Ludwigs-Maximilians-Universität München

Fakultät für Geowissenschaften

Department für Geographie

Hauptseminar: Rethinking Production Networks in Difficult Times

Univ. Prof. Dr. Gordon Winder

Chinas Dominanz in der solaren Wertschöpfungskette (GVC) – Motor oder Bremse der globalen Energiewende?

Vorgelegt von: Eugenio Mincione

Studiengang: Geographie Hauptfach B.Sc.

Politikwissenschaft Nebenfach

4. Fachsemester

Inhaltsverzeichnis .....

1. Die solare Transformation im Spannungsfeld globaler Wertschöpfungsketten ... 1

1.1. Problemstellung und Relevanz 1

1.2. Theoretische Einordnung und Forschungsfrage 1

1.3. Methodik und Aufbau der Analyse.....2

2. Theoretischer Bezugsrahmen: Governance und Upgrading in Global Value 3

Chains 3

2.1. Governance-Strukturen und die Entwicklung von Marktverhältnissen 3

2.2. Strategien des Industrial Upgrading und Mechanismen der Value Capture.....4

2.3. Pfadabhängigkeit und die geographische Dimension der Resilienz.....6

3. Analyse der solaren Wertschöpfungskette: Strukturen, Akteure und 8

Marktdominanz 8

3.1. Segmentierung der solaren GVC: Von der Rohstoffgewinnung bis zum Modulbau 8

3.2. Die ökonomische Gravitation Chinas: Clusterbildung, Skaleneffekte und 9

Staatskapitalismus.....9

4. Chinas Dominanz: Treiber und aktuelle Entwicklungen 11

4.1. Industriepolitische Strategien: Staatliche Allokation und das Problem der 11

Überkapazitäten 11

4.2. Die Zäsur vom 1. April 2026: Strategische Neuausrichtung der Exportpolitik 12

4.3. Technologische Evolution und Ressourcengrenzwerte: Das TOPCon-Lock-in.....12

5. Konfliktfelder und strategische Herausforderungen der solaren GVC..... 13

5.1. ESG-Kriterien und die Zwangsarbeits-Debatte in Xinjiang 13

5.2. Handelspolitischer Protektionismus: IRA und Net-Zero Industry Act 14

5.3. Das Trilemma der Energiewende: Kosten, Zeit und Sicherheit 15

6. Technische Disruptionen und stoffliche Grenzen: Die Ressourcenproblematik 15

6.1. Die Silber-Lücke: kritische Abhängigkeiten und technische Pfadwechsel bei 16

Hocheffizienz-Zellen.....16

6.2. Polysilizium-Veredelung und die Problematik hochreiner Quarz-Tiegel.....16

6.3. Die Circular Economy als theoretischer Pfadwechsel: Barrieren und Potenziale....17

7. Strategische Implikationen und Handlungsoptionen für die westliche 18

Industriepolitik..... 18

7.1. Strategische Autonomie durch Diversifizierung: Die N-1-Strategie.....18

7.2. Technologische Nischenstrategien: Leapfrogging durch Next-Gen Photovoltaik 18

7.3. Transatlantische Kooperation vs. Globaler Subventionswettlauf.....19

8. Fazit: Die solare GVC zwischen ökonomischer Effizienz und geopolitischer 20

Abhängigkeit 20

Literaturverzeichnis*..... *22

1. Die solare Transformation im Spannungsfeld globaler Wertschöpfungsketten

1.1. Problemstellung und Relevanz

Zu Beginn des Jahres 2026 befindet sich die globale Energiewende an einer kritischen Wegscheide. Während die internationale Staatengemeinschaft (UN) die Photovoltaik (PV) als zentralen Aspekt zur Erreichung der Pariser Klimaziele vorantreibt, hat sich die ökonomische und machtpolitische Struktur hinter dieser Transformation maßgeblich verändert (International Energy Agency (IEA), 2026). Die ursprüngliche Hoffnung, durch den Übergang zu erneuerbaren Energien die Abhängigkeit von fossilen Importen aus autokratischen Staaten zu überwinden, wird heute durch eine neue, strukturelle Verwundbarkeit erschwert: die einseitige Abhängigkeit von der Volksrepublik China innerhalb der solaren Wertschöpfungskette.

Die Relevanz dieser Thematik wird durch die aktuellen geopolitischen Dynamiken des Frühjahrs 2026 deutlich gemacht. Mit dem Wegfall der staatlichen MehrwertsteuerRückerstattung für chinesische PV-Exporte zum 1. April 2026 endet das Zeitalter der künstlich verbilligten Module schlagartig (Ministry of Finance of the People's Republic of China, 2026). Dieser Einschnitt trifft auf einen europäischen Markt, welcher sich in einem weitreichenden Dilemma befindet: Einerseits ist die Erreichung der Ausbauziele auf günstige Hardware angewiesen, andererseits offenbart die „N-1"-Strategie der Internationalen Energieagentur das immense systemische Risiko einer Single-Source-Abhängigkeit. Denn laut IEA würde ein Ausfall chinesischer Lieferanten in fast jeder Stufe der PV-Wertschöpfungskette dazu führen, dass weniger als 25 % der globalen Nachfrage gedeckt werden könnten (International Energy Agency (IEA), 2026). Ein Ausfall oder eine politisch motivierte Verknappung chinesischer Vorprodukte hätte unmittelbare negative Auswirkungen auf den globalen Dekarbonisierungsprozess. Sichtbar wird dies in einem sog. „Rush" vor dem 1. April, welcher von massiven Exportspitzen geprägt ist und die Abhängigkeit des Weltmarkts von diesen Lieferungen untermauert (Patel, 2026; Ember, 2026).

1.2. Theoretische Einordnung und Forschungsfrage

Wissenschaftlich lässt sich diese geopolitische Dominanz Chinas über das Konzept der Global Value Chains (GVC) veranschaulichen (Gereffi, 2018). Die Solarindustrie hat in den letzten zehn Jahren einen fundamentalen Wandel von einer ursprünglich westlich gesteuerten

„Buyerdriven"-Kette hin zu einer hochgradig hierarchischen „Producer-driven"-Kette erlebt, in der China nicht mehr nur die Montage kontrolliert, sondern die kritischen technologischen „ChokePoints", wie die Wafer-Produktion, übernommen hat (Gereffi, 2018). Durch gezieltes Industrial Upgrading – vom effizienten Produktdesign bis hin zur technologischen Marktführung bei TOPCon-Zellen – hat Peking die gesamte Wertschöpfung vertikal integriert.

Basierend auf diesem Hintergrund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der zentralen Forschungsfrage, inwiefern Chinas Dominanz in den Global Value Chains die globale Energiewende gefährdet oder ermöglicht. Dabei gilt es abzuwägen, ob die radikalen Kostensenkungen Chinas die Energiewende erst ökonomisch möglich gemacht haben oder ob die bestehende geopolitische Erpressbarkeit und die Einschränkung lokaler Industriekapazitäten im Westen (Europa & USA) ein langfristiges Hindernis für eine resiliente globale Energietransformation darstellen.

1.3. Methodik und Aufbau der Analyse

Die Beantwortung der Forschungsfrage erfolgt auf Basis einer Analyse von Sekundärliteratur sowie der Auswertung aktueller Wirtschafts- und Technikdaten bis zum Stand 2026. Als wesentliche Datengrundlage dienen die Energy Technology Perspectives 2026 der IEA, der Photovoltaics Report (2025) der Fraunhofer ISE sowie die Berichte des Mercator Institute for China Studies (MERICS) zur jüngsten Exportreform.

Der Gang der Untersuchung ist wie folgt gegliedert: Nach der theoretischen Fundierung der GVC-Governance (Kapitel 2) folgt eine Analyse der Wertschöpfungsstufen der PV und Marktanteile Chinas (Kapitel 3). Kapitel 4 erklärt die industriepolitischen Treiber und die Auswirkungen der Exportregeln von 2026. In Kapitel 5 werden die zentralen Konfliktfelder zwischen Resilienz und Effizienz diskutiert, bevor Kapitel 6 technische Disruptionen und Rohstofffragen analysiert. Die Arbeit wird mit einer Diskussion strategischer Implikationen (Kapitel 7) und einem zusammenfassenden Fazit (Kapitel 8) abgeschlossen.

2. Theoretischer Bezugsrahmen: Governance und Upgrading in Global Value Chains

2.1. Governance-Strukturen und die Entwicklung von Marktverhältnissen

Um die Struktur der globalen Solarindustrie zu verstehen, wird ein tiefgreifendes Verständnis der Koordinationsmechanismen innerhalb weltweiter Produktionsnetzwerke benötigt. Das Konzept der Global Value Chains (GVC) bietet hierfür den notwendigen Rahmen, indem es untersucht, wie Macht und Autorität zwischen den verschiedenen Akteuren gegliedert sind. Nach Stephenson und Pfister ist die Governance das Herzstück dieser Analyse. Sie definiert jene „autoritativen Beziehungen", die den Verkehr von Wissen, Kapital und Gütern steuern und somit aktiv bestimmen, welcher Akteur welchen Anteil am Gesamtwert der Kette beitragen kann (Stephenson & Pfister, 2016).

Historisch differenziert die Wissenschaft primär zwischen buyer-driven und producer-driven chains. In buyer-driven chains liegt die Steuerungsmacht bei großen Einzelhändlern oder Marktunternehmen, welche die Produktion koordinieren, ohne selbst Fabriken zu besitzen, sogenannte „Fabless"-Unternehmen. Sie vergeben Aufträge an externe Zulieferer, meist in Niedriglohnländern, und kontrollieren somit maßgeblich die Qualitätsstandards, Preise und Lieferbedingungen. Im Gegensatz dazu zeichnen sich producer-driven chains durch die Dominanz großer Industrieunternehmen aus, deren Macht auf der Kontrolle über kapitalintensive Produktionstechnologien und Forschungs- und Entwicklungskapazitäten (F&E) basiert (Gereffi, Humphrey, & Sturgeon, 2005). In der Solarindustrie ist eine wesentliche Transformation dieser Strukturen zu beobachten: Während sie in ihrer Frühphase stark durch westliche Nachfrage und Innovationszyklen (Buyer-Logik) geprägt war, hat sie sich in den vergangenen Jahren zu einer ausgeprägt integrierten producer-driven chain entwickelt, welche durch chinesische Hersteller dominiert wird. Trotz dessen lässt sich nicht vereinfachen, dass die solare GVC ursprünglich „buyer-driven" ist. Denn die klassische Buyer-driven-Kette beschreibt Lieferketten, die von Einzelhändlern und Marktunternehmen gesteuert werden. Die frühe Solarindustrie aber wurde von westlichen Technologieunternehmen und Staatssubventionen gesteuert – was einer „Producer-driven"-Logik entspricht. Der Wandel in der solaren Industrie lässt sich also treffender als Verschiebung der Governance-Macht innerhalb einer Producer-driven-chain beschreiben – von westlichen Technologieführern hin zu chinesischen Produzenten (Jones, Demirkaya, & Bethmann, 2019).

Innerhalb dieser Struktur lassen sich die Machtverhältnisse über die fünf idealtypischen Governance-Formen präzisieren. China hat verstanden, dass die Dominanz gegenüber dem Westen durch einen Übergang von einer ursprünglich „modularen" Struktur, in welcher standardisierte Komponenten (wie Solarzellen) leicht austauschbar sind, hin zu einer hierarchischen bis kaptiven (captive) Struktur erreicht werden kann (Gereffi, Humphrey, & Sturgeon, 2005). In einer kaptiven Konstellation sind die Abnehmer (z. B. europäische Installateure oder Projektentwickler) aufgrund der extremen technologischen Spezialisierung und der immensen Skaleneffekte Chinas faktisch an eine geringe Anzahl dominanter Zulieferer gebunden. Diese Abhängigkeit wird verstärkt durch die Kontrolle über strategische „ChokePoints" (z. B. Wafer-Produktion), die aufgrund ihrer Kapitalintensität und Prozesskomplexität ein Hindernis für einen Markteintritt darstellen, welcher kaum durch Marktmechanismen (Market Governance) allein überwunden werden kann.

Betrachtet man diese Struktur genauer, so lässt sich argumentieren, dass die Kontrolle in der solaren GVC nicht auf offener Weisung oder direkter Eigentümerschaft beruht, sondern auf technischer und prozessualer Steuerung: Wer die Spezifikationen für Wafer-Dicke, Diamantdrahtsägen oder Zellarchitektur vorgibt, bestimmt implizit auch die Standards, an die sich alle nachgelagerten Akteure halten müssen. Die Macht der chinesischen Zulieferer liegt somit weniger in expliziten vertraglichen Weisungsrechten als vielmehr in der faktischen Unersetzbarkeit ihrer Kapazitäten. Gerade diese Unsichtbarkeit macht den Choke-Point-Mechanismus so wirksam: Er entzieht sich einer klassischen politischen Regulierung, da keine einzelne Handlung, sondern eine strukturelle Marktposition die Abhängigkeit erzeugt. Die Effektivität dieser Kontrolle zeigt sich nicht zuletzt daran, dass selbst milliardenschwere westliche Förderprogramme (siehe Kapitel 5.2 und 7) bislang keine ernsthafte Alternative zu den chinesischen Wafer-Kapazitäten hervorbringen konnten – ein Indiz dafür, dass captive Governance hier nicht nur theoretisch, sondern auch empirisch eine der wirksamsten Kontrollformen innerhalb der GVC-Typologie darstellt.

2.2. Strategien des Industrial Upgrading und Mechanismen der Value Capture

Um die wirtschaftliche Dominanz Chinas nicht nur als Ergebnis staatlicher Subventionen, sondern als strukturellen Erfolg zu begreifen, ist das Konzept des Industrial Upgrading unverzichtbar. Upgrading bezeichnet den Prozess, durch den Akteure (Staaten oder Unternehmen) innerhalb einer Kette von Aktivitäten mit geringer Wertschöpfung zu ökonomisch anspruchsvolleren und profitableren Produkten aufsteigen (Kaplinsky, 2000).

Kaplinsky argumentiert, dass Akteure von „low-value-activities", beispielsweise der einfachen Montage, zu „high-value-activities" (Design, Branding, F&E) aufsteigen müssen, um im globalen Weltmarkt bestehen zu bleiben und nicht in einer „Armutsfalle" durch sinkende Preise hängen zu bleiben (Kaplinsky, 2000).

Nach Humphrey und Schmitz wird in der Wirtschaftsgeographie zwischen vier Dimensionen des Upgradings unterschieden, wovon drei für die Analyse der GVC zentral sind, da sich das Inter-Sectoral Upgrading auf die Anwendung erworbener Kompetenzen in anderen Branchen bezieht und somit für diese Analyse vernachlässigt werden kann (Humphrey & Schmitz, 2002). Process Upgrading beschreibt eine Effizienzsteigerung der Produktionsabläufe. Chinas Erfolg durch Process Upgrading beruht dabei primär auf einer vertikalen Integration und Automatisierung der Prozesse. Dadurch, dass alle Schritte von der Siliziumaufbereitung bis zum Modulbau in einem räumlich konzentrierten Cluster gebündelt werden, konnten Skaleneffekte realisiert werden, welche die Kosten pro Watt Peak für China unter das Niveau jeder westlichen Konkurrenz drückten (Humphrey & Schmitz, 2002).

Product Upgrading hingegen beschreibt den Übergang zu komplexeren Produkten. Chinas Entwicklung beginnt bei der Produktion simpler Standardmodule, welche durch den Übergang der Produktion zu komplexen Hochleistungstechnologien den Weg des Aufstiegs Chinas zur technologischen Weltspitze markierte. Dieser Übergang zu komplexeren Produkten erhöht zudem auch die technologische Distanz zu potenziellen Markteinsteigern (Kaplinsky, 2000). China hat sich somit einen technologischen Vorsprung geschaffen durch die Umstellung der Produktion auf hocheffiziente N-Type- und Perowskit-Zellen.

Beim Functional Upgrading werden Funktionen übernommen, welche eine höhere Wertschöpfung versprechen, insbesondere F&E sowie das Design der Produktionsmaschinen selbst. China exportiert heute also nicht mehr nur die Hardware, sondern kontrolliert das gesamte technologische System, hält zudem auch die meisten Patente und setzt die Standards für den Markt und die Produktion (Kaplinsky, 2000).

Eng verknüpft mit dem Upgrading ist der Begriff der Value Capture (Wertschöpfungsaneignung). Nach Kaplinsky resultiert ökonomische Macht aus dem Besitz von sog. „Renten"-Faktoren, welche knapp und schwer zu imitieren sind. Während die Montage von Modulen heute kaum noch ökonomische Renten einbringt, liegt der wahre Wert in der Kontrolle über die technologischen Standards und die hochkomplexen Vorprodukte. In einer globalisierten Welt sei die bloße Produktion zur Massenware nicht mehr gewinngenerierend;

Staaten erzielen Gewinne durch Renten (Kaplinsky, 2000). Kaplinsky unterscheidet zwischen „Ressource-Rents" (Zugang zu Rohstoffen), „Technology-Rents" (Chinas Vorsprung bei der Wafer-Säge-Technik) und „Policy-Rents" (staatliche Eingriffe, die den Wettbewerb beeinflussen) (Kaplinsky, 2000).

Dadurch, dass China diese Stufen monopolisiert hat, findet eine asymmetrische Verteilung der Gewinne statt: Während der Westen die Energiewende durch Investitionskosten größtenteils finanziert, wird der wirtschaftliche Mehrwert – aus Löhnen, Steuern und Reinvestitionen in Innovationen – primär in China generiert. Das bedeutet also, dass Akteure, welche nur die Montage übernehmen, unter immensen Preisdruck geraten, während die „Renten-Besitzer" Reichtum abschöpfen (Kaplinsky, 2000).

Dieses Verhältnis veranschaulicht eine paradoxe Situation oder gar einen Widerspruch, in der die globale ökologische Transformation gleichzeitig die wirtschaftliche Machtposition eines einzigen Akteurs innerhalb der globalen Wertschöpfungskette stärkt. Die westliche Nachfrage nach grüner Technologie subventioniert somit massiv die industrielle Basis Chinas, da der Westen keine eigene rentable Wertschöpfung für diese Mengen besitzt (Gereffi, Pananond, Tell, & Fang, 2025).

2.3. Pfadabhängigkeit und die geographische Dimension der Resilienz

Um zu verstehen, weshalb die westliche Industrielandschaft trotz der offensichtlichen geopolitischen Risiken kaum in der Lage zu sein scheint, die Abhängigkeit von chinesischen Vorprodukten kurzfristig zu reduzieren, muss das Konzept der Pfadabhängigkeit (Path Dependency) genauer veranschaulicht werden. Nach Arthur beschreibt Pfadabhängigkeit einen Prozess, bei dem vergangene Entscheidungen die zukünftige Handlungsfreiheit einschränken (Arthur, 1996). Kleine zufällige Ereignisse am Anfang führen dazu, dass ein technischer Pfad „eingeschlossen" wird, da die Kosten für einen Wechsel zu hoch wären (David, 1985). Zudem wird ein Pfad umso attraktiver, je mehr Akteure diesen nutzen (Arthur, 1994).

Innerhalb der solaren GVC lassen sich nach David und Arthur drei Mechanismen der Pfadabhängigkeit beobachten:

Skaleneffekte (sog. Direct Economies) beziehen sich auf die drastische Senkung von Grenzkosten pro Einheit durch den massiven Ausbau von Kapazitäten. Da China durch

Skalenerträge (Increasing Returns) seine Produktionskosten radikal senken konnte, würde ein Markteintritt eines Akteurs im Westen immense Anfangsinvestitionen erfordern, welche sich unter aktuellen Marktbedingungen als nicht profitabel aufweisen. Das bedeutet, der „Pfad" der billigen chinesischen Module hat sich bereits so tief auf dem globalen Markt etabliert, um ein Monopol zu begünstigen und Markteintritte Dritter massiv einzuschränken (Arthur, 1996; Schreyögg & Sydow, 2010).

Zudem hat die technologische Spezialisierung zu einem Wissensvorsprung geführt, welcher über rein ökonomische Faktoren hinausgeht. Durch die räumliche Konzentration von Zulieferketten, spezialisierten Fachkräften und Forschungsclustern entstand ein technologisches Lock-in. Diese Lerneffekte und das Lock-in führten in China zu einer grundlegenden Neuskalierung von Technologien, während westliche Akteure in dem Pfad der Technologie-Adaption gefangen sind. Während China über Jahrzehnte das technische Knowhow für die Wafer-Produktion perfektioniert hat, ist dieses spezifische Wissen im Westen teilweise durch die De-Industrialisierung verloren gegangen (Schreyögg & Sydow, 2010).

Zuletzt führen Netzwerkeffekte durch die Optimierung der globalen Infrastruktur der Energiewende auf die Spezifikationen chinesischer Marktführer zu enormen Vorteilen für Chinas solare Industrie. Planungssoftwares bis hin zu Installationsstandards wurden den chinesischen Normen angepasst und schufen somit einen Vorteil auf dem globalen Markt. Ein bestehender Pfad wird zudem durch Investoren finanziert, welche auf chinesischer Hardware basieren, da das Risiko geringer scheint (Schreyögg & Sydow, 2010).

Basierend auf den oben genannten Aspekten der Pfadabhängigkeit ergibt sich eine kritische Fragestellung für die evolutionäre Wirtschaftsgeographie, nämlich das Spannungsfeld zwischen Effizienz und Resilienz. Während die GVC-Logik der letzten zwei Jahrzehnte für eine maximale Kosteneffizienz (Just-in-time, Single Sourcing) konstruiert war, rückt im Jahre 2026 verstärkt die Fähigkeit des Systems in den Fokus, Schocks und Stresses zu absorbieren. Dies beschreibt der Begriff der Resilienz, wobei Resilienz nicht nur die bloße Erholung von Krisen und die Rückkehr zum „alten" (Rebound) bedeutet, sondern die Fähigkeit eines gesamten Systems, vorausschauend neue Entwicklungspfade zu erschließen (Adaptive Capacity), um Abhängigkeiten und Risiken zu reduzieren (Boschma, 2015). Zu viel Spezialisierung hingegen schwächt laut Boschma die langfristige Anpassungsfähigkeit.

Die von der IEA thematisierte „N-1"-Strategie kennzeichnet den industriepolitischen Lösungsansatz für diese theoretische Problematik. Sie versucht die Pfadabhängigkeit durch

staatliche Interventionen zu durchbrechen, um die verlorenen Investitionen, sog. „Sunk Costs", und veraltete Strukturen zu überwinden und die hohen Kosten für den Aufbau neuer lokaler Industrien zu unterstützen (International Energy Agency (IEA), 2026). Die „N-1"-Strategie fungiert somit als „Kick-Starter", um die Eintrittsbarrieren für neue Industrien zu senken, da der Markt allein Pfadabhängigkeiten bei hohen „Sunk Costs" nicht lösen kann.

Theoretisch betrachtet steht die globale Energiewende somit vor dem Prozess der Path Creation, einem Versuch, durch einen neuen und resilienteren Produktionspfad der wirtschaftlichen Schwere der chinesischen Dominanz entgegenzuwirken (Garud, Kumaraswamy, & Karnoe, 2010). Während Pfadabhängigkeit oft als „Zufall" beschrieben wird, beschreibt „Path Creation" einen bewussten Akt der achtsamen Abweichung („mindful deviation"). Akteure ignorieren kurzfristige ökonomische Logiken, um langfristig neue Strukturen aufzubauen (Garud, Kumaraswamy, & Karnoe, 2010).

3. Analyse der solaren Wertschöpfungskette: Strukturen, Akteure und Marktdominanz

3.1. Segmentierung der solaren GVC: Von der Rohstoffgewinnung bis zum Modulbau

Die solare GVC lässt sich in vier primäre Wertschöpfungsstufen unterteilen, deren jeweilige Eintrittsbarrieren und Kapitalintensitäten variieren.

Am Anfang der Kette steht die Gewinnung und Reinigung von metallurgischem Silizium zu Polysilizium, der sogenannte Upstream. Dieser Prozess ist energieintensiv und erfordert hochspezialisierte chemische Anlagen (Braga, Moreira, Zampieri, Bacchin, & Mei, 2008). Hier lässt sich auf das Konzept der Ressource- und Policy-Rents nach Kaplinsky (2000) zurückgreifen. Denn dadurch, dass China über Zugang zu günstiger Kohleenergie, insbesondere in den Regionen von Xinjiang und der Inneren Mongolei, verfügt (Ressource-Rent) und zugleich staatlich subventionierte Industrieparks errichtet werden konnten (Policy-Rent), kontrolliert es bereits hier über 93 % des Weltmarktes (International Energy Agency (IEA), 2026). Solange westliche Akteure diese Resource- und Policy-Rents nicht kompensieren können, bleibt ein wettbewerbsfähiger Markteintritt unter den aktuellen Bedingungen kaum realisierbar (Kaplinsky, 2000).

Der Midstream I, also die Wafer-Produktion, beschreibt den technologischen „Choke-Point" der gesamten Wertschöpfungskette. Wafer sind dünne Scheiben aus Silizium-Ingots. Die

Produktion dieser erfordert hochpräzise Diamantdrahtsägen (Davidson & Qian, 2026). Nach aktuellen Daten des Fraunhofer ISE entfallen über 95 % der globalen Wafer-Kapazitäten auf China (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2025). In diesem Produktionsschritt zeigt sich die captive Governance (Gereffi, Humphrey, & Sturgeon, 2005). In einer hierarchischen Governance kontrolliert der „Lead firm/State" die Standards. Das bedeutet, dass alle Zellhersteller sich an diese chinesischen Standards anpassen müssen. Da der Westen diese spezialisierten Maschinen kaum selbst in Masse baut, ist der Aufbau einer Konkurrenzproduktion ohne chinesisches Equipment schwierig; ohne die chinesischen Wafer kann weltweit keine Solarzelle produziert werden, was eine absolute technologische Abhängigkeit darstellt (Davidson & Qian, 2026).

In der Stufe des Midstream II, also der Zellfertigung, findet das Konzept des Product Upgrading statt. Die Transformation von Wafern zu Zellen (z. B. TOPCon oder Perowskit) ist der forschungsintensivste Teil der Kette. China konnte hier durch massive Skaleneffekte die Kosten so weit senken, dass Pilotprojekte westlicher Marktkonkurrenten und Akteure kaum über die Gewinnschwelle hinauskommen.

Die letzte Stufe der Wertschöpfungskette von PV-Modulen ist die Modulmontage und Systemintegration, der sog. Downstream. Dieser Schritt weist zwar vergleichsweise weniger Komplexität als die anderen drei Stufen der Kette auf, gestaltet sich aber logistisch als anspruchsvoll. Auch die wirtschaftliche Wertschöpfung des Downstreams ist im Vergleich zu den Upstream-Bereichen geringer, obwohl hier die meisten Arbeitsplätze im Westen geschaffen werden, im Bereich der Installation beispielsweise (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagebau, 2026).

3.2. Die ökonomische Gravitation Chinas: Clusterbildung, Skaleneffekte und Staatskapitalismus

Die beispiellose Dominanz Chinas in der solaren GVC ist nicht allein auf die niedrigen Lohnkosten zurückzuführen, sondern ist das Ergebnis einer effizienten räumlichen und organisatorischen Strukturierung der Produktionsschritte, welche sich wirtschaftsgeographisch über das Zusammenwirken von Agglomerationsvorteilen und gezielter staatlicher Flankierung erklären lässt (Markard, Raven, & Truffer, 2012; Hill & Engel-Cox, 2017).

Eine zentrale Säule dieser ökonomischen Gravitation Chinas ist die Bildung spezialisierter Industriecluster, insbesondere in den östlichen Provinzen des Landes wie Jiangsu, Anhui und

Zhejiang. In diesen räumlichen Clustern ist eine räumliche Konzentration der gesamten Wertschöpfungskette zu beobachten – von Maschinenbauern für die Wafer-Sägetechnik bis hin zu Produzenten von spezialisierten Glasbeschichtungen und Aluminiumrahmen (Davidson & Qian, 2026). Diese physische Nähe reduziert Transaktionskosten und ermöglicht eine erhöhte Geschwindigkeit bei der Implementierung technischer Innovationen, wie der Übergang zur TOPCon-Zelltechnologie, welcher in Kapitel 4.3 noch ausführlicher diskutiert wird. In fragmentierten Märkten würde dieser Prozess Jahre andauern (Markard, Raven, & Truffer, 2012). Die daraus resultierenden Skaleneffekte, sog. Increasing Returns, bilden für Chinas Solarindustrie einen effektiven Schutzwall gegen ausländische Konkurrenz. Laut Daten der IEA liegen die Produktionskosten für PV-Module in China deutlich unter denen in Europa (ca. 30–50 %) und den USA (bis zu 40 %) (International Energy Agency (IEA), 2026). Die Gigafabriken von Jinko oder LONGi erreichen sogar eine Fixkostendegression und drängen kleine europäische Akteure somit faktisch vom Markt (Davidson & Qian, 2026).

Dieser Kostenvorteil spielt eine Rolle in der Theorie der Pfadabhängigkeit. Dadurch, dass chinesische Giganten wie Longi Green Energy oder Jinko Solar über Produktionskapazitäten im Gigawatt-Bereich verfügen, können sie die Fixkosten der Produktion auf ein Niveau senken, welches für westliche Akteure mit deutlich geringeren Volumina kaum zu erreichen ist (Davidson & Qian, 2026). Unterstützt wird dies zudem auch durch einen strategischen Staatskapitalismus. Wie Zenglein in einem Bericht für das Mercator Institute for China Studies (MERICS) aufzeigt, profitieren chinesische Hersteller nicht nur von direkten staatlichen Subventionen, sondern auch von einem privilegierten Zugang zu sog. „geduldigem Kapital", welches durch staatlich kontrollierte Banken sowie von künstlich niedrig gehaltenen Energiepreisen definiert wird und die stromintensive Siliziumschmelze fördert (Gunter et al., 2025). Diese staatliche Ansammlung von Ressourcen führt zu einer systematischen Verzerrung der globalen Wettbewerbsbedingungen. Im Sinne der Value Capture-Theorie nach Kaplinsky stellt diese Verzerrung sicher, dass die ökonomische Rente der globalen Energiewende – trotz westlicher Förderprogramme wie dem Inflation Reduction Act – weiterhin primär in den chinesischen Clustern angereichert wird (Gunter et al., 2025).

4. Chinas Dominanz: Treiber und aktuelle Entwicklungen

4.1. Industriepolitische Strategien: Staatliche Allokation und das Problem der Überkapazitäten

Dass China heute alleiniger Marktführer im Bereich der solaren Technologien ist, ist nicht allein das Ergebnis komparativer Kostenvorteile, sondern Folge einer jahrzehntelangen zentralstaatlichen Planung und regionaler Umsetzung. Wie im Rahmen der Strategie „Made in China 2025" vorgestellt, wurde die Photovoltaik als einer der zehn strategischen Säulen der nationalen technologischen Souveränität Chinas definiert; laut Zenglein besitzt, wer die Hardware der globalen Energiewende kontrolliert, eine strukturelle Macht über die Dekarbonisierungsgeschwindigkeit anderer Staaten (Zenglein & Holzmann, 2019). Diese Form der „Green Industrial Policy" zielt darauf ab, durch massive staatliche Kapitalallokationen globale Pfadabhängigkeiten zu Gunsten chinesischer Akteure zu verschieben (Zenglein & Holzmann, 2019).

Ein zentrales Merkmal, welches die GVC im Frühjahr 2026 prägt, ist das immense Ausmaß der industriellen Überkapazitäten. Während der globale Bedarf bei ca. 650 GW liegt, belaufen sich die chinesischen Produktionskapazitäten auf etwa 1 200 GW (Davidson & Qian, 2026). Aus einer wirtschaftlichen Perspektive betrachtet, lässt sich dies als eine „aggressive Pfadreaktion" interpretieren: China drückt mit Hilfe eines künstlich erzeugten Überangebotes die globalen Marktpreise unter das Rentabilitätsniveau westlicher Wettbewerber („Predatory pricing") (Goreichy & Gunter, 2026). Diese Marktstrategie erzwingt eine marktbereinigende Konsolidierung, bei der ineffiziente chinesische „Zombie-Unternehmen" durch den gezielten Entzug von Exportvorteilen eliminiert werden, um die nationale Effizienz zu steigern (Gunter et al., 2025).

Die wirtschaftliche Überlegung dieser Überkapazität liegt in der Realisierung extremer Skaleneffekte. Durch die räumliche Konzentration von Vorlieferanten für Spezialkomponenten der PV-Module, wie z. B. Silberpasten oder PV-Glas, sinken die Grenzkosten der Produktion in den chinesischen Industrieclustern drastisch, sodass der ökonomische Vorsprung selbst bei einer global sinkenden Nachfrage garantiert werden kann (International Energy Agency (IEA), 2026). Das Mercator Institute for China Studies (MERICS) betont zudem, dass der privilegierte Zugang zu günstigen Krediten durch staatlich kontrollierte Banken es chinesischen Firmen

erlaubt, Einnahmeverluste über gewisse Zeitspannen auszugleichen, welche westliche Unternehmen sofort in eine finanzielle Notlage führen würden (Gunter et al., 2025).

4.2. Die Zäsur vom 1. April 2026: Strategische Neuausrichtung der Exportpolitik

Die zum 1. April 2026 wirksam gewordene Reform der chinesischen ExportSteuerrückerstattung (Value Added Tax Rebate) markiert einen entscheidenden Wendepunkt für die internationalen Handelsdynamiken. Über mehr als ein Jahrzehnt diente die Rückerstattung der Mehrwertsteuer in Höhe von ca. 13 % als indirekte, aber wirksame Exportsubvention, wodurch chinesische PV-Module auf dem Weltmarkt künstlich verbilligt wurden, und somit westliche Produzenten unterboten (Xiao, 2026).

Durch die Streichung dieser Maßnahme nutzt China die kaptive Governance für eine Margenoptimierung und geopolitische Konsolidierung (Gereffi, Humphrey, & Sturgeon, 2005). Da die globale Abhängigkeit von chinesischen Vorprodukten, insbesondere Wafern, eine kritische Grenze erreicht hat, bietet sich Peking nun die Möglichkeit, die ökonomische Rente der GVC stärker im Inland zu binden, ohne dabei einen spürbaren Nachfrageeinbruch befürchten zu müssen (Kaplinsky, 2000; Gunter et al., 2025). Die Auswirkungen dieser Strategien im Frühjahr 2026 sind deutlich zu beobachten: Der plötzliche Preisanstieg für Importmodule in Europa führt zu einer Neuausrichtung zahlreicher Großprojekte. Dies verschärft wiederum erneut das Dilemma zwischen kurzfristiger Ausbaugeschwindigkeit und langfristiger Autonomie. Die IEA betont, dieser Preisschock offenbare, dass der Kostenanstieg auf dem europäischen Markt nicht rein durch technologische Argumente erklärt werden kann, sondern auf politisch steuerbaren Rahmenbedingungen beruht, welche durch China jederzeit als geopolitisches Druckmittel gezielt eingesetzt werden können (International Energy Agency (IEA), 2026). Die „Lernkurve" der PV erschien durch die chinesische Subventionspolitik steiler, als sie rein technologisch war (Wright's Law), und zeigt mit dem Preisanstieg vom 1. April 2026 die Verwundbarkeit der globalen Energiewende-Berechnungen auf, die bisher auf politisch manipulierten Preisen basierten (International Energy Agency (IEA), 2026; Wright, 1936; Kavlak, McNerney, & Trancik, 2018).

4.3. Technologische Evolution und Ressourcengrenzwerte: Das TOPCon-Lock-in

Nicht nur politische Ereignisse prägen das Frühjahr 2026, sondern auch die endgültige technologische Ablösung der herkömmlichen PERC-Zellen durch die TOPCon-Technologie (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2025). Unter Laborbedingungen

ermöglicht diese neue Zellarchitektur Wirkungsgrade von bis zu 26,7 %, wobei kommerzielle Module zwischen 22–23,5 % aufweisen und somit längst zum neuen Industriestandard aufgestiegen sind (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2025).

Aus der Perspektive der westlichen Solarindustrie wird das Lock-in-Konzept nur noch mehr verschärft. Die Produktion von TOPCon-Zellen ist kapitalintensiv und erfordert spezielle Produktionsanlagen, die fast ausschließlich von chinesischen Maschinenbauern produziert und geliefert werden (European Solar PV Industry Alliance (ESIA), 2024). Parallel dazu stößt die solare GVC hier an einen kritischen Ressourcengrenzwert, da die Fertigung dieser Zelltechnologie eine signifikant höhere Menge an Silberpaste zur Kontaktierung benötigt, was im Frühjahr 2026 zu einer starken Volatilität des globalen Silberpreises geführt hat (The Silver Institute, 2025; IEA, 2025).

Heute kontrolliert China nicht nur die physische Produktion der PV-Module, sondern fungiert zudem im Sinne des Functional Upgrading als globaler Innovationsknotenpunkt (Humphrey & Schmitz, 2002). Während man in Europa versucht, durch Initiativen wie den Net-Zero Industry Act (Europäisches Parlament und Rat der EU, 2024) Alternativtechnologien zu fördern (z. B. Perowskit-Tandemzellen) und somit neue Pfade zu kreieren, scheitern solche Projekte an der „Skalierungsmacht" chinesischer Cluster (Humphrey & Schmitz, 2002). Innovationen werden in China innerhalb von wenigen Monaten in die Massenfertigung integriert, wodurch die technologische Distanz zum Westen trotz lokaler Forschungsbemühungen eher zu- als abnimmt (Humphrey & Schmitz, 2002).

5. Konfliktfelder und strategische Herausforderungen der solaren GVC

Im Jahre 2026 haben sich durch die einseitige Konzentration der solaren Wertschöpfungskette in China einige Konfliktfelder bemerkbar gemacht, die über rein ökonomische Parameter hinausgehen. Diese lassen sich in ethisch-ökologische Standards, handelspolitische Protektionsmaßnahmen und das Dilemma zwischen Resilienz und Mitigationsgeschwindigkeit unterteilen.

5.1. ESG-Kriterien und die Zwangsarbeits-Debatte in Xinjiang

Eine zentrale Hürde für die globale Integration von chinesischen Modulen sind die verschärften Anforderungen an Umwelt-, Sozial- und Governance-Standards (ESG). Besonders die Provinz Xinjiang im Nordwesten Chinas steht im Fokus der geographischen Forschung, da dort

schätzungsweise 35 % bis 45 % des globalen Polysiliziums gefertigt werden (Murphy & Elimä, 2021).

Die Vorwürfe systematischer Zwangsarbeit bei uigurischen Minderheiten haben im Frühjahr 2026 zu einer Verschärfung der Sorgfaltspflichtgesetze geführt, wobei die Verbote für zwangsarbeitsbelastete Produkte erst ab Dezember 2027 in Kraft treten werden (Europäisches Parlament und Rat der EU, 2024). Nach dem Vorbild des US-amerikanischen Uyghur Forced Labor Prevention Act (UFLPA) hat nun auch die Europäische Union ihre Importrichtlinien dahingehend angepasst, dass Produkte mit unklarer Herkunft an den Außengrenzen blockiert werden können (Europäisches Parlament und Rat der EU, 2024).

Diese neuen Regelungen und Kontrollen führen zu einer neuen Form der institutionellen Distanz innerhalb der GVC: Obwohl chinesische Hersteller durch Process Upgrading wirtschaftlich den westlichen Produzenten überlegen sind, führt die mangelnde Transparenz über die Produktion in den Upstream-Segmenten zu einem „Reputations-Lock-out" im Westen. Chinesische Unternehmen stehen nun vor einem Dilemma, entweder auf günstige, aber zugleich ethisch belastete Komponenten zu setzen oder gravierende Aufpreise für kontrolliertes und zertifiziertes Silizium aus Europa oder den USA zu zahlen (IEA, 2022; Murphy & Elimä, 2021).

5.2. Handelspolitischer Protektionismus: IRA und Net-Zero Industry Act

Westliche Industrieländer haben als Reaktion auf die chinesische Marktdominanz massiv in lokale Förderprogramme investiert, um die Pfadabhängigkeit zu durchbrechen und somit eine ökonomische und technologische Autonomie zu erreichen.

In den USA hat der Inflation Reduction Act, kurz IRA, dazu geführt, dass bis 2026 große Kapazitäten in der Modulmontage auf US-amerikanischem Boden entstanden sind. Dennoch kann sich die USA nicht vollständig von Chinas Abhängigkeit lösen, da der Aufbau einer autarken Produktionskette aufgrund hoher Energie- und Investitionskosten nicht realisierbar ist und somit die Abhängigkeit von chinesischen Vorprodukten (z. B. Wafern) bestehen bleibt (Wood Mackenzie, 2023).

Die EU hingegen verfolgt das Ziel, bis 2030 mindestens 40 % des Energiebedarfs aus heimischer Produktion zu decken. Trotz dieser Ansprüche zeigen sich erhebliche strategische Diskrepanzen: Während staatliche Pakete den Bau von Fabriken subventionieren, können diese dennoch kaum mit der chinesischen Überkapazität konkurrieren. Dies führt in Europa zu

Forderungen nach Resilienz-Auktionen, bei denen ein Produzent durch den Nachweis von Diversität in der Lieferkette einen Zuschlag erhält und nicht durch den günstigsten Preis (Europäische Kommission, 2023).

5.3. Das Trilemma der Energiewende: Kosten, Zeit und Sicherheit

Durch die aktuelle geopolitische Lage und Dynamiken stehen Akteure in einem Entscheidungsdilemma, welches sich theoretisch als Trilemma der Energiewende bezeichnen lässt.

Der erste Aspekt des Trilemmas ist die Kosteneffizienz. Wollen Akteure die maximale Ausbaugeschwindigkeit erreichen, so muss auf die billige chinesische Hardware zurückgegriffen werden, welche aber weitere Abhängigkeiten schafft und Profite für China einbringt.

Will ein Akteur auf Abhängigkeiten verzichten zu Gunsten der Sicherheit und Resilienz, so muss er auf Diversifizierung setzen durch die N-1-Strategie, wobei hier der Ausbau und die Innovationsforschung sehr kapitalintensiv sind.

Das letzte Ziel, zwischen dem abgewogen werden muss, ist die Einhaltung der Ziele der Pariser Klimakonferenz bis 2030.

Die Analyse verdeutlicht, dass eine erzwungene Abkehr von China im Jahre 2026 zwangsläufig zu einer Verlangsamung der globalen Dekarbonisierung führen wird. Denn China hat ein „Green Window of Opportunity" geschaffen, welches die Energiewende ökonomisch erst ermöglichte. Eine technologische Entkopplung (Decoupling) aber würde die Kosten der Vermeidung von CO_2-Emissionen massiv erhöhen (Lema, Fu, & Rabellotti, 2020; Liu & Shen, 2025). Das bedeutet, dass die chinesische Dominanz in der solaren GVC paradoxerweise gleichzeitig als Motor, durch die Kostensenkung in der Produktion, sowie als Bremse, durch die geopolitische Blockade, für die globale Energiewende fungiert (Lema, Fu, & Rabellotti, 2020; IEA, 2022).

6. Technische Disruptionen und stoffliche Grenzen: Die Ressourcenproblematik

Obwohl es scheint, dass die chinesische Dominanz kaum Schwachstellen zu bieten hat und der westliche Markt sich auf Ewigkeit abhängig gemacht hat, täuscht der Eindruck. Die

eingeschränkte Verfügbarkeit von kritischen Rohstoffen weist vermehrt die Herausforderungen auf, vor denen China steht, um seine Dominanz sowie globale Ausbauziele aufrechtzuerhalten. Während die bisherige Forschung primär ökonomische Barrieren analysierte, rücken nun mineralische Engpässe in das Zentrum der wirtschaftsgeographischen Forschung.

6.1. Die Silber-Lücke: kritische Abhängigkeiten und technische Pfadwechsel bei Hocheffizienz-Zellen

Ein zentraler technologischer „Bottleneck", der die solare GVC im Frühjahr 2026 herausfordert, ist die Verfügbarkeit und die damit verbundene Preisvolatilität von Silber. Silber wird für die elektrische Kontaktierung der TOPCon- und Heterojunction-Zellen (HJT) aufgrund seiner hervorragenden Leitfähigkeit benötigt und ist bisher alternativlos (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2025). Während die herkömmliche PERC-Technologie mit einer geringeren Menge an Silber pro Watt auskam, erfordern moderne Zelltechnologien eine deutlich höhere Menge an Silberpaste, was den Silberbedarf der PV-Industrie bis 2030 über 30 % der globalen Silberproduktion von 2020 anheben könnte (Cattaneo et al., 2025).

Die chinesischen Akteure kontrollieren ca. 90 % dieser Fertigungskapazitäten und übten einen Nachfragedruck auf den Weltmarkt aus, der einen Anstieg der Rohstoffkosten um über 40 % innerhalb des ersten Quartals 2026 als Folge hatte (Xiao, 2026). Diese Marktentwicklung verdeutlicht das Konzept der Value Capture nochmals. Trotz einer Effizienzsteigerung im Produktionsprozess wird die ökonomische Rente durch steigende Ressourcenkosten beschränkt. Als Reaktion darauf stellen sich die chinesischen Marktführer, wie Longi oder Jinko Solar, im Sinne des Functional Upgradings auf Kupfer-Plattierungsverfahren um, um das teure Silber langfristig zu substituieren (Shaw, 2026).

Für die westlichen Akteure bedeutet dies aber erneut das Risiko eines technologischen Lockins, da fast ausschließlich China die notwendigen Maschinen und Patente für das KupferVerfahren besitzt (Shaw, 2026).

6.2. Polysilizium-Veredelung und die Problematik hochreiner Quarz-Tiegel

Zusätzlich zu der oben diskutierten Silber-Problematik weist auch die Versorgung mit hochreinem Polysilizium geographische Konflikte auf. Das Basiselement Silizium ist zwar global verfügbar, doch die Verarbeitung zu einem hochreinen Solar-Grade-Silizium (9NReinheit) gestaltet sich als extrem energie- und technologieintensiv. 2026 sind weiterhin

über 80 % der globalen Polysilizium-Produktion auf China zurückzuführen, wobei die künstlich niedrig gehaltenen Energiekosten die räumliche Verlagerung in Regionen wie Xinjiang begünstigen (International Energy Agency, 2026; Leyva Martinez & Pierce, 2023).

Zudem wird häufig die Abhängigkeit von hochreinem Quarzglas als entscheidender Produktionsfaktor übersehen. Durch die Notwendigkeit der Quarz-Tiegel für die solare Industrie und die gleichzeitige geographische Verteilung entsteht eine paradoxe GegenAbhängigkeit der chinesischen GVC von westlichen Rohstoffen, da die global qualitativ hochwertigsten Vorkommen an „High-Purity Quartz" (HPQ) fast ausschließlich in den USA (Spruce Pine, NC) abgebaut werden (International Energy Agency, 2026; Domonoske et al., 2024).

Jede Unterbrechung dieser Lieferwege würde den Stillstand der chinesischen Wafer-Produktion bedeuten und verdeutlicht somit die Verwundbarkeit von Single-Source-Strukturen (International Energy Agency (IEA), 2026). Trotz dessen gilt es auch zu erwähnen, dass China 2025 neue HPQ-Vorkommen entdeckt hat. Erste Analysen der Rohstoffe deuten darauf hin, dass diese eine Reinheit von 99,995 % erreichen könnten. China könnte somit mit diesem strategischen Fund die letzte verbleibende Importabhängigkeit von westlichen Rohstoffen schließen (Hart, 2025).

6.3. Die Circular Economy als theoretischer Pfadwechsel: Barrieren und Potenziale

Dadurch, dass in der solaren Industrie verstärkt stoffliche Einschränkungen in der Verfügbarkeit und geographischen Verteilung von Rohstoffen sichtbar werden, wird vermehrt über den Aufbau einer zirkularen Wertschöpfungskette debattiert, mit dem Ziel der Erhöhung der Resilienz.

Durch einen Systemwechsel hin zu großflächigen Recycling-Strukturen beispielsweise können einseitige Abhängigkeiten von Primärrohstoffen minimiert werden (Boschma, 2015; World Economic Forum, 2026). Doch die ökonomische Machbarkeit dieses Konzeptes ist aktuell noch schwer umzusetzen: Da die Kosten für eine Rückgewinnung von hochreinem Silber und Silizium aus Altmodulen im April 2026 weiterhin die Importkosten neuwertiger chinesischer Komponenten übertreffen, scheint dieses theoretische Konzept bislang keinen ökonomischen Mehrwert zu bringen (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2024). Ohne eine

institutionelle Flankierung, etwa durch den Net-Zero Industry Act oder verbindliche Recyclingquoten, bleibt die lineare und china-zentrierte Struktur der GVC bestehen. Diese fortlaufende Abhängigkeit birgt das Risiko von langfristigen Ressourcen-Engpässen bei einer gleichzeitig zunehmenden Geschwindigkeit der globalen Energiewende (World Economic Forum, 2026; Lema, Fu, & Rabellotti, 2020).

7. Strategische Implikationen und Handlungsoptionen für die westliche Industriepolitik

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine strukturelle Dominanz Chinas innerhalb der solaren GVC dargelegt, welche westliche Akteure zu einer grundlegenden Neuausrichtung ihrer Industrie- und Handelsstrategien zwingt. Die USA und Europa stehen vor der Herausforderung, Resilienz innerhalb ihrer Wertschöpfungskette zu stärken, ohne die globale Dekarbonisierung durch Protektionismus zu bremsen.

7.1. Strategische Autonomie durch Diversifizierung: Die N-1-Strategie

Die sog. N-1-Strategie beschreibt ein zentrales Konzept in der modernen wirtschaftsgeographischen Debatte des 21. Jahrhunderts. Das Ziel dieser Strategie ist es, eine absolute einseitige Abhängigkeit von einem Zulieferland – in diesem Fall China – durch den Aufbau alternativer Produktionskapazitäten in Drittstaaten oder im Binnenmarkt zu reduzieren (International Energy Agency, 2026; Zenglein, 2024).

Im europäischen Raum wird dieses Ziel primär über den Net-Zero Industry Act verfolgt. Sogenannte Resilienz-Auktionen stellen hierbei das zentrale Werkzeug dar. In diesen ResilienzAuktionen werden Zuschläge für PV-Großprojekte nicht mehr allein über den niedrigsten Preis vergeben, sondern über qualitative Kriterien, welche die Diversität der Lieferkette, ESGStandards oder auch eine technologische Souveränität sein können (Wolf, 2024). Das Ziel ist es, einen geschützten Marktraum für lokale Produzenten zu schaffen, der es ihnen trotz Kostennachteile erlaubt, Skaleneffekte zu erzielen und global konkurrenzfähiger zu werden (Lema, Fu, & Rabellotti, 2020; International Energy Agency (IEA), 2026).

7.2. Technologische Nischenstrategien: Leapfrogging durch Next-Gen Photovoltaik

Da für europäische und US-amerikanische Marktakteure ein direkter Preiswettbewerb praktisch unmöglich erscheint aufgrund der immensen Sunk-Costs westlicher Anlagen, wird vermehrt

auf die Strategie des technologischen Leapfrogging gesetzt. Hierbei wird nicht versucht, die chinesische Dominanz bei TOPCon-Zellen zu kopieren, sondern der Fokus auf die Förderung neuer Photovoltaik-Technologien gesetzt, insbesondere auf Perowskit-Silizium-Tandemzellen (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2024).

Der strategische Kerngedanke hinter dieser Nischenstrategie ist das Durchbrechen der etablierten Pfadabhängigkeit durch einen technologischen Bruch und somit eine neue GVCStruktur aufzubauen, in der die westlichen Unternehmen über die primären Patente und Prozesskontrollen verfügen (Lema, Fu, & Rabellotti, 2020). Jedoch weist auch dieser Versuch, sich von China zu lösen, Risiken auf. China besitzt durch ihre Industriecluster eine enorme Forschungs- und Entwicklungskapazität, die in der Lage sind, neue westliche Technologien innerhalb kürzester Zeit in die industrielle Massenfertigung zu integrieren (Davidson & Qian, 2026; Extance, 2025).

7.3. Transatlantische Kooperation vs. Globaler Subventionswettlauf

Abschließend stellt sich für die Zukunft die Frage nach einer internationalen Koordination. Denn die US-amerikanischen Local-Content-Maßnahmen des IRA zum Schutz der heimischen Industrie, welche die Ansiedlung von Fabriken in den USA praktisch erzwingen, könnten durch Abwanderung von Kapital zu einer Schwächung der europäischen Solarindustrie führen (Benson & Wong, 2023; Goreichy & Gunter, 2026).

Ein strategischer Ansatz sollte somit über den nationalen Interessen hinaus transatlantische oder gar globale Logiken verfolgen („Climate Club"). Hierbei würden Staaten gemeinsame Handelszonen für saubere Technologien schaffen, um gemeinsam einen Schutzwall gegenüber Akteuren mit unfairen Wettbewerbsvorteilen aufzubauen (Nordhaus, 2015; International Energy Agency, 2026).

Ohne eine institutionelle Koordination bleibt die Gefahr bestehen, dass westliche Bemühungen im „Windschatten" chinesischer Überkapazitäten wirtschaftlich langfristig marginalisiert bleiben (Zenglein, 2024).

8. Fazit: Die solare GVC zwischen ökonomischer Effizienz und geopolitischer Abhängigkeit

Die vorliegende Arbeit untersuchte, inwiefern Chinas Dominanz in der solaren Wertschöpfungskette die globale Energiewende gefährdet oder ermöglicht. Die Analyse der strukturellen, technologischen und handelspolitischen Entwicklungen erlaubt eine differenzierte Beantwortung dieser Frage.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass China sowohl als Motor als auch als Bremse der globalen Energiewende dient.

Als Motor hat die chinesische Industrie die ökonomische Machbarkeit der Pariser Klimaziele erst ermöglicht. Durch Skaleneffekte, vertikale Integration und ein konsequentes Process- und Product Upgrading konnten die Kosten für die Photovoltaik-Hardware massiv gesenkt werden (Lema, Fu, & Rabellotti, 2020). Ohne die wirtschaftliche Gravitation der chinesischen Industriecluster wäre das globale Ausbautempo der PV in den Jahren 2020 bis 2025 nicht realisierbar gewesen.

Gleichzeitig offenbart sich die chinesische Dominanz zunehmend als Bremse, sobald geopolitische und ethische Konflikte auftreten. Die captive Governance hat sich durch die Kontrolle kritischer „Choke-Points" verfestigt (International Energy Agency, 2026). Die Zäsur der Exportreform vom 1. April 2026 verdeutlicht die neue Realität auf einer globalen Skala: Die Energiewende ist nicht länger nur ein ökologisches Projekt, das zur Einhaltung der Pariser Klimaziele dienen soll, sondern ein machtpolitisches Instrument nationaler Industriepolitik. Peking hat durch den Wegfall der Mehrwertsteuerrückerstattung bewiesen, dass es in der Lage ist, den Preis der globalen Dekarbonisierung zu bestimmen, was es dem Westen erschwert, den Wandel ökonomisch vorherzusagen (State Council Information Office of the PRC, 2026). Dabei sei jedoch angemerkt, dass diese Fähigkeit Chinas, den Preis der Dekarbonisierung zu bestimmen, nicht im luftleeren Raum entstanden ist. Man könnte argumentieren, dass der Westen über Jahrzehnte hinweg den Preis der Karbonisierung bestimmt hat, ohne die ökologischen und sozialen Folgekosten fossiler Energieträger einzupreisen. Die heutige Verärgerung über Chinas machtpolitische Position lässt sich insofern auch als Spiegelbild einer historisch asymmetrischen Verteilung wirtschaftlicher Steuerungsmacht lesen, die lediglich den Akteur gewechselt hat.

Der Westen befindet sich in einer tiefen Pfadabhängigkeit, welche ohne Diversifizierung der Wertschöpfungsstufen auch künftige Innovationen in Abhängigkeit verfallen lassen kann. Die Bemühungen der USA und EU, neue Pfade zu kreieren, um sich von China zu lösen, stehen vor der immensen Herausforderung, gegen die Skalierungsmacht und staatlich unterstützten Überkapazitäten Chinas standzuhalten.

Abschließend lässt sich feststellen, dass eine resiliente globale Energiewende im Jahr 2026 eine Abkehr von einem reinen Effizienzparadigma erfordert. Die Erhöhung der Effizienz wird zwangsläufig mit höheren temporären Kosten verbunden sein. Die zentrale Herausforderung wird es sein, die „Resilienz-Prämie" politisch und gesellschaftlich zu legitimieren, um die Abhängigkeit von einer machtbewussten Nation zu überwinden, ohne den Zeitplan des Klimaschutzes zu vernachlässigen.

Die in dieser Arbeit diskutierten „verlorenen Jahre" auf dem Weg zu den Pariser Klimazielen lassen sich dabei nicht allein als Versäumnis der Klima- und Innovationspolitik verstehen. Vielmehr offenbaren sie ein doppeltes strategisches Scheitern des Westens: einerseits eine verfehlte geopolitische Strategie, die die Konzentration kritischer Technologien in einem einzigen Akteur über Jahrzehnte tolerierte, und andererseits eine verfehlte wirtschaftliche Entwicklungsstrategie, die kurzfristige Kosteneffizienz systematisch über langfristige industrielle Resilienz stellte. Die ausgebliebene „Resilienz-Prämie" ist somit weniger ein Marktversagen als ein politisches Versäumnis, dessen Kosten heute sichtbar werden.

Literaturverzeichnis

Arthur, W. B. (1994). Increasing Returns and Path Dependence in the Economy. Ann Arbor: University of Michigan Press.

Arthur, W. B. (1996). Increasing Returns and the New World of Business. Harvard Business Review, S. 100–109.

Benson, E., & Wong, C. (2023). EU and US Cooperation: Climate Clubs and Related Trade Measures. Washington, D.C.: Center for Strategic and International Studies (CSIS).

Boschma, R. (2015). Towards an Evolutionary Perspective on Regional Resilience. Regional Studies, S. 733–751.

Braga, A., Moreira, S., Zampieri, P., Bacchin, J., & Mei, P. (2008). New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review. Solar Energy Materials and Solar Cells, S. 418–424.

Cattaneo, V., et al. (2025). Forecasting silver demand and supply by 2030: Impact of silverintensive photovoltaic cells and sectoral competition. Resources, Conservation and Recycling, 224, 108562. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108562

David, P. A. (1985). Clio and the Economy of QWERTY. The American Economic Review, S. 332–337.

Davidson, M., & Qian, S. (12. März 2026). China's Solar Industry Is in Upheaval – The Effects Will Be Global. Abgerufen von Center for Strategic and International Studies (CSIS): https://www.csis.org/analysis/chinas-solar-industry-upheaval-effects-will-be-global

Domonoske, C., et al. (30. September 2024). A tiny town just got slammed by Helene. It could massively disrupt the tech industry. National Public Radio.

Ember. (23. April 2026). Chinese solar exports double in a month to hit record high amid energy crisis. Abgerufen von Ember: https://ember-energy.org/latest-updates/chinese-solarexports-double-in-a-month-to-hit-record-high-amid-energy-crisis/

Europäische Kommission. (16. März 2023). Netto-Null-Industrie Verordnung. Abgerufen von EUR-Lex: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0161

Europäisches Parlament und Rat der EU. (13. Juni 2024). Verordnung (EU) 2024/1735 zur Stärkung des europäischen Ökosystems der Fertigung von Netto-Null-Technologien. Abgerufen von EUR-Lex: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:02024R1735-20240628

Europäisches Parlament und Rat der EU. (12. Dezember 2024). Verordnung (EU) 2024/3015 über ein Verbot von in Zwangsarbeit hergestellten Produkten auf dem Unionsmarkt. Abgerufen von EUR-Lex: https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/DE/TXT/?uri=OJ:L_202403015

European Solar PV Industry Alliance (ESIA). (2024). ESIA Value Chain Deep Dive: Ingots and Wafers. Brüssel: ESIA.

Extance, A. (August 2025). Why China is leading perovskite solar commercialization. Chemical & Engineering News.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. (13. Februar 2025). Silicon Heterojunction Solar Cells Realized with Record Savings in Silver. Abgerufen von Fraunhofer ISE: https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2025/silicon-heterojunction-solarcells-realized-with-record-savings-in-silver.html

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. (2024). Fraunhofer Lighthouse Project Shows Way For Next-Generation Tandem Solar Cells. Freiburg: ISE.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. (2024). Module Recycling. Abgerufen von Fraunhofer ISE: https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/photovoltaicsmaterials-cells-and-modules/silicon-solar-cells-and-modules/module-recycling.html

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. (2025). Photovoltaics Report. Freiburg: Fraunhofer ISE.

Garud, R., Kumaraswamy, A., & Karnoe, P. (2010). Path Dependence or Path Creation? Journal of Management Studies, S. 760–774.

Gereffi, G. (2018). Global Value Chains and Development: Redefining the Contours of the 21st Century Capitalism. Cambridge: Cambridge University Press.

Gereffi, G., Humphrey, J., & Sturgeon, T. (2005). The Governance of Global Value Chains. Review of International Political Economy, S. 78–104.

Gereffi, G., Pananond, P., Tell, F., & Fang, T. (2025). Navigating industrial policy and global value chains in an area of disruptions. Journal of International Business Policy, S. 207–223.

Goreichy, E., & Gunter, J. (10. Februar 2026). China's overcapacity threatens to reshuffle global industrial bases. Abgerufen von MERICS: https://merics.org/en/comment/chinasovercapacity-threatens-reshuffle-global-industrial-bases

Gunter, J., Brown, A., Chimits, F., Hmaidi, A., Vasselier, A., & Zenglein, M. J. (2025). Beyond overcapacity: Chinese-style modernization and the clash of economic models. Berlin: Mercator Institute for China Studies (MERICS).

Hart, E. (2025). China Moves to Break Free from its Last U.S. Dependencies with a 1.4 Billion High-Purity Quartz Discovery. Indian Defence Review.

Hill, D., & Engel-Cox, J. (2017). Energy Innovation Clusters and their Influence on Manufacturing: A Case Study Perspective. Golden (Colorado): National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Humphrey, J., & Schmitz, H. (2002). How does insertion in global value chains affect upgrading in industrial clusters? Journal of Development Studies, S. 101–140.

IEA. (2022). Special Report on Solar PV Global Supply Chains. Paris: IEA.

IEA. (2025). Global Critical Minerals Outlook 2025. Paris: IEA.

International Energy Agency (IEA). (März 2026). Energy Technology Perspectives 2026. Abgerufen von https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2026/supply-chain-risks-and-industrial-competitiveness

International Energy Agency. (2026). Energy Technology Perspectives 2026: Supply chain risks and industrial competitiveness. Paris: IEA.

Jones, L., Demirkaya, M., & Bethmann, E. (2019). Global Value Chain Analysis: Concepts and Approaches. Journal of International Commerce and Economics.

Kaplinsky, R. (2000). Spreading the Gains from Globalisation: What can be learned from Value Chain Analysis? Brighton: Institute of Development Studies (IDS).

Kavlak, G., McNerney, J., & Trancik, J. E. (2018). Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. Energy Policy, S. 700–710.

Lema, R., Fu, X., & Rabellotti, R. (2020). Green windows of opportunity: Latecomer development in the age of transformation toward sustainability. Industrial and Corporate Change, S. 1193–1209.

Leyva Martinez, S., & Pierce, E. (2023). Turn of the tide? What the entry of Chinese polysilicon to the US means for the American supply chain. Edinburgh: Wood Mackenzie.

Liu, J., & Shen, X. (2025). Global PV supply chains: Costs and energy savings, GHG emissions reductions. Energy Policy.

Markard, J., Raven, R., & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. Research Policy, S. 955–967.

Ministry of Finance of the People's Republic of China. (9. Januar 2026). Announcement on Adjusting the Export Tax Rebate Policy for Photovoltaics and other Products. Abgerufen von https://szs.mof.gov.cn/zhengcefabu/202601/t20260109_3981637.htm

Murphy, L. T., & Elimä, N. (2021). In Broad Daylight: Uyghur Forced Labour and Global Solar Supply Chains. Sheffield: Helena Kennedy Centre for International Justice, Sheffield Hallam University.

Nordhaus, W. (2015). Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy. American Economic Review, S. 1339–1370.

Patel, A. (30. April 2026). China Briefing 30 April 2026: Fossil-fuel's strict controls. Abgerufen von Carbon Brief: https://www.carbonbrief.org/china-briefing-30-april-2026-fossilfuel-strict-controls-el-nino-approaches-why-cleantech-exports-have-surged/

Schreyögg, G., & Sydow, J. (2010). Organizational Paths: Path Dependency and Beyond. Organization Studies, S. 1251–1258.

Shaw, V. (6. Januar 2026). Rising silver prices drive China's LONGi shift to copper-metallized solar cells. Abgerufen von pv magazine International: https://www.pvmagazine.com/2026/01/06/rising-silver-prices-drive-chinas-longi-shift-to-coppermetallized-solar-cells/

State Council Information Office of the PRC. (2026). Press Conference on China's Industrial Development and Global Supply Chain Cooperation. Beijing: SCIO.

Stephenson, S., & Pfister, A.-K. (2016). Who Governs Global Value Chains. Abgerufen von Europäisches Parlament: https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/104075/Presentation_Stephenson_Pfister.pdf

The Silver Institute. (2025). Silver: The Next Generation Metal. Washington, D.C.: The Silver Institute.

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagebau. (2026). International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV). Frankfurt am Main: VDMA.

Wolf, A. (2024). Resilience Auctions for Net-Zero Technologies: Assessing the New Design of the EU Renewable Energy Market. Freiburg: cepInput.

Wood Mackenzie. (7. November 2023). China to hold over 80% of global solar manufacturing capacity from 2023–2026. Abgerufen von Wood Mackenzie: https://www.woodmac.com/press-releases/china-dominance-on-global-solar-supplychain/

World Economic Forum. (Januar 2026). Why a circular economy is key to securing clean energy supply chains. Abgerufen von World Economic Forum: https://www.weforum.org/stories/2026/01/circular-economy-clean-energy-supplychain-critical-minerals/

Wright, T. (1936). Factors Affecting the Cost of Airplanes. Journal of the Aeronautical Sciences, S. 122–128.

Xiao, C. (9. Januar 2026). China to remove export tax rebates for solar PV products in April. Abgerufen von PV Tech: https://www.pv-tech.org/chinas-ministry-of-finance-toremove-export-tax-rebates-for-solar-pv-products-in-april-2026/

Xiao, C. (26. Januar 2026). Scrapping of China's PV export tax rebate prompts panic buying and module price surge. PV Tech.

Zenglein, M. J. (2024). The world's factory strikes back. Berlin: MERICS.

Zenglein, M. J., & Holzmann, A. (2019). Evolving Made in China 2025: China's industrial policy in the quest for global tech leadership. Berlin: Mercator Institute for China Studies (MERICS).