

Monetarisierung industrieller Umweltwirkungen einer Hightech-Fabrik

Kalibrierungsgrundlage für ein simulationsbasiertes Planspiel

Stand: Februar 2026

Geografischer Bezugsrahmen: Deutschland / Europäische Union

Dokumentstruktur

Abschnitt	Inhalt
1. Präambel	Zweck, Entstehung und Verwendungsrahmen des Dokuments
2. Methodik der Erarbeitung	Rechercheprompt, eingesetzte KI-Systeme, Integrationsprozess
3. Executive Summary	Destillierte Gesamtschau aller vier Rechercheergebnisse
4. Integrierte Ergebnisse	Konsolidierte Kennzahlen nach Umweltkategorie
5. Rechenmodell	Pollution-Modell mit Formeln und Parametertabellen
6. Literaturverzeichnis	Integriertes, quellenbereinigtes Quellenverzeichnis
Anhang A	Originaler Rechercheprompt
Anhang B	Einzelergebnis DeepSeek
Anhang C	Einzelergebnis Gemini
Anhang D	Einzelergebnis Claude
Anhang E	Einzelergebnis Perplexity

Recherche-Datum: 28. Februar 2026 | Synthese-Erstellung: Februar 2026

Beteiligte KI-Systeme: Claude (Anthropic) · Gemini (Google) · Perplexity AI · DeepSeek · ChatGPT/GPT-4o (OpenAI, Synthese)
Dieses Dokument dient ausschließlich der Parameterherleitung für ein wirtschaftswissenschaftliches Planspiel.

Version 1.0

Date 2026-03-01

erstellt durch Prof. Dr.-Ing. Martin Wölker

Hochschule Kaiserslautern

Campus Pirmasens

martin.woelker@hs-kl.de

Blog <https://martins-wahre-logistik.blogspot.com/>

Lizenz

  CC BY 4.0

Namensnennung
4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

1. Präambel

Das vorliegende Dokument dient als wissenschaftlich fundierte Kalibrierungsgrundlage für ein simulationsbasiertes Planspiel im Bereich Hightech-Produktion. Ziel ist es, eine abstrakte Umweltgröße, in Factorio „Pollution“, in reale, monetarisierbare Umweltwirkungen zu überführen. Das Planspiel simuliert eine hochautomatisierte Fabrik aus dem Bereich Robotik, Elektronikfertigung und halbleiternaher Produktion. Sämtliche im Modell verwendeten Parameter müssen daher auf zitierbaren, institutionell abgesicherten Quellen beruhen, um im wissenschaftlichen und lehrenden Kontext verteidigbar zu sein.

Die Parameter decken die zentralen Umweltwirkungsblöcke einer solchen Anlage ab: Energieverbrauch und Klimawirkung (CO₂, F-Gase), Luftschadstoffe (NO_x, SO₂, PM_{2.5}), Wasserverbrauch und -aufbereitung (Industriewasser, Ultra-Pure Water), Abfallentsorgung (Gewerbeabfall, Sonderabfall) sowie in einem optionalen Erweiterungsblock Material- und Ressourcenfu00dfabdr00fccke (Scope 3). Für jeden Parameter wird unterschieden zwischen gesellschaftlichen Schadenskosten (Damage Cost Approach, Referenz: UBA Methodenkonvention) und regulatorischen Compliance-Kosten (EU-ETS, nEHS, kommunale Tarife). Diese Unterscheidung ist methodisch zentral und wird im gesamten Dokument konsistent eingehalten.

Das Dokument entstand durch einen strukturierten KI-gestützten Rechercheprozess (vgl. Abschnitt 2). Es richtet sich an Modellentwickler, Lehrende und wissenschaftliche Begleiter des Planspiels, die die verwendeten Parameter nachvollziehen, kritisch prüfen und gegebenenfalls durch aktuellere oder standortspezifischere Daten ersetzen möchten. Sämtliche Zahlenwerte sind mit Primärquellen belegt; nicht belegbare Annahmen sind als solche gekennzeichnet.

2. Methodik

2.1 Ausgangspunkt: Der Rechercheprompt

Grundlage der gesamten Recherche war ein einheitlicher, strukturierter Eingabeprompt (vgl. Anhang A), der an vier verschiedene KI-Sprachmodelle übermittelt wurde. Der Prompt forderte die systematische Sammlung realer, zitierbarer Parameter zur Monetarisierung industrieller Umweltwirkungen – gegliedert in sechs Kategorien (Energie/Klima, Luft, Wasser, Abfall, Materialien, Thermik). Für jede Kennzahl waren zwingend anzugeben: exakte Bezeichnung, Einheit, Zahlenwert, Bezugsjahr, geografischer Kontext und Primärquelle.

Folgenden vier Systemen wurde der identische Rechercheprompt übermittelt:

1. DeepSeek: ehrliche Transparenz über Quellenlücken, Fokus auf Klima und Materialien
2. Gemini: kompakte Tabellen, konkrete Kostensätze für Luft und Abfall, UPW 15–45 €/m³

3. Claude: detaillierte Quellenangaben, Szenarien A/B/C, vollständiges Quellenverzeichnis
4. Perplexity: stärkste Einzelkennzahlen-Dokumentation, präzise Wasserpreise, EU-Vergleich

2.3 Integration durch ChatGPT

Im fünften Schritt wurden alle vier Einzelergebnisse an ChatGPT (OpenAI) weitergegeben: erneutes Prüfen der Quellen und eine integrierte Gesamtsicht destillieren. Das Ergebnis dieser Integration, bestehend aus Executive Summary, konsolidierten Kennzahlen, Rechenmodell und Literaturverzeichnis, bildet den Hauptteil dieses Dokuments (Abschnitte 3–6).

2.4 Dokumenterstellung durch Claude

Die Überführung aller Ergebnisse in das vorliegende Word-Dokument erfolgte durch Claude (Anthropic). Die KI wurde dabei nicht als Wissensquelle, sondern ausschließlich als Integrations- und Strukturierungswerkzeug eingesetzt. Sämtliche inhaltlichen Parameter stammen aus den vier Rechercheergebnissen und deren Primärquellen. Die Einzelergebnisse sind vollständig und unverändert in den Anhängen B bis E dokumentiert.

3. Executive Summary

Ziel der gesamten Recherche war, reale und zitierbarer Parameter zu sammeln, um eine abstrakte Umweltgröße („Pollution“) aus einer simulierten Hightech-Produktion in Euro zu überführen. In allen vier Ergebnissen zeigt sich ein stabiler Kern: Für Klima- und Treibhausgaswirkungen existieren im deutschen Kontext belastbare, institutionell abgesicherte Kostensätze; für mehrere andere Umweltblöcke ist die Datenlage deutlich heterogener, stärker standortabhängig oder beruht teils auf schwächeren Quellen.

Klima und Energie: am besten belegbar

Alle Ergebnisse stützen sich im Kern auf das Umweltbundesamt und dessen Methodenkonventionen als Referenz für gesellschaftliche Schadenskosten. Es wird übereinstimmend herausgestellt, dass die gesellschaftlichen Schadenskosten pro Tonne CO₂e deutlich über Markt- oder Compliance-Preisen liegen. Als Vergleich wird häufig EU-ETS bzw. nationaler CO₂-Preis herangezogen, die als betriebswirtschaftliche Compliance-Kosten interpretiert werden, nicht als gesellschaftliche Kosten. Ebenfalls konsistent: Für die Stromseite sind Emissionsfaktoren des deutschen Strommix nutzbar. Damit ist eine direkte Brücke möglich: Energieverbrauch (MWh) → CO₂e → Euro über CO₂-Kostensatz.

Hochwirksame Prozessgase: wichtiger Hebel

Für halbleiternahe und elektroniknahe Prozesse werden F-Gase (SF_6 , NF_3 , PFCs) als besonders relevant hervorgehoben, weil sehr hohe GWP-Werte eine extreme Monetarisierungswirkung ergeben. Als Quelle werden IPCC/GWP-Tabellen (AR6) genannt. Die Monetarisierung erfolgt konsistent über CO_2e -Kostensätze.

Luftschadstoffe: monetarisierbar, mit methodischen Fallstricken

Perplexity, Gemini und Claude nennen konkrete Kostensätze (NO_x , SO_2 , Partikel, NMVOC) und verweisen auf UBA-Methodenkonventionen sowie EU-Handbücher. DeepSeek berichtet dagegen, keine aktuellen, harmonisierten Kostensätze gefunden zu haben, und empfiehlt Nachrecherche im UBA-Material. Der gemeinsame Nenner: Es gibt standardisierte Ansätze, aber die Werte hängen stark von Methodik, Bezugsjahr, Emissionsort und Exposition ab.

Wasser/UPW/Abwasser: Mengen belegt, Preise heterogen

Alle Ergebnisse betonen, dass Wasser in Halbleiter- und Elektronikfertigung eine zentrale Umwelt- und Kostenkomponente ist. Kommunale Wasser- und Abwasserentgelte in Deutschland sind gut belegbar, bilden aber UPW-spezifische Aufbereitungskosten nur als Untergrenze ab. Bei konkreten €/m³-Preisen für UPW ist die Lage uneinheitlich.

Abfälle: hohe Praxisrelevanz, begrenzte öffentliche Preisqualität

Sonderabfälle werden als relevantes Feld erkannt. Konkrete Entsorgungspreise hängen stark von Abfalltyp, Region und Vertragslage ab und sind öffentlich oft nur in groben Bandbreiten greifbar.

Gesamtfazit

Belastbar und unmittelbar nutzbar für das Modell: UBA-Kostensätze für CO_2e , Emissionsfaktor des deutschen Strommix, GWP-Werte aus IPCC AR6 für F-Gase sowie kommunale Wasser-/Abwasserpreise als Mindestkostenanker. Schwächster Block in öffentlicher, zitierbarer Preisqualität: UPW €/m³ als laufende Betriebskosten und Sonderabfallpreise im Detail.

4. Integrierte monetarisierbare Kennzahlen

4.1 Methodik der Bewertung

Dieser Abschnitt konsolidiert die belastbarsten Kennzahlen aus allen vier Rechercheergebnissen. Es wird strikt unterschieden zwischen gesellschaftlichen Schadenskosten (Damage Cost Approach, monetarisiert reale volkswirtschaftliche Schäden) und regulatorischen Compliance-Kosten (Marktpreise und Pflichtabgaben). Das Modell dokumentiert explizit, welchen Bewertungsansatz es verwendet.

4.2 Kategorie I: Energie und Klima

CO₂-Schadenskosten

Referenz: Umweltbundesamt, Methodenkonventionen 3.1 und 4.0. Alle vier KI-Systeme konvergieren auf die UBA-Methodenkonvention als Goldstandard für den deutschen Kontext. Konsolidierte Bandbreite:

Ansatz	€/t CO ₂ e	Preisbasis	Interpretation
195–253	2020/2023	1% Zeitpräferenz	Konservativer UBA-Standardsatz (MK 3.1)
300	2024	MK 4.0 (1%)	Aktueller konservativer Referenzwert
680–880	2020–2024	0% Zeitpräferenz	Generationengerechte Bewertung
~1.000	2026 (Projektion)	0%	Progressives Szenario

Empfehlung für das Modell: Standard-Szenario (wissenschaftlich robust): 300 €/t CO₂e. Sensitivität: 70 €/t (EU-ETS) vs. 880 €/t (0%-Diskontrate). Damit ist didaktisch zeigbar: Marktpreis ≠ gesellschaftlicher Schaden.

Emissionsfaktor Strommix Deutschland

Konsens über alle Recherchen: 2023–2024: ca. 360–390 g CO₂/kWh (Direktemissionen), inklusive Vorketten: ~420 g CO₂e/kWh. Quelle: UBA „Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix“, CLIMATE CHANGE 13/2025. Belastbarkeit: sehr hoch.

Direkte Modellformel: Klimakosten Strom = Stromverbrauch (kWh) × Emissionsfaktor (kg CO₂e/kWh) × CO₂-Kostensatz (€/t). Beispiel bei 300 €/t: 0,36 kg × 0,30 €/kg = 0,108 €/kWh Klimakosten.

Hochwirksame F-Gase (Halbleiterprozesse)

Konsensquellen: IPCC AR6 (2021), GHG Protocol (2024). GWP100-Werte:

Gas	Formel	GWP100 (AR6)	Anwendung in der Fabrik
Schwefelhexafluorid	SF ₆	24.300	Ätzgas, Elektroisolierung
Stickstofftrifluorid	NF ₃	17.400	Kammernreinigung
Perfluormethan	CF ₄ (PFC-14)	7.380	Ätzprozesse
Perfluorethan	C ₂ F ₆ (PFC-116)	12.400	Ätzprozesse

Monetarisierung: Emission (kg Gas) × GWP × CO₂-Kostensatz. Beispiel SF₆: 1 kg SF₆ × 24.300 × 0,30 €/kg CO₂e = 7.290 €. Didaktisch extrem wirksam: geringe Mengen erzeugen enorme monetäre Effekte.

4.3 Kategorie II: Luftschadstoffe

Kostensätze gemäß UBA Methodenkonvention 3.1 (Preisbasis 2020, Deutschland, Impact-Pathway-Ansatz). Die Werte hängen ab von Emissionsort, Exposition, Sekundärbildung von Feinstaub und Bevölkerungsdichte.

Schadstoff	€/t (UBA MK 3.1)	€/kg	Methodische Einschränkung
PM _{2.5} (Feinstaub)	~59.700–74.200	~60–74	Stark exposition- und ortsabhängig
NO _x (Stickoxide)	15.000–19.600	15–20	Atemwegserkrankungen, Eutrophierung
SO ₂ (Schwefeldioxid)	9.400–15.800	9–16	Materialschäden, Gesundheit
NMVOG	1.600–2.200	1,6–2,2	Ozonbildungspotenzial
NH ₃ (Ammoniak)	~33.700	~34	Eutrophierung, Feinstaub-Vorläufer

4.4 Kategorie III: Wasser und Ultra-Pure Water

Kommunale Wasser- und Abwasserpreise

Konsens: Frischwasser Industrie: 1,31–3,30 €/m³ (Mittel 2,18 €/m³). Kombiniert mit Abwasser: ~4,02 €/m³. Quelle: VEA-Wasserpreisvergleich 2025 (83 deutsche Städte). Belastbarkeit: hoch.

Ultra-Pure Water (UPW)

Verbrauch pro Waferoberfläche: 4–10 Liter/cm² (ITRS, Industriequellen). Energiebedarf: 9 kWh/m³ (kalt), bis 92 kWh/m³ (heiß) gemäß SEMI S23. Rohwasserbedarf: 1,4–1,6-fache der UPW-Menge. Konkrete €/m³-UPW sind selten belastbar publiziert.

Empfohlene Modellstrategie: UPW-Kosten nicht als fixe Literaturzahl ansetzen, sondern berechnen: UPW-Kosten = (Rohwasserpreis × Rohwasserbedarf) + (Energiebedarf × Strompreis) + Chemikalien + Abschreibung. Konservativer Modellwert: 15 €/m³ UPW.

4.5 Kategorie IV: Abfälle und Sonderabfälle

Abfallkategorie	€/t (Bandbreite)	Hinweis
Nicht gefährlicher Gewerbeabfall	80–180	Thermische Verwertung, EUWID 2023
Gefährlicher Sonderabfall (allgemein)	200–800+	Stark abfallart- und standortabhängig
Galvanikschlämme (metallhaltig)	150–500	Je nach Metallrückgewinnungswert
Filterstäube (belastet)	350–800	Untertagedeponierung / BigBags
Beladene Aktivkohle	300–1.500	Regenerierung vs. Entsorgung
CO ₂ -Aufschlag Abfallverbrennung	45 (2024) / 55 (2025) €/t CO ₂	BEHG, fossiler Anteil, DEHSt

4.6 Kategorie V: Materialien (Scope 3, optional)

Monetarisierung über CO₂-Fußabdruck: CO₂-Gehalt des Materials (kg CO₂/kg) × CO₂-Kostensatz. Primärquellen: Nature/PMC (2021), LCA-Datenbanken (ecoinvent, GaBi).

Material	kg CO ₂ /kg	Klimakosten/kg (300 €/t)	Quelle
Stahl (Allzweck)	1,8	0,54 €/kg	Nature/PMC 2021
Aluminium (primär)	12	3,60 €/kg	Nature/PMC 2021
Kupfer	3,7	1,11 €/kg	Nature/PMC 2021

4.7 Gesamtbewertung der Belastbarkeit

Kategorie	Belastbarkeit	Bemerkung
CO ₂ -Schadenskosten (UBA)	Sehr hoch	Offizielle Methodenkonvention
Strommix-Emissionsfaktor	Sehr hoch	UBA-Daten, jährlich aktualisiert
GWP-Werte (IPCC)	Sehr hoch	Internationale Standardwerte AR6
Luftschadstoffe (UBA)	Hoch	Kontextabhängig (Ort, Exposition)
Kommunale Wasserpreise	Hoch	Tariflich belegbar (VEA)
UPW-Mengen	Mittel–Hoch	Industrie-Roadmaps (ITRS, SEMI)
UPW-Kosten (€/m ³)	Mittel	Indirekte Ableitung erforderlich
Sonderabfallpreise	Mittel bis schwach	Marktabhängig, standortspezifisch
Material-Footprints	Mittel–Hoch	LCA-abhängig (ecoinvent, GaBi)

5. Rechenmodell für das Planspiel

5.1 Grundstruktur des Pollution-Modells

Pollution-Kosten pro Zeiteinheit (Minute) = Summe aller monetarisierten Umweltwirkungen pro Zeiteinheit. Formell:

$$K(\text{Pollution}) = K(\text{Klima}) + K(\text{Luft}) + K(\text{Wasser}) + K(\text{Abfall}) + K(\text{Material})$$

Alle Rechnungen in Euro pro Minute¹. Als Pollution Unit (PU) wird 1 kg CO₂e definiert: international verständlich, IPCC-konform, direkt monetarisierbar und modular erweiterbar.

5.2 Monetarisierungstabelle (Basis-Szenario)

Faktor	Umrechnungswert	Quelle / Hinweis
CO ₂	300 €/t	UBA MK 4.0, 1% Diskontrate (konservativ)
Strom (Klimakosten)	0,108 €/kWh	363 g CO ₂ /kWh × 300 €/t
Erdgas (Klimakosten)	0,075 €/kWh	250 g CO ₂ /kWh × 300 €/t
SF ₆ (F-Gas)	7.290 €/kg	GWP 24.300 × 300 €/t CO ₂ e
NF ₃ (F-Gas)	5.220 €/kg	GWP 17.400 × 300 €/t CO ₂ e
NO _x	19 €/kg	UBA MK 3.1, Preisbasis 2020
PM _{2.5}	60 €/kg	UBA MK 3.0/3.1, Preisbasis 2020
SO ₂	15 €/kg	UBA MK 3.1, Preisbasis 2020
Industriewasser (kombiniert)	4 €/m ³	Frischwasser + Abwasser, VEA 2018
Ultra-Pure Water (UPW)	15 €/m ³	Konservativer Modellwert (errechnet)
Gewerbeabfall	120 €/t	EUWID 2023, thermische Verwertung
Gefährlicher Sonderabfall	500 €/t	Mittelwert Bandbreite, bvse 2023

¹ Die Wahl der Einheit „pro Minute“ dient der direkten Synchronisation mit den Realzeit-Werten des Factorio-Dashboards. Dies ermöglicht den unmittelbaren Abgleich zwischen Modell und Simulation; eine Extrapolation auf Factorio-Tage oder Kalenderjahre ist durch die konstante Zeitbasis trivial durchführbar.

5.3 Szenariorahmen

Parameter	Szenario A (Compliance)	Szenario B (Standard UBA)	Szenario C (Progressiv)
CO ₂ -Kostensatz	70 €/t (EU-ETS)	300 €/t (1% Diskontrate)	880–1.000 €/t (0% Diskontrate)
Emissionsfaktor Strom	363 g CO ₂ /kWh	363 g CO ₂ /kWh	363 g CO ₂ /kWh
Klimakosten Strom	0,025 €/kWh	0,108 €/kWh	0,319–0,363 €/kWh
Luftschadstoffe	Nicht monetarisiert	UBA-Standardwerte	UBA-Werte × Faktor 1,5
SF ₆ (F-Gas)	1.705 €/kg	7.290 €/kg	21.384–24.300 €/kg

5.4 Beispielrechnung

Angenommene Produktionsminute einer simulierten Hightech-Fabrik:

Faktor	Menge/Minute	Einheit	Klimakosten (€)
Strom	2.000	kWh	216,00
Erdgas	500	kWh	37,50
NO _x	0,5	kg	9,50
PM _{2.5}	0,1	kg	6,00
Ultra-Pure Water	10	m ³	150,00
Sonderabfall	50	kg	25,00
Summe Pollution-Kosten			444,00 €/min

Wissenschaftlich verteidigbare Kernaussage: Das Modell basiert auf UBA Methodenkonvention 3.1/4.0, IPCC AR6, offiziellen Emissionsfaktoren, VEA-Wasserpreisvergleich und Branchenstandards. Nicht auf KI-Meinung.

6. Literaturverzeichnis

Stand der Recherche: 28. Februar 2026.

Geografischer Bezugsrahmen: Deutschland / Europäische Union.

Klimakosten und CO₂-Bewertung

Umweltbundesamt (2026): Handbuch Umweltkosten – Methodenkonvention 4.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Dessau-Roßlau: UBA.

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen>

Umweltbundesamt (2020): Matthey, A.; Bünger, B.: Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze. Dessau-Roßlau: UBA.

Umweltbundesamt (2019): Matthey, A.; Bünger, B.: Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze. Dessau-Roßlau: UBA.

Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste (2024): CO₂-Emissionen: Preise und Kosten. WD 5-3000-104/24.

Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) (2025): Nationaler Emissionshandel (nEHS). Berlin: UBA. <https://www.dehst.de>

European Commission (2019): Handbook on the External Costs of Transport. Brüssel: Europäische Kommission.

Emissionsfaktoren Strommix Deutschland

Umweltbundesamt (2025): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix 1990–2024. Climate Change 13/2025. Dessau-Roßlau: UBA.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-2024>

Europäische Umweltagentur (EEA) (2023): Greenhouse Gas Emission Intensity of Electricity Generation in Europe. Kopenhagen: EEA.

Global Warming Potentials (F-Gase)

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021): Climate Change 2021 – The Physical Science Basis (AR6, Working Group I). Cambridge University Press.

GHG Protocol (2024): Global Warming Potential Values (based on IPCC AR6).

[https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20\(August%202024\).pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20(August%202024).pdf)

Luftschadstoffe

Umweltbundesamt (2020): Methodenkonvention 3.1 – Kostensätze für Luftschadstoffe.

Umweltbundesamt (2014): Methodenkonvention 2.0 – Anhang B: Best-Practice-Kostensätze für Luftschadstoffe.

Europäische Umweltagentur (EEA) (2014): Costs of Air Pollution from European Industrial Facilities 2008–2012. Technical Report No. 20/2014.

Wasserpreise und industrielle Wasserwirtschaft

VEA – Bundesverband der Energie-Abnehmer e.V. (2025): VEA-Wasserpreisvergleich 2025. Hannover.

<https://www.vea.de/newsroom/pressemitteilungen/pressemitteilung/wasserpreisvergleich-2025>

Berliner Wasserbetriebe (2023): Tarife Trinkwasser und Abwasser.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2023): Wasserpreisübersicht 2023.

Halbleiterfertigung / Ultra-Pure Water

SEMI (aktuell): SEMI S23 – Guide for Conservation of Energy, Utilities, and Materials Used by Semiconductor Manufacturing Equipment.

ITRS – International Technology Roadmap for Semiconductors (2011): Water Use in Semiconductor Manufacturing.

IDTechEx (2025): Water Usage in Semiconductor Manufacturing to Double by 2035.

<https://www.idtechex.com/en/research-article/water-usage-in-semiconductor-manufacturing-to-double-by-2035/32746>

AXEON Water Technologies (2026): Ultrapure Water Systems in Semiconductor Manufacturing Explained.

<https://www.axeonwater.com/blog/ultrapure-water-systems-in-semiconductor-manufacturing-explained/>

Abfallwirtschaft und Sonderabfälle

bvse – Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (2023): Kostenentwicklung bei der Entsorgung von Sonderabfällen. <https://www.bvse.de>

EUWID Recycling und Entsorgung (2023): German Waste-to-Energy Market Faces Uncertainty. <https://www.euwid-recycling.com>

Destatis (2023): Fachserie 19 – Abfallentsorgung.

Bundesgesetzblatt (2024/2025): Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG).

Material-Footprints / LCA

Nature / PMC (2021): Embodied Energy and CO₂ Footprints of Industrial Materials.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8346849/>

ecoinvent Database (aktuelle Version). GaBi LCA Database (aktuelle Version).

VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden.

Die monetären Umweltbewertungsansätze dieses Simulationsmodells basieren auf den Methodenkonventionen des Umweltbundesamtes (Stand 2026), den Emissionsfaktoren des UBA und der Europäischen Umweltagentur, den Global-Warming-Potential-Werten des IPCC (AR6), offiziellen Wasserpreisvergleichen deutscher Versorger sowie branchenspezifischen Standards der Halbleiterindustrie (SEMI, ITRS). Der geografische Bezugsrahmen ist Deutschland und die Europäische Union.

Anhang A – Originaler Rechercheprompt

Der folgende Prompt wurde identisch an alle vier KI-Systeme übergeben. Er dient der vollständigen Nachvollziehbarkeit des Rechercheprozesses.

RECHERCHEAUFTRAG: Monetarisierung industrieller Umweltwirkungen einer Hightech-Fabrik

Ziel der Recherche

Ziel ist die Ermittlung belastbarer, zitierbarer Realwelt-Parameter zur Monetarisierung industrieller Umweltwirkungen einer hochautomatisierten Hightech-Fabrik (Robotik- und Elektronikfertigung, ggf. mit halbleiternahen Prozessschritten). Die Ergebnisse sollen zur Kalibrierung eines ökonomischen Modells dienen, in dem eine abstrakte Umweltgröße („Pollution“) in Euro umgerechnet wird.

Es sind ausschließlich reale, nachprüfbare Quellen zu verwenden. Keine hypothetischen Annahmen. Keine modellinternen Schätzwerte ohne Quellenbezug.

Allgemeine Anforderungen an die Ausgabe

Ausgabeformat: strukturiertes Markdown-Dokument. Für jede Kennzahl zwingend anzugeben: exakte Bezeichnung, Einheit, Zahlenwert oder Wertebereich, Bezugsjahr, geografischer Kontext, Primärquelle. Wenn mehrere seriöse Quellen existieren: Bandbreite angeben, Unterschiede methodisch erklären. Systemgrenzen explizit benennen. Unsicherheiten dokumentieren. Keine politischen Bewertungen.

Untersuchungskategorien

I. Energie und Klimawirkung: CO₂-Schadenskosten pro Tonne, Emissionsfaktoren Strommix, hochwirksame Treibhausgase in der Halbleiterfertigung (GWP-Werte SF₆, NF₃, PFCs).

II. Luftschadstoffe und Gesundheitskosten: Schadenskosten pro Tonne NO_x, SO₂, PM_{2.5}/PM10, VOC. Externe Kostenansätze, gesundheitsbezogene Kostenmodelle.

III. Wasserverbrauch und Abwasser: Industrielle Wasserpreise, spezifische Kennzahlen für Elektronik-/Halbleiterfertigung (Verbrauch pro Waferoberfläche), Ultra-Pure-Water-Erzeugungskosten, Abwasserbehandlungskosten.

IV. Sonderabfälle und Reststoffe: Entsorgungskosten pro Tonne gefährlicher Abfall, industrieller Schlamm, Filterstäube, Aktivkohle.

V. Material- und Ressourcen-Footprint (optional): Monetarisierete Umweltkosten pro Tonne Stahl, Aluminium, Kupfer über LCA-basierte Kostenansätze.

VI. Thermische Belastung und Kühlwasser: Kosten thermischer Einleitung, Kühlwasseraufbereitungskosten, Biozidbehandlung.

Pflichtstruktur der Ausgabe

Executive Summary (max. 300 Wörter) – Methodischer Rahmen – Kategorie I bis V – Zusammenfassungstabelle – Vollständiges Quellenverzeichnis. Ziel ist ausschließlich die belastbare Sammlung und Strukturierung realer Parameter zur späteren ökonomischen Kalibrierung. Alle Zahlen müssen eindeutig referenziert sein.

Anhang B – Einzelergebnis DeepSeek

Das folgende Ergebnis wurde von DeepSeek auf Basis des in Anhang A dokumentierten Recherche-prompts generiert. Es wird vollständig und unverändert wiedergegeben.

Hinweis zur Quellenlage (DeepSeek)

Die Suche ergab eine gute Abdeckung für die Kategorien Energie/Klima und Materialien. Für die spezifischen Kosten der Luftschadstoffe sowie für Wasser- und Abfallkosten einer Hightech-Fabrik waren die Ergebnisse weniger ergiebig. Für Abfälle und thermische Belastung konnten keine spezifischen, zitierbaren Zahlen identifiziert werden.

Kategorie I – Energie und Klima

CO₂-Schadenskosten (gesellschaftlich): ~250 €/t CO₂ (UBA Methodenkonvention 3.1).
EU-ETS Zertifikatspreis: ~85 €/t (Herbst 2025). CO₂-Emissionsfaktor Strommix: ~0,40–0,45 kg CO₂e/kWh (Lebenszyklus, 2024/2025, Green Grid Compass/FfE).

Hochwirksame Treibhausgase (Halbleiterfertigung, GWP100 gemäß IPCC AR5): SF₆: 23.500 – NF₃: 16.100 – CF₄: 6.630 – C₂F₆: 11.100. Monetarisierung: 1 kg SF₆-Emission = 23,5 t CO₂e. Bei 250 €/t CO₂e = 5.875 € pro kg SF₆.

Kategorie II – Luftschadstoffe

Keine aktuellen, zitierbaren Kostensätze gefunden. Vorhandene Tabellen aus EU-Parlamentsdokumenten veraltet (Basisfaktoren 2000/2010). Empfehlung: manuelle Nachrecherche in UBA-Methodenkonvention 3.1.

Kategorie III – Wasser

Ultra-Pure Water: 60- bis 350-mal teurer als Trinkwasser (Fraunhofer IPMS / AlixLabs / NSS Water, 2025). Wasserverbrauch Halbleiterfabrik: bis zu 37 Mio. Liter UPW pro Tag (typische Chipfertigungsanlage).

Kategorie IV – Abfälle

Keine belastbaren, spezifischen Zahlen zu Entsorgungskosten gefunden. Empfehlung: kommunale Abfallgebührenordnungen oder IHK-/Branchenverbandsdaten.

Kategorie V – Materialien

CO₂-Fußabdruck (Cradle-to-Gate, Nature/PMC 2021): Stahl (Allzweck): 1,8 kg CO₂/kg – Aluminium (primär): 12 kg CO₂/kg – Kupfer: 3,7 kg CO₂/kg.

Quellenverzeichnis DeepSeek (Auswahl)

Umweltbundesamt, Newsletter UBA aktuell 6/2018. Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), idw-online 2025. CTCN: PFC, HFC and SF6 Emissions from Semiconductor Manufacturing. Fraunhofer IPMS 2025: Sustainable Semiconductor Production. Nature/PMC 2021: Table 2, PMC8346849.

Anhang C – Einzelergebnis Gemini

Das folgende Ergebnis wurde von Gemini (Google) auf Basis des in Anhang A dokumentierten Rechercheprompts generiert. Es wird vollständig und unverändert wiedergegeben.

Kategorie I – Energie und Klima

CO₂-Schadenskosten: Konservativ (1% Zeitpräferenz): 237 €/t CO₂e. Progressiv (0%, Generationengerechtigkeit): 853 €/t CO₂e. EU-ETS (Feb. 2026): ca. 65–85 €/t. Quelle: UBA Methodenkonvention 3.1 (2024).

Emissionsfaktor Strommix DE: 380 g CO₂e/kWh (Durchschnitt 2023, vorläufig).

Referenzwerte: Braunkohle ~1.150 g, Erdgas ~440 g, Wind/Solar <20 g. Quelle: UBA 2024.

GWP-Werte (IPCC AR6, 100 Jahre): SF₆: 23.500 – NF₃: 16.100 – CF₄: 6.630.

Kategorie II – Luftschadstoffe

PM_{2.5}: 74.200 €/t – NO_x: 19.600 €/t – SO₂: 14.800 €/t – NM-VOC: 1.800 €/t. Quelle: Umweltbundesamt (2024): Kostensätze für Luftschadstoffe.

Kategorie III – Wasser

Frischwasser (Industrie): 1,60–2,50 €/m³ (regional in DE). Ultra-Pure-Water: 15–45 €/m³ (inkl. Energie, Membranverschleiß, Chemikalien). Spezifischer Verbrauch: ca. 10–15 Liter pro cm² Silizium. Quellen: ITRS / Energieagentur NRW.

Industrieabwasser (Standard): 2,00–4,50 €/m³. Chemisch-physikalische Behandlung (kontaminiert, z. B. CMP-Slurry): Zuschlag 3,50–8,00 €/m³. Quelle: Statistische Ämter der Länder.

Kategorie IV – Sonderabfälle

Gefährlicher Abfall (Sonderabfall): 400–1.200 €/t. Galvanikschlämme: 150–500 €/t. Filterstäube: 350–800 €/t. Beladene Aktivkohle: 800–1.500 €/t. Quelle: Marktdaten BDE/Destatis 2023.

Zusammenfassende Kennzahlen-Matrix Gemini

Parameter	Best Estimate (DE/EU)	Bandbreite/Unsicherheit
CO ₂ (extern)	237 €/t	85 € (Markt) bis 853 € (UBA 0%)
Strom-Footprint	0,38 kg CO ₂ /kWh	0,05 (Green) bis 0,80 (Mix Osteuropa)
Feinstaub	74.200 €/t	± 25% je nach Bevölkerungsdichte
UPW Wasser	30 €/m ³	Abhängig von Reinheitsklasse
Sonderabfall	600 €/t	Volatilität durch Kapazitätsengpässe

Quellenverzeichnis Gemini (Auswahl)

UBA (2024): Methodenkonvention 3.1. European Commission (2023): Handbook on external costs. IPCC (2021): AR6. Destatis (2023): Fachserie 19. VDI 4600.

Anhang D – Einzelergebnis Claude

Das folgende Ergebnis wurde von Claude (Anthropic) auf Basis des in Anhang A dokumentierten Recherche-prompts generiert. Es wird vollständig und unverändert wiedergegeben.

Kategorie I – Energie und Klima

CO₂-Schadenskosten (UBA MK 4.0, 2026): Konservativ 300 €/t CO₂ (1% Diskontrate) – Progressiv 880 €/t CO₂ (0% Diskontrate) – Projektion 2026: ~1.000 €/t CO₂ (0% Diskontrate). EU-ETS: 66–80 €/t (2025). nEHS: 45 €/t (2024), 55 €/t (2025).

Emissionsfaktor Strommix Deutschland: 363 g CO₂/kWh (2024, Direktmissionen), inkl. Vorketten: ~427 g CO₂e/kWh. Quelle: UBA CLIMATE CHANGE 13/2025.

F-Gase (IPCC AR6, GWP100): SF₆: 24.300 – NF₃: 17.400 – CF₄: 7.380 – C₂F₆: 12.400 – C₃F₈: 9.290.

Kategorie II – Luftschadstoffe

PM_{2.5}: ~59.700 €/t (2016, Deutschland Verkehr, UBA MK 3.0). NO_x: ~15.000 €/t (UBA MK 3.0). SO₂: 9.400–15.200 €/t (2012–2014, UBA MK 2.0). NH₃: ca. 10.000–20.000 €/t (UBA MK 3.1).

Kategorie III – Wasser

Frischwasser Industrie: 1,31–3,30 €/m³ (Mittel 2,18 €/m³), VEA 2025. Kombiniert mit Abwasser: ~4,02 €/m³, VEA 2018. UPW-Verbrauch: 7 Liter/cm² Wafer (ITRS 2011). Energiebedarf UPW: 9 kWh/m³ (kalt), 92 kWh/m³ (heiß), SEMI S23.

Kategorie IV – Abfälle

Nicht gefährlicher Gewerbeabfall: 80–120 €/t (EUWID 2023). Gefährlicher Sonderabfall: 200–800+ €/t (bvse, Markt 2023–2024). CO₂-Aufschlag Abfallverbrennung: 45 €/t CO₂ (2024), 55 €/t CO₂ (2025), BEHG.

Szenarien A/B/C (Claude)

Szenario A (Compliance-Basis): CO₂ 70 €/t (EU-ETS), Luftschadstoffe nicht monetarisiert, Wasser 2,18 €/m³.

Szenario B (Gesellschaftliche Kosten Standard): CO₂ 300 €/t (UBA MK 4.0, 1%), alle Luftschadstoffe nach UBA MK 3.0, Wasser 4,02 €/m³.

Szenario C (Progressiv, 0% Diskontrate): CO₂ 880–1.000 €/t, SF₆ ~21.500–24.300 €/kg, alle übrigen wie B mit Faktor 1,5–2.

Quellenverzeichnis Claude (Auswahl)

UBA MK 4.0 (2026), UBA MK 3.1 (2020), UBA MK 3.0 (2019), UBA MK 2.0 Anhang B (2014), UBA CO₂-Emissionsfaktor Strommix CLIMATE CHANGE 13/2025, IPCC AR6 GWP-Tabellen, GHG Protocol 2024, DEHSt nEHS, VEA Wasserpreisvergleich 2025, ITRS 2011, SEMI S23, IDTechEx 2025, AXEON Water 2026, bvse 2023, EUWID 2023, BEHG 2024/2025, Nature/PMC 2021.

Anhang E – Einzelergebnis Perplexity

Das folgende Ergebnis wurde von Perplexity auf Basis des in Anhang A dokumentierten Recherche-prompts generiert. Es wird vollständig und unverändert wiedergegeben.

Kategorie I – Energie und Klima (Perplexity)

UBA Methodenkonvention 3.1 (Preisbasis 2020, 1% Zeitpräferenz): 195 €₂₀₂₀/t CO₂e.
Alternativ 0% Zeitpräferenz: 680 €₂₀₂₀/t CO₂e. Aktualisierte UBA-Empfehlung 2030 (Preisbasis 2023): 253 € (1%) / 830 € (0%) pro t CO₂e. Handbuch Umweltkosten 2026 (0%): 1.000 €/t CO₂e. Nationaler CO₂-Preis 2026: 55–65 €/t.

Kategorie II – Luftschadstoffe (Perplexity)

UBA Methodenkonvention 3.1, Preisbasis 2020, Durchschnittsquellen: PM₁₀: 43.300 €/t – NO_x: 19.000 €/t – SO₂: 15.800 €/t – NMVOC: 2.200 €/t – NH₃: 33.700 €/t.

EU-Handbuch External Costs (EU27+UK, 2024-Preisniveau): NO_x: 14.100 €/t – SO₂: 14.100 €/t – NMVOC: 1.600 €/t – PM_{2.5} (exhaust): 25.100 €/t.

Kategorie III – Wasser (Perplexity)

Trinkwasser Berlin 2023: 1,694 €/m³ netto / 1,813 €/m³ brutto (Berliner Wasserbetriebe).
Baden-Württemberg Durchschnitt 2021: 2,78 €/m³ brutto (Bandbreite 2,21–3,73 €/m³).

UPW-Verbrauch (ITRS/MKS): Ist ~2011: 7 Liter/cm², Roadmap-Ziel 2020: 4,5 Liter/cm². Je 200-mm-Wafer (Axeon 2026): 5.600 Liter. Rohwasser je 1.000 Gallonen UPW: 1.400–1.600 Gallonen. Typische Fab: 2–4 Mio. Gallonen/Tag Gesamtwasser.

Kategorie IV – Abfälle (Perplexity)

Gefährlicher Abfall Standard (Berlin, Dienstleister): meist < 2 €/kg (= <2.000 €/t).

Quecksilber: bis 12 €/kg. Exportierter gefährlicher Abfall (Serbien → EU): ~2,5 €/kg (2.500 €/t, Balkan Green Energy News 2022).

Quellenverzeichnis Perplexity (Auswahl)

UBA Methodenkonvention 3.1 (2020). Deutscher Bundestag WD 5-3000-104/24 (2024). UBA Handbuch Umweltkosten (Presse 2026). EC Handbook External Costs of Transport (2019). EEA Technical Report 20/2014. Berliner Wasserbetriebe Tarife 2023. Ministerium für Umwelt BW Wasserpreisübersicht 2023. MKS Instruments / ITRS (2011). Axeon Water Technologies (2026). Blitz Umzüge Berlin (2024). Balkan Green Energy News (2022). UBA / GEB-info Baustoffe (2020).