-Konsum und den Investitionen in Emissionsminderungsmaßnahmen herstellen.

Temperaturpfade

Die Lösung des stochastischen DICE-Modells liefert uns die zukünftige gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung von zahlreichen Zustandsgrößen wie z.B. die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre, das gesamtwirtschaftliche Vermögen, und die zukünftige Temperaturentwicklung. Im Gegensatz zu deterministischen Methoden ermöglicht die LSMC-Methode Wahrscheinlichkeiten, Quantile und weitere Kennwerte der Zustandsgrößen zu quantifizieren.

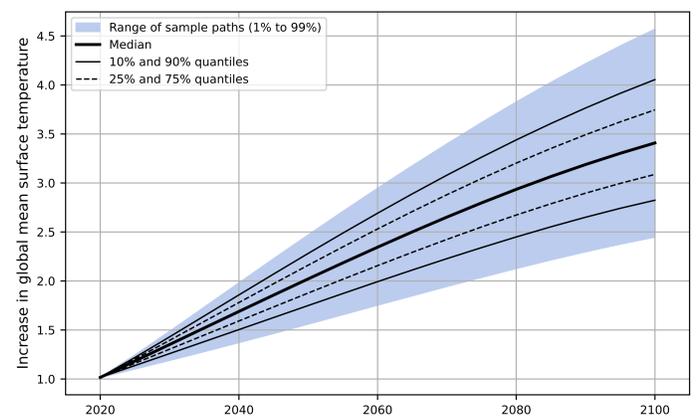


Abbildung 1

Abbildung 1 zeigt die prognostizierte Entwicklung der globalen mittleren Oberflächentemperatur bis zum Jahr 2100 (relativ zum vorindustriellen Niveau). Man erkennt, dass ein deutlicher Temperaturanstieg zu erwarten ist, dabei erreicht der Median-Pfad bis zum Jahr 2100 nahezu 3,5 Grad.

Klima-Stresstests für Versicherungsunternehmen

Der Klimawandel erhöht die Häufigkeit und Schwere wetterbedingter Schadensfälle, was das Risiko für Versicherer steigert und robuste Risikomanagementstrategien erfordert. Klima-Stresstests ermöglichen die Analyse finanzieller Schwachstellen, indem sie extreme Wetterereignisse und langfristige klimatische Veränderungen sowie deren Einfluss auf das Portfolio des Versicherers modellieren. Die stochastischen Temperaturpfade aus Abbildung 1 können in temperaturabhängige Mortalitätsraten übersetzt werden. Damit können Stress-Szenarien für Lebensversicherer entwickelt werden, um klimabedingte Risiken besser antizipieren und bewältigen zu können.

Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Nettoprämie (dargestellt als relative Abweichung vom Median) einer aufgeschobenen Annuität, welche in der Aufschubphase durch jährliche Prämienzahlungen finanziert wird.

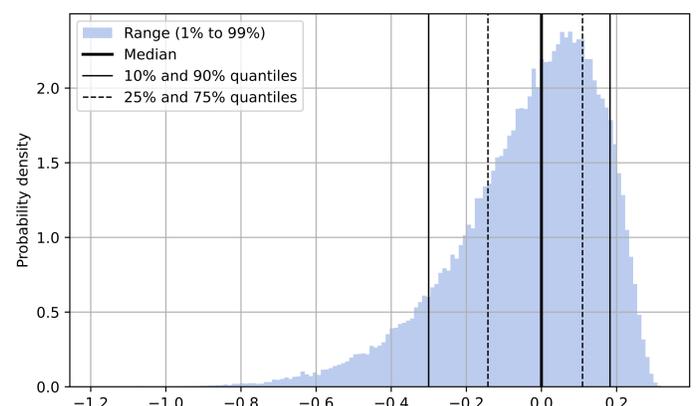


Abbildung 3