

iit-kompakt 14 ■ Jochen Kerbusch, Jasper David Petschat, Michael Müller

## Warum es manchmal doch auf die Größe ankommt

### Chipfabriken und die Frage nach der Nachhaltigkeit

Das Ansiedeln von Chipfabriken („Fabs“ genannt) in Deutschland wird weiterhin breit diskutiert. Im Fokus stehen dabei neben Fragen nach Sinnhaftigkeit und Wirkung der hohen Fördersummen vor allem Fragen bezüglich der Umweltverträglichkeit solcher Fabs, insbesondere deren Energie- und Wasserverbrauch. Dieser hohe Bedarf an Ressourcen wirft angesichts der steigenden Förderintensität in der Branche die Frage nach der Vereinbarkeit von Fabs mit den deutschen und europäischen Nachhaltigkeitszielen auf.

Das Hauptargument für die Fabs im Kontext der Nachhaltigkeit: Man erwartet ein erhebliches Einsparpotenzial beim Energieverbrauch in nahezu allen Bereichen im Zuge der Digitalisierung. Aber auch die Digitalisierung basiert darauf, dass Daten aufgenommen, übertragen und verarbeitet werden, damit daraus verwertbare Informationen entstehen – was Elektroniksysteme erfordert, die produziert werden müssen und dabei Ressourcen und Energie verbrauchen. Es muss also im Zuge der Ansiedlung von Fabs beides – mögliche Einsparungen durch die Digitalisierung einerseits und Ressourcenaufwand andererseits – gegeneinander abgewogen werden.

### Ökobilanzierung – eine große Herausforderung

„Ökobilanzierung“ bezeichnet das systematische Erfassen, Untersuchen und Bewerten von Einflüssen durch umweltrelevante Vorgänge.<sup>1</sup> Dies ist komplex: Es müssen zahlreiche Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen betrachtet und dem Nutzen der Elektronik im Hinblick auf Energieeinsparpotenziale gegenübergestellt werden. Die hohe Komplexität sowohl der Lieferketten, der Ausgangsstoffe, der Fertigungsprozesse als auch die hohe Heterogenität der Produkte in der Elektronik erschweren dies deutlich, ebenso wie häufig nur eingeschränkt verfügbare Daten. Sehr stark vereinfacht lassen sich die wesentlichen Umwelteinflüsse auf vier Punkte reduzieren (siehe Abbildung 1): 1. den Ausstoß von klimaschädlichen Gasen, 2. den Energiebedarf, 3. den Wasserbedarf, und 4. die Entsorgung von Produktionsabfällen auf Deponien.

### Faktor 1: Emission von klimaschädlichen Gasen

Nicht nur CO<sub>2</sub>, sondern auch viele andere Gase tragen mehr oder weniger stark zum Klimawandel bei. Um eine allgemeine Vergleichbarkeit herzustellen, wird deren klimaschädlicher Einfluss umgerechnet in sogenannte CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

Um die Emissionen der Chipfabriken in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten korrekt zu bilanzieren, müssen zahlreiche Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Dazu liegen jedoch nur unvollständige Daten vor. Eine wesentliche Rolle spielen diejenigen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Strombedarf der Chipfabriken bedingt sind. Dieser setzt sich einerseits aus dem Bedarf für die Produktionsanlagen und andererseits aus dem Bedarf für das Betreiben der Infrastruktur wie beispielsweise Reinräumen zusammen (s. Faktor 2). Außerdem stoßen Chipfabriken in einem erheblichen Maß klimaschädliche Gase aus, insbesondere per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS). Sie kommen nicht nur in einigen wichtigen Materialien der Chipfertigung vor, sondern werden darüber hinaus als Prozessgase eingesetzt. Obwohl die Abgase umfangreich gereinigt werden, entweicht ein Anteil in die Umwelt. Auch wenn dies nur sehr geringe Mengen sind, multipliziert sich ihre Wirkung über ihre extrem hohen Treibhausgaspotenziale (Englisch: Global Warming Potential, GWP)<sup>2</sup>. So hat beispielsweise das in Ätzprozessen oft verwendete Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) ein GWP von rund 23.000. Andere Prozessgase liegen im Bereich von einigen hundert bis tausend. Weiterhin gehören PFAS zu den sogenannten Ewigkeitschemikalien, sie verbleiben also über

Umwelteinflüsse einer Chipfabrik, stark vereinfacht: Ausstoß von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, Energie- und Wasserbedarf sowie Produktionsabfälle

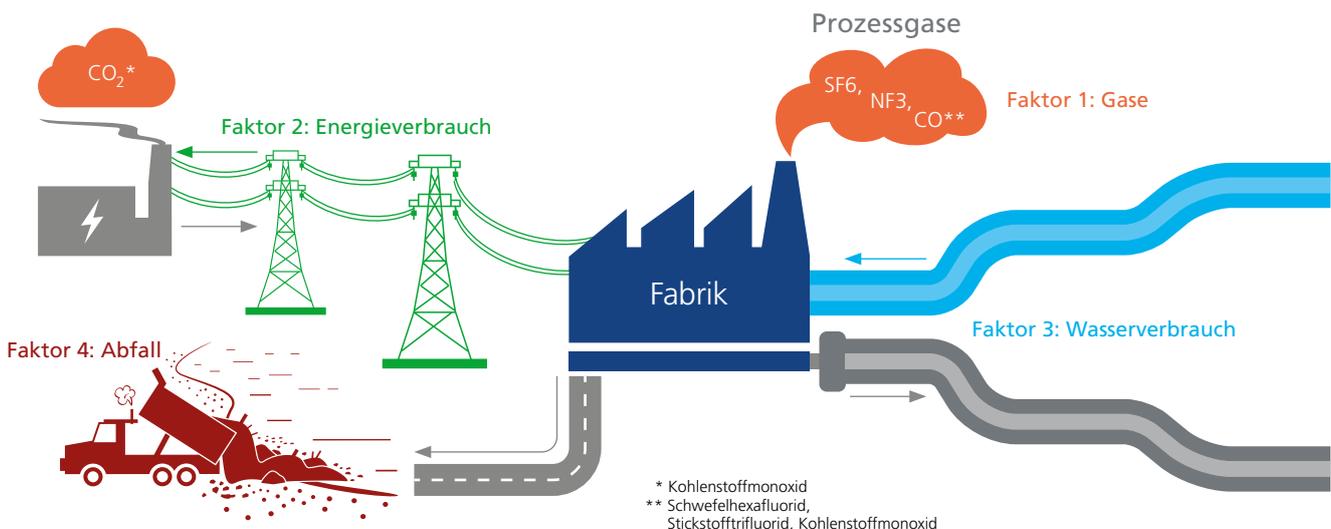


Abbildung 1: Umwelteinflüsse einer Chipfabrik, stark vereinfacht: Ausstoß von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, Energie- und Wasserbedarf sowie Produktionsabfälle

1 Die Grundsätze und Regeln hierfür sind in ISO-Standards bzw. in den deutschen Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 festgelegt.  
 2 Das Treibhausgaspotenzial oder GWP (Englisch: Global Warming Potential) gibt an, wie viele Tonnen CO<sub>2</sub> einer Tonne des entsprechenden Gases entsprechen und ist ein Maß für die Klimaschädlichkeit von Gasen. Dabei werden auch die unterschiedlichen Verweilzeiten der Gase in der Atmosphäre berücksichtigt. Je höher der Wert, desto schädlicher ist das Gas.

tausende von Jahren stabil in der Umwelt und bauen sich nicht ab. Auch die Abgasreinigung selbst ist eine Quelle für CO<sub>2</sub>-Emissionen, denn sie basiert typischerweise auf der Veraschung der Reststoffe in einer extrem heißen Erdgasflamme. Die Verbrennung selbst erzeugt also ebenfalls Treibhausgase.

## Faktor 2: Großer Stromverbrauch für kleine Chips

Der größte Auftragsfertiger für Halbleiterchips TSMC hatte im Jahr 2021 einen Anteil von 14,4% an der weltweiten Fertigungskapazität und einen Energiebedarf von 18,1 Terawattstunden (TWh). Auf dieser Basis ließ sich der Energiebedarf für alle Chipfabriken im Jahr 2021 auf rund 126 TWh abschätzen. Das entspricht in etwa dem Jahresstrombedarf von Norwegen.

Mehrere Effekte bestimmen den direkten Stromverbrauch einer Chipfabrik. Die Komplexität des Fertigungsprozesses fällt am stärksten ins Gewicht, da sie die Anzahl der Prozessschritte bestimmt, die zur Herstellung eines Chips benötigt werden. Je nach Technologie können das mehr als 1.000 individuelle Prozessschritte sein. Mit der Anzahl steigt nicht nur der Strombedarf der Anlagen, sondern auch der Stromanteil, der für den Betrieb der Infrastruktur anfällt, weil sich die Chips länger in der Produktion befinden. Auch die Strukturgröße auf den Halbleiterchips – und damit der verwendete sogenannte Technologieknoten – hat Auswirkungen auf den Stromverbrauch der Produktionsanlagen. Es gilt: Je kleiner die Strukturgröße der Chips, desto leistungsstärker sind diese – aber gleichzeitig steigt der Stromverbrauch in der Herstellung. Bemerkenswert ist jedoch: Pro gefertigtem Transistor<sup>3</sup> sinkt der Strombedarf, da mehr von ihnen auf einem Chip untergebracht werden können.

Die Wahl der Fertigungstechnologie beeinflusst also den ökologischen Fußabdruck von Chips erheblich. Es gibt bereits Ansätze, diesen Fußabdruck zu verringern. Sie hatten zwar ursprünglich das Ziel der Skalierung, reduzieren aber gleichzeitig den Ausstoß von Emissionen. Das Konzept der sogenannten Chipllets – also winziger integrierter Schaltkreise – erwächst gerade den Kinderschuhen. Chipllets ermöglichen es die Leistungsfähigkeit der Teilkomponenten eines Chips und damit der Fertigungstechnologie bedarfsorientiert anzupassen. Andererseits kann durch alternative Ansätze wie beispielsweise FDSOI<sup>4</sup> der Energiebedarf in der Fertigung um bis zu 20% reduziert werden, wenn es nicht um das letzte Quäntchen Performance geht.

Ein weiterer Aspekt, der den Strombedarf beeinflusst, ist der Durchmesser der Halbleiterscheiben, aus denen Chips produziert werden (Wafer). Hier gilt: je größer der Wafer, desto mehr Chips können parallel darauf produziert werden. Dadurch sinkt der Stromverbrauch bei der Herstellung des einzelnen Chips. Allerdings ist es nicht möglich, den Waferdurchmesser beliebig zu vergrößern, da die Anlagen nur auf eine bestimmte Wafergröße ausgerichtet sind. Darüber hinaus gibt es technisch-ökonomische Gründe, die eine Auslegung der Maschinen auf größere als die aktuell typischen 300-mm-Wafer verhindern. Eine weitere Skalierung der Waferdurchmesser ist daher keine Option.

Als dritter Einflussfaktor auf den Stromverbrauch sollte die Größe der produzierenden Fab genannt werden. Je größer die Produktionsanlage, desto mehr Chips können produziert werden und je geringer ist der Energiebedarf pro individuellem Chip, denn mit wachsender Größe der Produktionslinie steigt die Anzahl der produzierten Chips schneller als der Energiebedarf für deren Herstellung. Bereits jetzt kosten neue Chipfabriken jedoch mehrere Milliarden Euro, sodass auch hier eine weitere Skalierung der Produktionskapazitäten schwierig ist. Weiterhin fließt der Energiebedarf für den Unterhalt der Anlagen in die Berechnung ein. Die Versorgungsinfrastruktur benötigt beispielsweise elektrische Energie, um die Temperatur stabil zu halten und Staub im Reinraum zu filtern. In einer Studie aus dem Jahr 2004<sup>5</sup> wurde das Verhältnis des Strombedarfes von Gebäudeinfrastruktur zu Produktionsanlagen auf 60:40 geschätzt. Aktuellere Zahlen liegen leider nicht vor. Doch es lässt sich abschätzen, dass auch hier Effizienzsteigerungen durch Größenskalierung nicht absehbar sind.

Viele der Unternehmen sind sich ihres hohen Stromverbrauches bewusst und versuchen zunehmend, ihn durch erneuerbare Energien zu bedienen. So plant beispielsweise Infineon und plante Intel für die Betreuung ihrer neuen Chipfabriken in Deutschland die ausschließliche Nutzung von erneuerbaren Energien. Es ist jedoch zumindest in der Anfangsphase nicht sicher, ob genügend Strom aus erneuerbaren Energiequellen zur Verfügung steht, um den Bedarf der Chipfabriken zu stillen. Zumindest für die Fabriken von Intel in Magdeburg wurde davon ausgegangen, dass die Kapazitäten erneuerbarer Energien dafür zunächst nicht ausreichen werden. Auch ist Strom aus erneuerbaren Energien nicht zu jeder Uhrzeit verfügbar. Während

<sup>3</sup> Das Grundbauelement eines Chips ist der Transistor. Typische aktuelle Prozessoren (CPU) bestehen aus ca. fünf Milliarden Transistoren.

<sup>4</sup> „Fully Depleted Silicon on Insulator“: eine Fertigungstechnologie, die einerseits in der Produktion sehr effizient ist und andererseits einen sehr guten Kompromiss aus Leistungsfähigkeit und anpassbarem Energiebedarf darstellt.

<sup>5</sup> Plepys, A. (2004). Environmental Implications of Product Servicing. The Case of Outsourced Computing Utilities. Lund University

Chipfabriken rund um die Uhr Chips produzieren, liefern Wind- und Solaranlagen nur unter den entsprechenden Wetterbedingungen genügend Strom für die Produktion. Ein nicht unerheblicher Anteil des Strombedarfs muss also aus anderen Energiequellen bereitgestellt werden.

**Faktor 3: Wasser – Verbrauch senken und Abwasser aufbereiten**

In den vergangenen Jahren gab es vermehrt extrem trockene Sommer oder Klimaveränderungen, die zu weniger Niederschlag führten. Nicht nur in Asien, sondern auch in Deutschland bedroht das die Chipfertigung, denn der Wasserbedarf für die Chipfertigung ist extrem hoch – einerseits für die Kühlung der vielen Anlagen und andererseits für zahlreiche Reinigungs- und Polierprozesse.

Für das Unternehmen TSMC sind knappe Wasservorräte ein existenzielles Problem: In den vergangenen Jahren musste teilweise sogar Wasser mit Tanklastwagen über weite Strecken zugeliefert werden, um Produktionsausfälle zu verhindern. Bei einem Gesamtbedarf für die Standorte in Taiwan von ca. 265.000m<sup>3</sup> pro Tag<sup>6</sup> ist ersichtlich, dass die Versorgung mit und der Transport von Wasser Mammutaufgaben sind. Daher hat sich TSMC das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 den Wasserverbrauch pro Wafer gegenüber 2010 um 30 % zu senken und mehr als 60 % des Bedarfs aus wiederaufbereitetem Wasser zu decken.<sup>6</sup>

Wenn Chipfabriken in Deutschland und Europa angesiedelt werden, geschieht dies in der Regel gleichzeitig mit einem Aufbau von Wasserwiederaufbereitungsanlagen. Der Wasserverbrauch bezogen auf einen Chip wäre beispielsweise bei dem geplanten Werk von Intel in Magdeburg zwar ähnlich hoch gewesen wie bisher. Jedoch plante das Unternehmen, über eine Wasseraufbereitungsanlage nahezu so viel Wasser zurückzuführen wie entnommen worden wäre. Das Ziel: ein Nettowasserverbrauch gegen Null. Infineon in Dresden setzt seit Kurzem auf eine Aufbereitung von Wasser, anstelle von Trinkwasser wird das Uferfiltrat der Elbe verwendet. Die Mehrkosten bei der Reinigung sind dabei geringer als die Einsparungen beim Bezug von Trinkwasser, sodass sich die Maßnahme trotz der Investitionskosten innerhalb weniger Jahre rentiert. Es gibt also verschiedene, auch ökonomisch tragfähige Ansätze, um die Eingriffe der Chipfabriken in den lokalen Wasserhaushalt zu reduzieren. Dennoch gibt es keine Verpflichtung der Unternehmen, bei ihren Ansiedlungs- bzw. Ausbaurvorhaben Maßnahmen zur Wasserrückgewinnung zu ergreifen. Hier könnte die Politik über die Förderbedingungen verstärkt ansetzen.

**Faktor 4: Entsorgung – warum auch winzige Chips zu einem Berg von Abfall führen**

In der Chipfertigung wird eine extreme Vielfalt an Ausgangsmaterialien und Prozessmedien eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Vielzahl an Metallen, Dielektrika, Lösemitteln und Prozessgasen, die häufig sehr umweltschädlich sind. In aller Regel wird dabei jedoch auf einen sehr effizienten Umgang mit diesen Materialien geachtet. Von den eingesetzten Rohmaterialien werden beispielsweise bei TSMC 18 % direkt in den Fabs wiederverwendet (Abbildung 2), 10 % entfallen auf die fertigen Produkte, 67 % werden bei externen Partnern in Recyclingprodukten eingesetzt, 1 % wird für die Gewinnung alternativer Energien genutzt und 4 % werden auf Deponien oder thermisch entsorgt.<sup>6</sup> Damit ergibt sich insgesamt eine Recyclingquote von 96 %.

Auch wenn es kein allgemeingültiges Konzept gibt, streben doch viele der großen Halbleiterunternehmen wie TSMC, Samsung und Intel an, den Anteil der Produktionsabfälle weiter zu verringern, die auf Deponien entsorgt werden müssen („zero-waste-to-landfill“-Strategien)<sup>6</sup>. Rein aus wirtschaftlichen Gründen liegen die Fertigungsausbeuten bei deutlich über 90 %, das heißt, darüber hinaus fällt nur sehr wenig Ausschuss an. Abbildung 3 verdeutlicht den Ausstoß von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, den Energie- und Wasserbedarf sowie die Müllproduktion im Vergleich.

**Verteilung des Materialflusses in einer Fab**

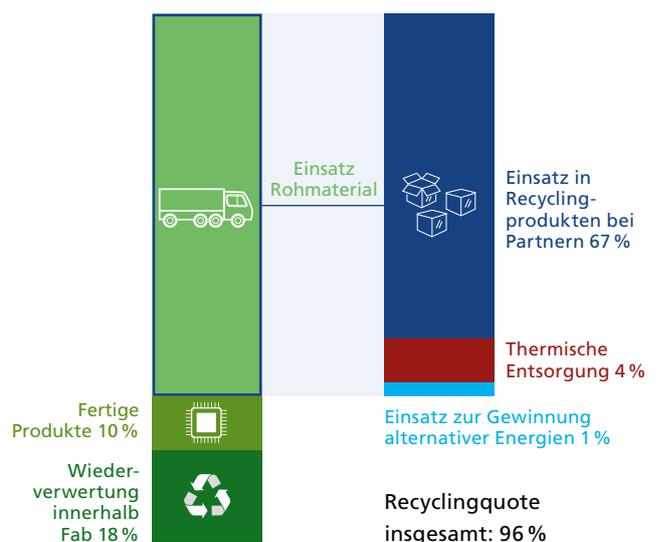


Abbildung 2: Verteilung des Materialflusses

6 Quelle: TSMC 2022 Sustainability Report [https://esg.tsmc.com/download/file/2022\\_sustainabilityReport/english/e-all.pdf](https://esg.tsmc.com/download/file/2022_sustainabilityReport/english/e-all.pdf)

**Ganz schön abstrakt! Geht das auch anschaulich?**

Auch wenn es teils erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Fabs gibt, veranschaulicht eine vergleichende Betrachtung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten und durchschnittlichen Privathaushalten den ökologischen Fußabdruck einer durchschnittlichen Chipfabrik.

Pro Chipfabrik besteht ein jährlicher Strombedarf von ca. 115 GWh. Bei einem privaten Stromverbrauch in Höhe von etwa 3.380 kWh pro Haushalt und Jahr entspricht dies in etwa dem Stromverbrauch einer Stadt mit ca. 68.000 Einwohner:innen. Bei einem Jahresertrag einer typischen privaten PV-Anlage entspricht das in etwa 11.500 Dächern. Mit dem durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß des deutschen Energiemix von ca. 0,4 kg/kWh ergibt sich damit sowie mit den entweichenden Prozessgasen ein jährlicher Ausstoß von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in Höhe von 84.500 Tonnen. Dies entspricht in etwa den Emissionen von 34.000 Haushalten.

Eine Chipfabrik benötigt bis zu ca. 13.870.000 m<sup>3</sup> Wasser pro Jahr. Damit entspricht der Wasserverbrauch dem von etwa 150.000 Haushalten. Die drei großen Chipfabriken in Dresden (Infineon, Globalfoundries und Bosch) verursachen fast die Hälfte des Gesamtwasserverbrauchs der Großstadt mit gut 500.000 Einwohner:innen. Durch die neuen Ansiedlungen bzw. Ausbauten würde sich der Wasserverbrauch ohne Maßnahmen zur Wiedergewinnung nahezu verdoppeln. Dies birgt immense Herausforderungen für die Wasserversorgung, insbesondere in

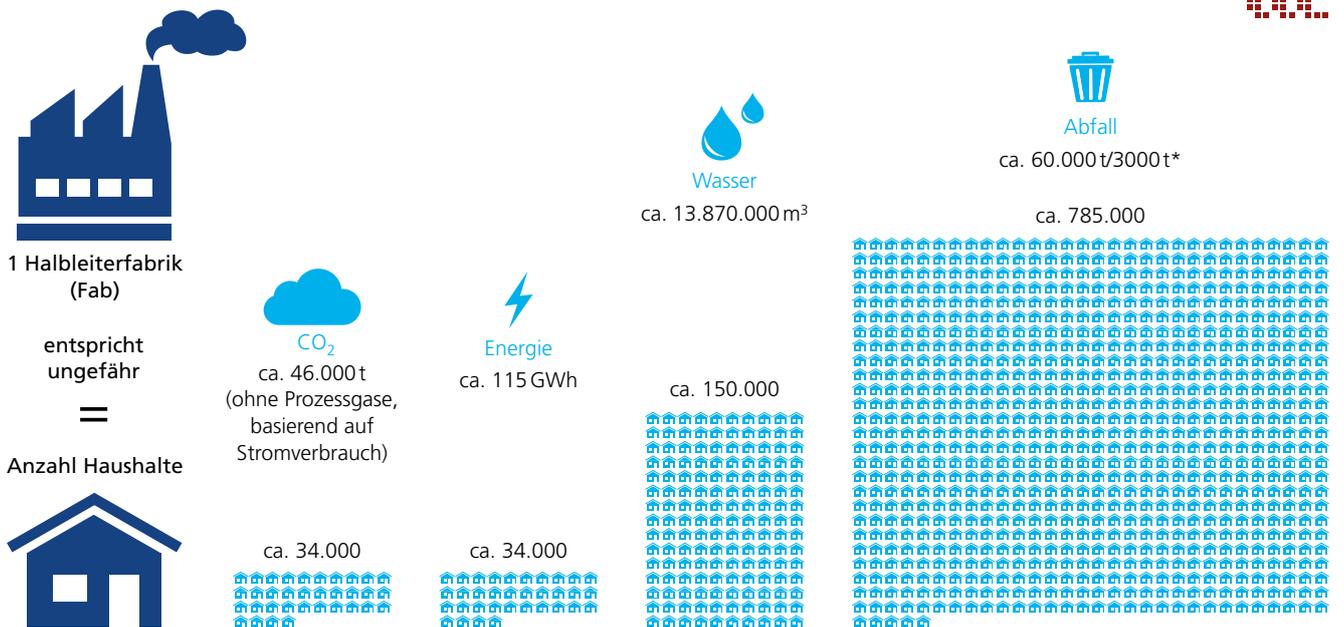
Trockenzeiten. Weiterhin fallen je Fab jährlich ca. 60.000 Tonnen Produktionsabfälle an, von denen derzeit etwa 5 %, d. h. ca. 3.000 Tonnen auf Deponien entsorgt werden müssen. Letzteres entspricht dem Siedlungsabfall einer Stadt mit 785.000 Haushalten, also ca. 1,7 Millionen Einwohner:innen. Es zeigt sich also, dass die Umwelteinflüsse einer einzigen durchschnittlichen Chipfabrik denen einer Mittelstadt wie Weimar bis Großstadt wie München entsprechen.

**Fazit: Ressourcenbedarf in der Chipfertigung**

In den Betrachtungen dieser iiT kompakt wurde ausschließlich die reine Chipfertigung berücksichtigt – andere Schritte der Wertschöpfungskette bis hin zu den fertigen Elektronikprodukten sowie deren Transport, Logistik und Vertrieb, die in der stark globalisierten Lieferkette eine wichtige Rolle spielen, sind nicht Teil dieser Betrachtung, ebenso wie die zugelieferten Prozessmedien und Ausgangsmaterialien oder Wafer oder die grundsätzliche Versorgung mit Energie.

Die Betrachtungen rund um die Chipfertigung zeigen eindeutig, dass die Umwelteinflüsse einer Chipfabrik erheblich sind, insbesondere im Kontext der Nachhaltigkeitsziele der EU. Auf der anderen Seite existieren Maßnahmen, die die Einflüsse reduzieren können, wie zum Beispiel bei der Wasseraufbereitung oder beim Einsatz von Lösemitteln. Außerdem darf nicht vernachlässigt werden, dass die Digitalisierung erhebliche Effizienzsteigerungen und damit CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei Prozessen in allen Lebensbereichen erlaubt.

**Umwelteinflüsse einer Chipfabrik im Vergleich zu einer entsprechenden Anzahl an Privathaushalten**



\* davon auf Deponien entsorgt

Abbildung 3: Umwelteinflüsse einer Chipfabrik und Vergleich mit einer entsprechenden Anzahl an Privathaushalten.



#### **Herausgeber**

Prof. Dr. Volker Wittpahl  
Institut für Innovation und Technik (iit)  
in der  
VDI/VDE Innovation + Technik GmbH  
Steinplatz 1, 10623 Berlin

#### **Zitation**

Kerbusch, Jochen; Petschat, Jasper David; Müller, Michael (2024). Warum es manchmal doch auf die Größe ankommt. Chipfabriken und die Frage nach der Nachhaltigkeit. iit-kompakt Nr. 14, Institut für Innovation und Technik (iit), Berlin.

#### **Autoren**

Dr. Jochen Kerbusch  
Tel: +49 (0)351 486797-37  
E-Mail: kerbusch@iit-berlin.de

Jasper David Petschat  
Tel: +49 (0)351 486797-56  
E-Mail: jasperdavid.petschat@vdivde-it.de

Michael Müller  
Tel: +49 (0)351 486797-51  
E-Mail: michael.mueller@vdivde-it.de

Dezember 2024  
Layout: Poli Quintana  
Bildnachweise: dalomo84 – stock.adobe.com