

Weltraumbasierte Energieproduktion

Themenkurzprofil Nr. 66 | Tobias Hungerland | Juni 2023

Als weltraumbasierte Energieproduktion (Space-based Solar Power – SBSP bzw. Solar Power Satellite – SPS) wird die Sammlung von Sonnenenergie im Weltraum und deren Übertragung an Bodenstationen auf der Erdoberfläche bezeichnet.

Ausgehend von ersten theoretischen Überlegungen in den 1960er Jahren und einer über Jahrzehnte währenden unregelmäßigen Auseinandersetzung mit der technischen und ökonomischen Machbarkeit hat das Thema spätestens in den vergangenen 10 Jahren wieder an Bedeutung gewonnen. Dies liegt zum einen an dem Druck, zur Erreichung der Klimaziele den Ausbau der erneuerbaren Energien voranzutreiben. Zum anderen sind in den vergangenen Jahren die Kosten für den Transport von Nutzlasten in den Weltraum deutlich zurückgegangen, sodass die ökonomischen Barrieren für die Realisierung einer weltraumbasierten Energieproduktion gesunken sind.

Eine Anlage zur weltraumbasierten Energieproduktion besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: Eine Raumstation zur Sammlung von Sonnenenergie und Übertragung der Energie zur Erde, was die Umwandlung in eine drahtlos übertragbare Energieform notwendig macht, eine Bodenstation zum Empfang der Energie und Umwandlung in elektrischen Strom sowie ein Trägersystem, um die Komponenten der Raumstation in eine Erdumlaufbahn zu transportieren.

Mit der Realisierung einer weltraumbasierten Energieproduktion sind verschiedene Potenziale verknüpft: Verstetigung der Energieversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen, technische Innovationen für die drahtlose Energieübertragung sowie strategische Autonomie einzelner Nationen bei der Energieversorgung (beispielsweise Reduzierung der Abhängigkeit von Stromimporten). Allerdings ist gegenwärtig noch

unklar, welche Rolle eine weltraumbasierte Energieproduktion bei der Transformation des Energiesystems spielen kann.

Wenngleich vereinzelt Erfolge bei der Erprobung von Teilsystemen, wie etwa der drahtlosen Energieübertragung, erzielt werden konnten, ist eine prototypische Umsetzung des Gesamtsystems bislang noch nicht erfolgt. Aktuell werden Entwicklungen insbesondere in den USA, in China, in Großbritannien und von der Europäischen Raumfahrtagentur (European Space Agency – ESA) vorangetrieben.

Hintergrund und Entwicklungsstand

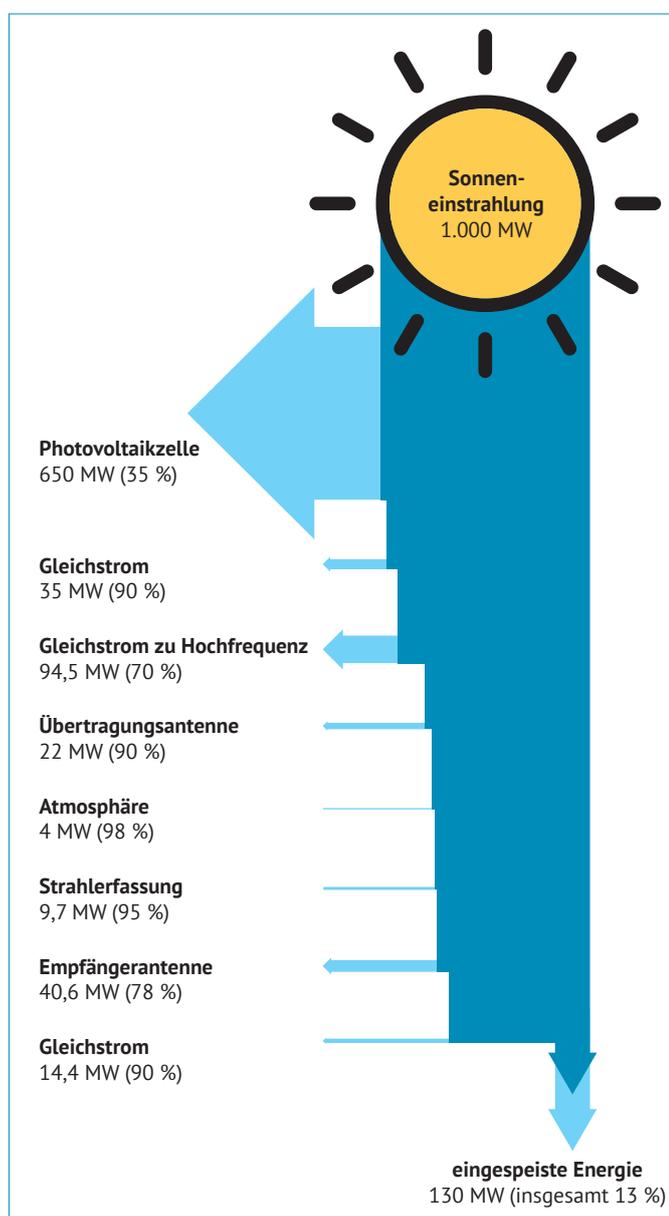
Um die Pariser Klimaziele einhalten zu können, ist die Klimaneutralität bis Mitte des 21. Jahrhunderts ein wichtiges strategisches Ziel zahlreicher Staaten, u.a. auch der Bundesregierung (SPD et al. 2021). Dazu bedarf es eines raschen Ausbaus der erneuerbaren Energien sowie einer schrittweisen Abkehr von fossilen Energieträgern. Zu den erneuerbaren Energien zählt auch die weltraumbasierte Energieproduktion (SBSP/SPS). Dabei handelt es sich um ein bislang überwiegend theoretisches Konzept zur Sammlung von Sonnenenergie im Weltraum und zur drahtlosen Übertragung dieser Energie zu geeigneten Empfangsstationen auf der Erdoberfläche, das aktuell durch eine verstärkte Entwicklungsdynamik gekennzeichnet ist (Clery 2022).

Grundlegende Funktionsweise

Die weltraumbasierte Energieproduktion basiert auf dem Prinzip der Photovoltaik (PV): Sonnenlicht wird mithilfe von Solarmodulen, die sich in einer Umlaufbahn um die Erde befinden, in elektrischen Strom umgewandelt. In einem Konverter wird der Strom in eine drahtlos übertragbare Energieform, z.B. gebündelte Licht- oder Mikrowellen,

transformiert und mittels Übertragungsantenne zu einer Empfangsstation auf der Erdoberfläche transportiert. Dort wird die empfangene Energie erneut in Strom umgewandelt und in ein Stromnetz eingespeist. Der wesentliche Vorteil eines weltraumbasierten Systems gegenüber der Sonnenergieerzeugung auf der Erdoberfläche ist die ununterbrochene Verfügbarkeit von Sonnenlicht ohne Störfaktoren wie Erdatmosphäre, Wolken oder den Tag-Nacht-Wechsel (Voigt 2022b, S.8). Von Nachteil sind der hohe apparative Aufwand und die vielen Umwandlungsschritte, die für den Energietransport zur Erde notwendig sind. Von dem im Weltraum geernteten Solarstrom könnten nur rund 40% auch tatsächlich in das Stromnetz eingespeist werden, der Rest ginge durch Umwandlungs- und Transportverluste verloren (Abb. 1) (Rodenbeck et al. 2021, S.233; Space Energy Initiative 2021, S.6).

Abb. 1 Sankey-Diagramm einer fiktiven Leistungsübertragung mit SPS



Eigene Darstellung nach Rodenbeck et al. 2021, S.233

Erste theoretische Konzepte wurden in den 1960er Jahren entwickelt

Der Ingenieur Peter Glaser der National Aeronautics and Space Administration (NASA) hat 1968 ein erstes Konzept für eine Energieproduktion im Weltraum entwickelt und 1973 patentieren lassen (Caton 2015, S.1.f.; Dudenhofer/George 2000, S.2; Mankins 2011, S.6). Demzufolge sollte eine PV-Anlage im Erdorbit 5 GW an Solarstrom erzeugen und per Mikrowellen zur Erde übertragen (Hader et al. 2022, S.10; Voigt 2022b, S.8). Die Raumstation sollte Ausmaße von 5 x 10 x 0,5 km haben, die erforderliche Übertragungsantenne einen Durchmesser von 1 km (Lin 2002, S.38). Die Masse der Raumstation würde zwischen 10.000 und 18.000 t erreichen (Hader et al. 2022, S.12; Voigt 2022b, S.8). Zum Vergleich: Die Internationale Raumstation (ISS) – das bisher größte von Menschen im Weltraum konstruierte technische Artefakt – hat Ausmaße von rund 109 x 51 x 73 m und ein Gewicht von ca. 450 t. Ihre Fläche umfasst ca. 8.000 m² sowie noch einmal 2.500 m² für die Solaranlage (Voigt 2022a, S.41).

Seit der Patentierung hat es insbesondere in den USA durch die NASA eine Reihe von Untersuchungen zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit gegeben. Zwischen 1977 und 1980 zeigte eine umfassende Untersuchung die enormen Herausforderungen für die Realisierung entsprechender Systeme auf, so insbesondere die hohen Kosten für den Transport des Materials in den Weltraum sowie die schwierige technische Umsetzung von derart großskaligen Projekten (U.S. Department of Energy/NASA 1980).

Rund 20 Jahre später (1997) ließ die NASA erneut die Umsetzung untersuchen. Daraus ergab sich vor allem die Anforderung, dass die Kosten für den Transport in den Erdorbit sinken müssten. 1999 rief die NASA das 2-jährige Programm „Space Solar Power Exploratory Research and Technology“ (SERT) ins Leben, um eine Entwicklungsroadmap zu erstellen. Das SERT-Programm brachte zwar einen nachvollziehbaren Entwicklungspfad hervor, die technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen blieben aber bestehen (Caton 2015, S.7f.), sodass zunächst keine Umsetzung der Entwicklungsroadmap erfolgte.

Aktueller Stand und Entwicklungstreiber

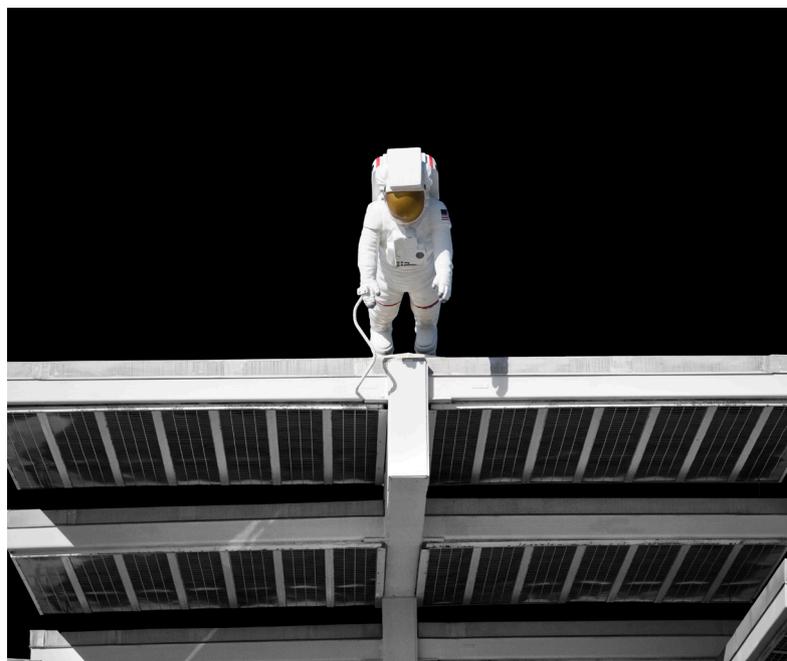
Die Transportkosten für Nutzlasten in den Weltraum sind seit 2010 deutlich gesunken (TAB 2020, S.49f.). Dies und der Druck, die weltweite Energiegewinnung bzw. -erzeugung klimaneutral zu transformieren, führen dazu, dass das Konzept der weltraumbasierten Energieproduktion aktuell wieder ein erstarktes Interesse erfährt. Gegenwärtig finden an verschiedenen Orten weltweit konkrete Entwicklungen statt.

In den USA wird aktuell das Projekt „Space Solar Power Incremental Demonstrations And Research“ (SSPIDR) durchgeführt. Das 180 Mio. US-Dollar teure Vorhaben soll verschiedene, aufeinander aufbauende Technologiedemons-

trationen hervorbringen. Dazu zählen etwa die Erforschung von Materialeigenschaften bei Temperaturschwankungen, wie sie im Weltraum herrschen, oder ein Demonstrationsflug sogenannter Sandwiches Tiles, eines kleinskaligen, integrierten Systems bestehend aus PV-Zellen, einem Energieumwandler sowie einer Übertragungsantenne. Auch Technologien zum Entfalten und Verstauen von Systemkomponenten sowie zur Konstruktion großer Strukturen im Weltraum sollen erforscht werden (AFRL 2022; Rodenbeck et al. 2021, S.247ff.). Technologien zur Energieumwandlung sind Gegenstand der Forschungsmission „Photovoltaic Radio-Frequency Antenna Modul“ (PRAM), deren Ziel es ist, Effizienzsteigerungen bei der Umwandlung von Sonnenenergie in Mikrowellen zu realisieren. Ein Demonstrator wurde über 2 Jahre an Bord des Air-Force-Raumfahrzeuges X-37B getestet (Frazer Nash Consultancy Limited 2021, S.24; NRL 2021; Rodenbeck et al. 2021, S.246 f.). Darüber hinaus erarbeitet das Office of Technology, Policy and Strategy (OTPS) der NASA aktuell eine Analyse der Potenziale von weltraumbasierter Energieproduktion (David 2022; Foust 2022).

In *China* sind nach der Einschätzung von Hader et al. (2022) die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten am weitesten vorangeschritten. Die Realisierung von Systemen für die weltraumbasierte Energieproduktion wird für den Zeitraum von 2035 bis 2050 erwartet (Hader et al. 2022, S.27). Um dieses Ziel zu erreichen, wurden ab 2018 zahlreiche Entwicklungsschritte eingeleitet, etwa die finanzielle und institutionelle Förderung von Testgebieten zur Entwicklung von Teilsystemen der Bodeninfrastruktur oder die Durchführung von Experimenten zur Energieübertragung mittels Mikrowellenstrahlung (Rodenbeck et al. 2021, S.240 f.). Ein prototypisches System zur drahtlosen Energieübertragung soll bereits getestet worden sein. Bei einem Vortrag im Rahmen der International Space Development Conference¹ Ende Mai 2022 wurden aktuelle Konzepte und Entwicklungsroadmaps vorgestellt, aus denen hervorgeht, dass eine Demonstratormission zur Energieerzeugung (Leistung 10 kW) und -übertragung (Distanz 400 km) im Weltraum im Jahr 2026 durchgeführt werden soll, während die Realisierung eines SPS mit einer Leistung von 1 GW für 2050 angestrebt wird (Hou 2022, S.15).

In *Japan* startete – nach Vorarbeiten in den 1980er und 1990er Jahren (JAXA o.J.) – 2001 ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm mit dem Ziel, eine funktionsfähige Anlage bis 2040 in Betrieb zu nehmen. Die geplante Anlage soll eine Leistung von 1 GW erbringen und über zwei je 3 km² große Solarpanele und eine 1 km durchmessende Übertragungsantenne verfügen (Lin 2002, S.38 f.). Seit 2015 werden verschiedene Experimente durchgeführt, mit denen Energie (zwischen 1,8 und 10 kW) per Mikrowellenstrahlung über Distanzen von bis zu 55 m übertragen wur-



de. Auf Basis dieser Forschung wird die Entwicklung einer Solarzelle mit integrierter Übertragungsantenne für 2024 angestrebt (Rodenbeck et al. 2021, S.238 f.).

Auch die *britische* Regierung hat in den vergangenen Jahren ihre Bestrebungen intensiviert, die technologische Reife von Systemen zur weltraumbasierten Energieproduktion zu demonstrieren. Dies geschieht vor dem Hintergrund des politischen Ziels, das Land bis 2050 klimaneutral zu gestalten. Die Entwicklungskosten werden gegenwärtig auf ca. 16 Mrd. britische Pfund geschätzt, also rund 18,2 Mrd. Euro (Frazer Nash Consultancy Limited 2021, S.30). Angestrebt wird, 2035 einen Demonstrator mit einer Leistung von 500 MW in eine Erdumlaufbahn zu bringen (Frazer Nash Consultancy Limited 2021, S.23; Hader et al. 2022, S.27). Eine vollständige Erprobung eines funktionsfähigen SPS mit einer Leistung von 2 GW soll dann zwischen 2036 und 2039 erfolgen (Frazer Nash Consultancy Limited 2021, S.23).

Die ESA (2022a) führte im Dezember 2021 einen internationalen Workshop mit ca. 360 Teilnehmer/innen durch, der das Thema in Europa erstmals seit 2006 wieder in den Fokus rückte und in Verbindung mit dem Ziel der Klimaneutralität bis 2050 brachte. Die im Dezember 2022 gestartete SOLARIS-Initiative stellt eine vorbereitende Maßnahme dar, in deren Rahmen Potenzialanalysen und Konzeptstudien durchgeführt werden sollen, um bis 2025 die Grundlagen für die Entscheidung über ein Entwicklungsprogramm zu legen (ESA 2022b). Zwei Potenzialanalysen wurden bisher durch die ESA gefördert (Frazer Nash Consultancy Limited 2021; Hader et al. 2022). Aktuell hat die ESA die Erstellung zweier Konzeptstudien in Auftrag gegeben, in denen bis Ende 2023 der gegenwärtige Stand sowie der künftige Rahmen für Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der weltraumgestützten Energieproduktion unter Beteiligung europäischer Konsortial-

1 <https://isdc2022.nss.org/> (20.7.2023)

partner aus Forschung und Industrie erarbeitet werden sollen (ESA 2023).

International wird eine Koordination der unterschiedlichen Entwicklungsaktivitäten auf technischer Ebene durch die International Astronautical Federation (IAF) angestrebt (Frazer Nash Consultancy Limited 2021, S.24).

Beschreibung der einzelnen Segmente und deren Funktionsweisen

Im Zuge der langjährigen konzeptionellen Überlegungen wurden verschiedene Ausprägungen von Systemen konzipiert und modelliert (Voigt 2022b, S.8), die grundlegenden Funktionsprinzipien folgen, sich jedoch hinsichtlich einzelner Komponenten teilweise unterscheiden. Üblicherweise werden drei Segmente unterschieden: das Raumsegment, das Trägersystem sowie das Bodensegment (Atul 2015, S.2; Hader et al. 2022, S.7).

Technische Aspekte des Raumsegments

Das Raumsegment bzw. die Raumstation enthält diejenigen technischen Komponenten, mit denen Sonnenenergie gesammelt, umgewandelt und zur Erde übertragen wird. Die gesammelte Sonnenenergie muss noch im All mithilfe eines geeigneten Konverters in eine drahtlos übertragbare Energieform umgewandelt werden. Beim Raumsegment handelt es sich um den technisch komplexesten Bestandteil von Systemen zur weltraumbasierten Energieproduktion.

Positionierung in geostationärer Umlaufbahn

Die meisten Konzepte für SPS sehen eine Position in einer geostationären Umlaufbahn vor: 36.000 km über der Erde (Voigt 2022a, S.12). Dies hat den Vorteil, dass das Raumsegment immer über demselben Punkt auf der Erdoberfläche – der Position der Empfangsantenne – verbleibt. Der Transport von Nutzlasten in eine geostationäre Umlaufbahn, wo sich aktuell überwiegend Kommunikations- und Wettersatelliten befinden (TAB 2020, S.46), ist allerdings

mit erheblichem Energieaufwand verbunden. Zudem sind SPS in geostationären Erdumlaufbahnen einer Gefährdung durch Mikrometeoriten und Weltraumschrott ausgesetzt. Wenngleich die Wahrscheinlichkeit für eine Kollision, verglichen mit Satelliten in erdnahen Umlaufbahnen, geringer ist, kann eine Beschädigung des Systems bis zum Totalausfall führen und damit eine sichere Energieversorgung gefährden (Voigt 2022a, S.47).

Alternative Konzepte in anderen Umlaufbahnen wie erdnahen oder sehr erdfernen Umlaufbahnen (Lagrange-punkt 2) weisen in der Regel Nachteile auf: Während ein SPS in einer erdnahen Umlaufbahn zwar für Konstruktion und Wartung leichter erreichbar wäre, würde ein beträchtlicher Teil der Umlaufbahn im Erdschatten liegen. Außerdem wäre die Energieübertragung aufgrund der gegenüber der Erdoberfläche ständigen Bewegung des Systems eine Herausforderung (Caton 2015, S.35f.; Malaviya et al. 2022, S.42478). Auch bestünde das Risiko einer Lichtverschmutzung (Space Energy Initiative 2021), wie sie etwa bereits heute durch im Aufbau befindliche Satellitenkonstellationen verursacht wird (Lawler et al. 2022).

Ein Konzept, bei dem ein SPS auf einem Lagrange-punkt (L2) in 1,5 Mio. km Entfernung von der Erde stationiert würde, wäre im Vergleich zu einem SPS in einer geostationären Umlaufbahn um ein Vielfaches aufwendiger zu realisieren (Mankins 2011, S.29f.).

Zwei unterschiedliche Konzepte zur Sammlung von Sonnenlicht

Zur Sammlung von Sonnenlicht im Weltraum kommen Bündelungs- und Nichtbündelungskonzepte infrage. Bündelungskonzepte nutzen große Spiegel, die das Sonnenlicht sammeln und auf einen Kollektor fokussieren. Nichtbündelungskonzepte hingegen nutzen größere Kollektoren und keine Spiegel (Hader et al. 2022, S.10; Voigt 2022b, S.8). Der Vorteil von Bündelungskonzepten ist, dass weniger Material in den Weltraum transportiert werden

Tab. 1 Überblick über ausgewählte Konzepte und deren Charakteristika

Bündelungskonzepte	NASA Sun Tower	250	3.534	0,07	USA
	SPS-Alpha	2.081	9.192	0,23	USA
	JAXA M-SSPS	1.000	10.000	0,10	Japan
Nichtbündelungskonzepte	NASA Reference Model	5.000	51.100	0,10	USA
	MMR-SPS	1.000	10.000	0,10	China

Eigene Zusammenstellung nach Voigt 2022b, S. 9 ff.

muss, da sie bezogen auf den Materialeinsatz eine höhere Leistungsdichte – zwischen 0,2 und 1 kW/kg – als Nichtbündelungskonzepte (zwischen 0,1 und 0,2 kW/kg) erreichen (Voigt 2022b, S.11). Von Nachteil ist allerdings die hohe Temperaturentwicklung am Kollektor, die durch ein geeignetes Kühlsystem kontrolliert werden muss (Mankins 2011, S.60). Tabelle 1 fasst die wesentlichen Merkmale ausgewählter Konzepte zusammen.

Die für die unterschiedlichen Konzepte erforderlichen Technologien – Solarkollektoren und Reflektoren – sind im Wesentlichen bereits vorhanden (Voigt 2022a, S.58). Die Effizienz von PV-Kollektoren ist kontinuierlich gestiegen, während die Herstellungskosten zurückgegangen sind (Clery 2022, S.238). In Labortests werden heute Effizienzwerte von bis zu 45 % erreicht (Voigt 2022a, S.29f.), verglichen mit 10 bis 25 % bei herkömmlichen PV-Anlagen. In Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wird sich derzeit u.a. damit beschäftigt, das Gewicht von Kollektoren zu reduzieren und Systeme zur Energieumwandlung zu integrieren (Gosavi et al. 2021, S.17). Für die industrielle Produktion geeigneter Reflektoren, z.B. Heliostats², bestehen bereits die erforderlichen Erfahrungen (Voigt 2022a, S.35f.).

Ansätze zur drahtlosen Energieübertragung

Als primäre Wege zur drahtlosen Energieübertragung über die genannte Distanz von 36.000 km werden entweder Mikrowellen oder sichtbares Laserlicht erforscht (Caton 2015, S.16; Hader et al. 2022, S.10; Voigt 2022b, S.13). Eine Energieübertragung mittels hochfrequenter Mikrowellen (zwischen 2 und 5,8 GHz ; Dhinakaran/Arul Daniel 2021, S.3) zeichnet sich im Vergleich zur Übertragung mittels Hochleistungslaser durch einen höheren Wirkungsgrad aus. Demgegenüber können aufgrund der deutlich kürzeren Wellenlängen beim Laserlicht Größe und Masse des Sendesystems reduziert werden (Caton 2015, S.16; Voigt 2022a, S.57). Während Mikrowellen von einer Hochfrequenzempfangsantenne (Rectenna) auf der Erdoberfläche empfangen werden, können bei der Energieübertragung mittels Hochleistungslaser herkömmliche PV-Module genutzt werden (Hader et al. 2022, S.10). Laserlicht ist jedoch im Gegensatz zu Mikrowellen anfällig gegenüber Einflüssen der Erdatmosphäre wie Wolken, Regen oder Nebel, was zu Übertragungsverlusten führt (Malaviya et al. 2022, S.42482f.; Rodenbeck et al. 2021, S.230). Daher wird bei den meisten bisher entwickelten Konzepte eine Energieübertragung mittels Mikrowellen bevorzugt (Voigt 2022b, S.9ff.). Seit 2016 nehmen diesbezügliche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten weltweit zu und für 2023 sind mehrere Technologiedemonstrationen in der Erdumlaufbahn geplant (Rodenbeck et al. 2021).

Die einzelnen Bestandteile eines Energiekonvertersystems zur Umwandlung der Sonnenenergie in Mikrowellen sind

größtenteils bereits verfügbar. Einzig bei der Verstärkertechnologie besteht noch Anpassungsbedarf, um die Effizienz der Energieübertragung zu maximieren (Voigt 2022a, S.36). Als Übertragungseinheit dient eine Sendeantenne, die Mikrowellen möglichst verlustfrei übertragen soll (Gosavi et al. 2021, S.18). Die meisten bisherigen Systemkonzepte beinhalten sehr große und schwere Sendesysteme, sodass im Bereich Miniaturisierung und Leichtbau noch Optimierungspotenziale bestehen (Voigt 2022a, S.38f.). Eine Lösung können Sandwichkacheln sein, bei denen eine Seite von PV-Zellen bedeckt ist und die andere Seite als Übertragungsantenne genutzt wird (Clery 2022, S.239).

Merkmale von Konstruktion, Wartung und Betrieb

Die serielle Massenfertigung der Komponenten, beispielsweise von einzelnen kleinen Spiegeln, aus denen später ein großer Reflektor entstehen soll, kann auf der Erde erfolgen. Die einzelnen Bestandteile des Raumsegments müssen im Weltraum zu einem Gesamtsystem zusammengefügt werden, wozu zusätzlich ein Gerüst nötig ist (Voigt 2022b, S.13). Je nach Systemkonfiguration kann ein SPS aus mehreren Millionen einzelner Komponenten bestehen, die im All von tausenden autonom arbeitenden robotischen Systemen (Roboterarme) zusammengebaut werden müssten. Derartige Größenordnungen wurden bislang noch nicht praktisch realisiert (Voigt 2022a, S.40f.).

Neben der Konstruktion sind der Betrieb – insbesondere die Wartung bzw. die Instandhaltung – sowie die Außerbetriebnahme am Ende des Lebenszyklus Bestandteil des Raumsegments. Bislang bestehen Erfahrungen mit Betrieb, Wartung und Außerbetriebnahme von technischen Infrastrukturen im Weltraum vor allem im Hinblick auf verschiedene Raumstationen, wie beispielsweise die russische MIR (Betrieb von 1986 bis 2001), die ISS (Betrieb seit 1998) oder die chinesische Raumstation (Betrieb seit 2022). Auch Satelliten oder Weltraumteleskope, wie beispielsweise das Hubble-Teleskop, sind Gegenstand von Anstrengungen, mittels geeigneter Wartungstechnologien wie robotischer Systeme die Lebensdauer zu verlängern, um u.a. den Auswirkungen der Weltraumstrahlung (z.B. im Van-Allen-Gürtel)³ entgegenzuwirken. Üblicherweise handelt es sich dabei um Wartungseinsätze im erdnahen Weltraum (rd. 200 bis 2.000 km) – ein SPS in einer geostationären Erdumlaufbahn (rund 36.000 km) ist hingegen deutlich weiter entfernt und dementsprechend nur mit erheblichem Aufwand für Wartungseinsätze zu erreichen.

Technische Aspekte von Trägersystemen

Das Trägersystem besteht aus Raketen oder Raumfähren, mit denen die erforderlichen technischen Komponenten des Raumsegments in den Weltraum zu ihrer jeweiligen Erdumlaufbahn transportiert werden. Zum Transport großer Nutzlasten in unterschiedliche Erdumlaufbahnen wer-

2 Heliostats sind Spiegel, die Sonnenlicht immer auf einen spezifischen Punkt konzentrieren.

3 Strahlungsgürtel aus geladenen Elementarteilchen rund um die Erde.

den Schwerlastträgerraketen eingesetzt. Zu den aktuell bzw. bald verfügbaren Systemen gehören die europäischen Raketen Ariane 5 und Ariane 6 sowie die US-amerikanischen Trägersysteme Falcon 9, Falcon Heavy und Starship (Tab. 2). Letztgenannte sind teilweise wiederverwendbar, was ein mit zu berücksichtigender Faktor bei der Kalkulation der Transportkosten ist (Voigt 2022a, S.13).

Die einzelnen Segmente können mit Trägerraketen in verschiedene Umlaufbahnen gebracht werden. Eine Schwerlastträgerrakete, die ein Modul des SPS in eine geostationäre Umlaufbahn (Geostationary Orbit – GEO) transportieren soll, muss deutlich mehr Energie aufbringen als ein vergleichbarer Transport in eine niedrige Erdumlaufbahn (Low Earth Orbit – LEO), etwa zur ISS. Weiterhin besteht die Möglichkeit, neben einer Platzierung in einem LEO oder direkt im GEO Segmente des SPS auf einem geostationären Transferorbit (Geostationary Transfer Orbit – GTO) zu platzieren und sie von dort mit Raumschleppern auf ihre endgültige Umlaufbahn zu transportieren und zusammensetzen. Derartige Technologien sind bislang allerdings noch in einem frühen Entwicklungsstadium (Voigt 2022a, S.58). Alternativ dazu – zulasten der Systemkomplexität – könnte ein SPS auch mit einem eigenen Triebwerks- und Navigationssystem ausgestattet werden, um den erforderlichen Transfer von einer LEO bzw. GTO in eine GEO zu realisieren (Voigt 2022a, S.20 ff.).

Während in der Vergangenheit insbesondere die Kosten für den Transport von Nutzlasten in den Weltraum prohibitiv hoch gewesen sind, ist es der zunehmenden Privatisierung von Raumfahrtaktivitäten zu verdanken, dass innovative, wiederverwendbare Trägerraketen entwickelt wurden, die zu einem deutlichen Rückgang der Transportkosten führten (ESA 2022a; TAB 2020). Aktuell sind diese Kosten bereits auf rund 1.500 US-Dollar pro kg Nutzlast in eine niedrige Erdumlaufbahn gesunken (Roberts 2022). Damit eine weltraumbasierte Energieproduktion mit der Sonnenenergieproduktion auf der Erdoberfläche wettbewerbsfähig werden kann, müssen die Transportkosten allerdings weiter auf unter 1.000 US-Dollar pro kg für eine geosta-

tionäre Erdumlaufbahn sinken (Voigt 2022a, S.19 u. 22; 2022c, S.13). Dahin ist es noch ein weiter Weg.

Technische Aspekte von Bodenstationen

Das Bodensegment bzw. die Bodenstation umfasst Empfangssysteme für die Mikrowellen, Systeme zur Energieumwandlung und Netzeinspeisung sowie Kontrollsysteme für das Gesamtsystem (Hader et al. 2022, S.7; White et al. 2022, S.22).

Im ursprünglich von Glaser vorgeschlagenen Konzept sollte die Empfängerantenne (Rectenna; Rectifying Antenna, Frazer Nash Consultancy Limited 2021, S.14; Rodenbeck et al. 2021, S.234f.) eine Ausdehnung von 10 x 13 km haben, um eine Leistung von 5 GW zu empfangen (Lin 2002, S.38; U.S. Department of Energy/NASA 1980, S.143). Eine Rectenna dieser Größenordnung wurde bislang noch nicht realisiert. Aktuell gibt es lediglich Versuchsanordnungen, wie beispielsweise die „Sura Ionospheric Heating Facility“ oder das „High-frequency Active Auroral Research Program“ (HARP) mit einer Fläche von 0,13 km² (Voigt 2022a, S.49). Glaser kalkulierte seine Empfangsstation für eine verwendete Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz – höhere Frequenzen ermöglichen jedoch kleinere Empfangsstationen (Lin 2002, S.38). Bezogen auf den Flächenverbrauch wird die Leistungsdichte einer weltraumbasierten Energieproduktion rund dreimal höher eingeschätzt als bei der bodengestützten Sonnenenergienutzung (29 W/m² für SPS gegenüber 10 W/m² für herkömmliche PV-Anlagen)⁴ (Frazer Nash Consultancy Limited 2021, S.17; Hader et al. 2022, S.25).

Eine Rectenna besteht aus einer großen Anzahl an einzelnen Dioden, die in einem Abstand von etwa 10 cm gitterartig angebracht und miteinander vernetzt sind. Auf einer geeigneten Trägerkonstruktion kann die Empfangsantenne sowohl an Land als auch auf der Meeresoberfläche konstruiert werden (Voigt 2022a, S.49; White et al. 2022, S.22).

4 Über das Jahr gemittelte PV-Leistungsdichte für einen Standort im Vereinigten Königreich.

Tab. 2 Überblick über verfügbare und potenziell verfügbare Schwerlastträgersysteme inklusive Nutzlastkapazität

Ariane 5	ArianeGroup	LEO: 16/GTO: 10,9	160 Mio. Euro
Falcon 9	SpaceX	LEO: 16/GTO: 5,5	61 Mio. Euro
Falcon 9 Heavy	SpaceX	LEO: 63,8/GTO: 26,7	82 Mio. Euro
Ariane 6	ArianeGroup	LEO: 21,6/GTO: 12	n/a
Starship	SpaceX	LEO: 100/GTO: 21–40	10 Mio. Euro

Eigene Zusammenstellung nach Voigt 2022a, S. 13 ff.

Zudem ist vorstellbar, dass die erforderliche Fläche doppelt genutzt wird, da eine lichtdurchlässige Konstruktion eine landwirtschaftliche Nutzung oder die Installation von PV-Modulen nicht ausschließt. Auch bereits existierende PV-Anlagen könnten um die Empfangsstation erweitert werden, sodass bereits zur Energieerzeugung bebaute Flächen genutzt werden könnten (Landis 2004, S.10; Mankins 2011, S.48 f.).

In der Regel wandeln Energiekonverter die empfangenen Mikrowellen von Gleichstrom in Wechselstrom um, der dann in die Netzinfrastruktur eingespeist wird (White et al. 2022, S.22).

Ein weiteres Element der Bodenstation ist das Kontrollsystem, mit dem der SPS gesteuert und die Kommunikation zwischen den einzelnen Systemelementen gewährleistet wird. Vergleichbare Kontrollsysteme sind bereits heute weltweit im Einsatz und dienen der Kontrolle u.a. von Wetter- und Telekommunikationssatelliten (White et al. 2022, S.22). Um die Übertragungsantenne des Raumsegments auf das richtige Ziel ausrichten zu können, muss ein retrodirektiver Leitstrahl⁵ ausgesendet werden (Frazer Nash Consultancy Limited 2021, S.14; White et al. 2022, S.22).

Zusammenfassung des aktuellen Stands der Technik

Die Autor/innen verschiedener aktueller Studien, die sich mit der technischen Machbarkeit von weltraumgestützter Sonnenenergie auseinandersetzen, kommen übereinstimmend zum Ergebnis, dass die erforderlichen Technologien allesamt vorhanden sind (Frazer Nash Consultancy Limited 2021, S.33; Voigt 2022b, S.12). Allerdings fehlen bislang vor allem noch der Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Bereich der Kollektoren, der Drahtlosübertragung von Mikrowellen über große Distanzen, der Leichtbauweise sowie

insbesondere die Demonstration eines Gesamtsystems. Schließlich sind einzelne Technologien noch nicht in den erforderlichen Größenordnungen verfügbar (Tab. 3).

Gesellschaftliche und politische Relevanz

Wettbewerbsfähige Umsetzung ist möglich

Zu den bereits genannten technischen Herausforderungen für die Umsetzung von Systemen der weltraumbasierten Energieproduktion kommen ökonomische Aspekte hinzu. Neben den eigentlichen Kosten für die Realisierung der Systeme spielen auch Energiekosten, Energienachfrage sowie die Möglichkeit, unterschiedliche geografische Märkte mit einem Raumsegment zu bedienen (Landis 2004, S.2 ff.), eine Rolle bei der Bewertung der ökonomischen Potenziale.

Jüngere Analysen⁶ im Auftrag der ESA, wie beispielsweise von White et al. (2022), zeigen, dass für ein System mit einer Leistung von 1,4 GW – dies entspricht in etwa der Leistung eines Atomkraftwerks (NDR 2018) – Betriebskosten zwischen 2,5 und 3,5 Mrd. Euro (1,7 bis 2,4 Mrd. Euro/GW) für eine 30-jährige Betriebsdauer veranschlagt werden können. Hinzu kommen Investitionskosten zwischen 4,8 und 9,8 Mrd. Euro, entsprechend 3,3 bis 6,8 Mrd. Euro/GW (White et al. 2022, S.27). Die Entwicklungskosten werden mit bis zu 16 Mrd. Euro über einen etwa 20-jährigen Entwicklungszeitraum veranschlagt (White et al. 2022, S.30).

Andere Analysen, ebenfalls im Auftrag der ESA, etwa von Voigt (2022a), zeigen ähnliche Schlussfolgerungen hinsichtlich der erwartbaren Entwicklungs-, Investitions- und Betriebskosten für ein System mit 2 GW Leistung, die sich in einem Bereich von 8 bis 33,4 Mrd. Euro bewegen (4 bis 16,7 Mrd. Euro/GW) und jeweils eine optimistische sowie eine pessimistische Schätzung darstellen (Voigt 2022a, S.55 f.).

Mit Blick auf Energiekosten zeigen weitere Analysen im Ergebnis, dass eine weltraumbasierte Energieproduktion wettbewerbsfähig im Vergleich zu den Kosten für andere Energieträger realisiert werden kann (White et al. 2022, S.34; Wilson et al. 2020). So werden die Kosten für weltraumbasierte Solarenergie zwischen 88 und 155 Euro/MWh geschätzt. Im Vergleich dazu lagen 2021 die Kosten für die Stromerzeugung aus fossilen Energiequellen in Deutschland zwischen 78 und 130 Euro/MWh für Gas, für Braunkohle zwischen 100 und 150 Euro/MWh sowie für Steinkohle zwischen 110 und 200 Euro/MWh. Die Kosten für erneuerbare Energien bewegten sich ab 31 Euro/MWh für Freiflächen-PV über 40 bis 83 Euro/MWh für Onshore-



5 Ein retrodirektiver Leitstrahl ist ein Richtungssignal, das aus derselben Richtung zurückgeworfen wird, in die es gesendet wird.

6 Die unterschiedlichen Ergebnisse der zitierten Analysen resultieren aus den jeweils zugrunde liegenden Annahmen über die Ausgestaltung des Systems, der Realisierung von Einsparpotenzialen durch Serienfertigung, der Entwicklung, Skaleneffekte sowie weitere, z.T. auch qualitative, Faktoren.

Tab. 3 Schlüsseltechnologien und Reifegrad für SPS

Grundlagentechnologien	Technologiereifegrad (Weltraumnutzung)	aktueller Entwicklungsstand
km ² große Spiegel im Weltraum	2 bis 3	< 10 m
hocheffiziente (> 40 %) Dünnschicht-PV-Anlagen	6 bis 7	30 bis 35 %
hochkonzentrierende PV im Weltraum	3	bislang nur auf der Erdoberfläche genutzt; benötigen Wasserkühlung, um vor Überhitzung zu schützen
drahtlose Energieübertragung mittels Laser	2 bis 3	Demonstration auf der Erdoberfläche über eine Distanz von 1 km im kW-Bereich; militärische Anwendungen im 30-kW-Bereich
drahtlose Energieübertragung mittels Hochfrequenz-Mikrowellen	2 bis 3	Demonstration auf der Erdoberfläche über eine Distanz von 1,5 km mit einer Leistung von 35 kW und einer Effizienz von 82 %
Wärmemanagement für Satelliten	5	Radiatoren der ISS können bis zu 70 kW überschüssige Wärme in den Weltraum abgeben; Hochskalierung in den MW-Bereich erforderlich.
Leichtbauweise für großskalige Strukturen im Weltraum	3	Konzeptstadium; bislang keine Technologiedemonstration von Konstruktionen großskaliger Strukturen im Weltraum erfolgt
Orbitalstationierung für große Raumstationen	6	Erfahrungen der ISS (ca. 450 t Gewicht) vorhanden; das Teilsystem für Fluglage- und Bahnregelung muss für Stationen mit einer Masse im Kt-Bereich hochskaliert werden.
Wartung im Weltraum	4 bis 6	autonome, robotische Wartung bislang nicht demonstriert
Konstruktion im Weltraum	3	Einzelne Module der ISS wurden im Orbit zusammengesetzt.
Außerbetriebnahme von Satelliten	2	bislang keine etablierte Methode für die Außerbetriebnahme von Satelliten

Eigene Zusammenstellung nach Voigt 2022b, S.12

windkraft sowie zwischen 72 und 121 Euro/MWh für Offshorewindkraft (Kost et al. 2021, S.2 f.).

Darüber hinaus lassen sich auch weitere positive Implikationen hervorheben. Da in allen Technologiebereichen noch zum Teil erhebliche Weiterentwicklungen erforderlich sind, besteht das Potenzial, dass Spill-over-Effekte für andere Industriebereiche entstehen, etwa in den Bereichen Robotik oder drahtloser Energieübertragung. Damit einhergehend können positive Beschäftigungseffekte entstehen (Roland Berger GmbH/OHB Systems AG 2022, S.72).

Gesellschaftliche Akzeptanz und ökologische Folgen

Neben technischen und ökonomischen Herausforderungen sind bis zur Realisierung eines Systems zur weltraumba-

sierten Energieproduktion weitere Herausforderungen zu bewältigen. Diese betreffen u.a. die Gewährleistung der Sicherheit der einzelnen technischen Komponenten, z.B. vor Sabotageakten. Die Bodenstation und die Kommunikationssysteme müssten außerdem vor Naturkatastrophen oder Unfällen geschützt werden. Zu den Sicherheitsmaßnahmen gehörten beispielsweise die Umzäunung der großflächigen Empfangsstationen, Überwachungssysteme oder auch die Verschlüsselung und redundante Gestaltung der Kommunikationssysteme.

Ein wichtiger Aspekt ist die Sicherheit für Mensch und Umwelt im Bereich der Empfangsstationen (White et al. 2022, S.25). Hinsichtlich der Wirkungen von Mikrowellenstrahlung auf Menschen sowie auf die Pflanzen- und Tierwelt besteht noch Forschungsbedarf, insbesondere bei

langfristiger Exposition (Dhinakaran/Arul Daniel 2021, S.3; Space Energy Initiative 2021, S.3). Die Mikrowellenstrahlung wirkt zwar nicht ionisierend, kann aber durch die Erwärmung von organischem Gewebe Schäden verursachen (ESA o.J.). Der Frequenzbereich der eingesetzten Mikrowellenstrahlung ist vergleichbar mit dem von 5G-Mobilfunknetzen (BMUV o.J.). Die Intensität der Strahlung an der Empfangsantenne variiert vom Zentrum des Strahls (hohe Intensität; ca. 245 W/m²) bis zum Rand (niedrigere Intensität; ca. 10 W/m²). Zum Vergleich: Der Grenzwert der EU für gesundheitliche Wirkungen bei Mikrowellen mit einer Frequenz ab 6 GHz liegt bei 50 W/m² (Richtlinie 2013/35/EU⁷). Bislang allerdings sind die gesundheitlichen Auswirkungen von Mikrowellenstrahlung auf den menschlichen Organismus noch weitgehend unerforscht (Space Energy Initiative 2021, S.4).

Die Klärung der Frage nach möglichen gesundheitlichen Auswirkungen einer drahtlosen Energieübertragung vom Raumsegment auf die Erdoberfläche ist ein bedeutender Aspekt für die gesellschaftliche Akzeptanz für solche Vorhaben. Darüber hinaus stellt die Einrichtung der Empfangssysteme einen erheblichen Eingriff in das Erscheinungsbild der Landschaft dar. Zwar kann auf Basis bisheriger Konzeptionen davon ausgegangen werden, dass eine Empfangsstation ein mit großen Solarparks vergleichbares Erscheinungsbild aufweisen würde (Hader et al. 2022, S.25), allerdings wäre deren Ausdehnung um ein Vielfaches größer.

Um die gesellschaftliche Akzeptanz zu erhöhen, könnten als geeignete Standorte für Empfangsstationen vor allem solche Gebiete in Betracht gezogen werden, die dünn besiedelt sind, aber dennoch gute Anschlussmöglichkeiten an existierende Stromnetze bieten (Roland Berger GmbH/OHB Systems AG 2022, S.57). Auch Standorte auf dem Meer, vergleichbar mit Offshorewindparks, können infrage kommen.

Für die gesellschaftliche Akzeptanz spielt schließlich auch die Frage eine Rolle, ob ein solches System als Waffe eingesetzt werden könnte (Caton 2015, S.31f.). Neben möglichen gesundheitsschädlichen Wirkungen im Zentrum des Strahls böten sich im Kontext einer Dual-Use-Nutzung weitere militärische Einsatzfelder an, beispielsweise die Energieversorgung von militärischer Infrastruktur. Von Bedeutung ist der Aspekt, unter welcher Kontrolle ein SPS steht, wodurch die weltraumbasierte Energieproduktion auch eine sicherheitspolitische Relevanz erhält (Pagel 2022).

⁷ Richtlinie 2013/35/EU über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder) (20. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG) und zur Aufhebung der Richtlinie 2004/40/EG



Die Realisierung von Systemen für eine weltraumbasierte Energieproduktion geht mit erheblichen ökologischen Implikationen einher. Zu nennen ist hier der erhoffte Beitrag zur Dekarbonisierung des Energiesystems. Dabei müssen die Treibhausgasemissionen, die über den gesamten Lebenszyklus eines Systems entstehen, betrachtet und ins Verhältnis zu den Emissionen aus deren Formen der erneuerbaren Energiegewinnung gesetzt werden. Wilson et al. (2020) kommen beispielsweise zu dem Ergebnis, dass ein SPS weniger Treibhausgasemissionen pro KWh verursacht als fossile Energieträger, aber im Vergleich zu erneuerbaren Energien aus PV-Anlagen, Geothermie, Biogas oder Wind- und Wasserkraft schlechter abschneiden würde (Wilson et al. 2020, S.12). Ähnliches findet sich auch in anderen Quellen, z.B. bei Roland Berger GmbH/OHB Systems AG (2022, S.72f.). Bei der Bewertung der Umwelteffekte ist eine Vielzahl von Faktoren zu berücksichtigen, so insbesondere die baubedingten Umweltauswirkungen durch die vielen notwendigen Raketenstarts und den hohen Ressourcenverbrauch, aber auch der Flächenverbrauch für die Bodenstationen oder mögliche Auswirkungen der Mikrowellenstrahlung auf die Atmosphäre (Voigt 2022c, S.19f.). Aufgrund des noch frühen Entwicklungsstandes sind jedoch noch viele Fragen bezüglich der konkreten Umwelteffekte unbeantwortet.

Bedeutung der weltraumbasierten Energieproduktion für die Energie-, Geo- und Industriepolitik

So wie weltweit schreiten auch in Deutschland der Aus- und Umbau des Energiesystems voran. Mit dem Ausstieg aus der Kernenergie zum 15. April 2023, dem geplanten Kohleausstieg bis spätestens 2038 und nicht zuletzt aufgrund der Umwälzungen auf den Energiemärkten infolge des Krieges in der Ukraine wird der Ausbau erneuerbarer Energien hierzulande vorangetrieben. Allerdings geschieht dies nicht ohne Herausforderungen und gegenwärtig nicht mit der Geschwindigkeit, die für ein Erreichen der Klimaziele erforderlich wäre. Vor diesem Hintergrund ist zu prüfen, ob bzw. welchen Beitrag eine weltraumbasierte Ener-

gieproduktion zur Energiewende in Deutschland spielen könnte.

Die Transformation hin zu erneuerbaren Energien geht mit einem Umbau des Energiesystems einher, der es ermöglicht, immer höhere Anteile an volatiler Energieerzeugung durch Wind und PV zu integrieren. Wesentliche Charakteristika des Energiesystems der Zukunft sind daher Dezentralisierung, flexible Erzeuger und Verbraucher, Sektorkopplung sowie Nutzung von Speichertechnologien. Im Vergleich dazu werden die Vorteile der weltraumbasierten Energieproduktion in der Bereitstellung einer zentralen und stabilen Grundlastversorgung mit erneuerbaren Energien gesehen (Frazer Nash Consultancy Limited 2021; Harder et al. 2022). Es stellt sich daher die Frage, welche Rolle solche Systeme in einem transformierten Energiesystem noch spielen könnten, in dem große Grundlastkraftwerke nicht mehr vorgesehen sind. Als mögliche Anwendungsszenarien kommen beispielsweise die Versorgung energieintensiver Industrieanlagen mit stabiler Stromnachfrage oder die Produktion von grünem Wasserstoff infrage.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Auseinandersetzung mit den Potenzialen einer weltraumbasierten Energieproduktion eine Rolle spielt, ist die erforderliche Entwicklungszeit, bis solche Systeme überhaupt einen Beitrag zur Energieversorgung und -unabhängigkeit von Lieferanten leisten könnten. Bislang zeichnet sich ab, dass die unterschiedlichen aktiven Akteure funktionsfähige SPS frühestens in den 2040er Jahren realisieren könnten. Möglicherweise kommt der Beitrag der weltraumbasierten Energieproduktion zur Erreichung der Klimaneutralität somit zu spät.

Obwohl ein kurzfristiger Beitrag einer weltraumbasierten Energieproduktion zur Energiewende in Deutschland also eher unwahrscheinlich ist, sollte Deutschland die weitere Entwicklung dennoch aktiv begleiten. Entsprechende Vorhaben dürften angesichts ihrer Größenordnung nur im Rahmen der internationalen Kooperation umsetzbar sein, sodass ihre Realisierung auch von geopolitischer Bedeutung ist. Deutschland ist bei entsprechenden Entwicklungen als Akteur im Rahmen der europäischen Raumfahrtaktivitäten vertreten und kann die Umsetzung auf europäischer Ebene maßgeblich mitgestalten. Ein europäisches System zur weltraumbasierten Energieproduktion könnte dazu beitragen, dass auch andere Länder mit erneuerbarer Energie versorgt werden können (Harder et al. 2022, S.24). Zudem können sich für Deutschland auch industriepolitische Implikationen ergeben, denn die deutsche Raumfahrtindustrie ist als Systementwickler entscheidend an der Umsetzung von Raumfahrtprojekten beteiligt. Demzufolge könnte eine Technologieführerschaft für einzelne Schlüsseltechnologien erreicht werden, etwa im Bereich Robotik.

Mögliche vertiefte Bearbeitung des Themas

Das Kurzprofil sowie die weiterführende Literatur ermöglichen einen umfassenden Überblick über die wesentlichen internationalen Entwicklungsvorhaben sowie die technischen Komponenten und deren jeweiligen Entwicklungsstand. Ebenso werden die zu lösenden Herausforderungen dargelegt. Bisher wurden noch keine Konzepte für eine weltraumbasierte Energieproduktion realisiert. Allerdings werden konkrete Umsetzungsvorhaben von verschiedenen Nationen mit zum Teil sehr ambitionierten Zielsetzungen vorangetrieben. In Deutschland besteht über die Beteiligung an den Entwicklungsvorhaben der ESA eine direkte Anschlussfähigkeit an das Thema. Angesichts der gewaltigen Herausforderungen dürfte nachvollziehbar sein, dass die Realisierung von Systemen zur weltraumbasierten Energieproduktion für Deutschland nur in Kooperation mit anderen Ländern in Europa möglich sein wird. Aktuell ist das Thema durch eine hohe Dynamik gekennzeichnet und es sind weitere Studien durch die ESA beauftragt, deren Ergebnisse die künftige Entwicklungsrichtung näher beschreiben werden. Es empfiehlt sich daher, zunächst die Entwicklungen weiter zu beobachten und ggf. zu einem späteren Zeitpunkt vertieft zu analysieren, etwa, wenn Ergebnisse weiterer Analysen sowie neuere Erkenntnisse zum Entwicklungsstand der einzelnen technischen Komponenten vorliegen.

Literatur

- ▶ AFRL (Air Force Research Laboratory) (2022): Space Power Beaming. Space Solar Power Incremental Demonstrations And Research Project. Dayton, https://afresearchlab.com/wp-content/uploads/2020/09/AFRL_SSPIDR_FS_0123.pdf (20.7.2023)
- ▶ Atul, A. (2015): A Study on Space-based Solar Power System. In: IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology 1(5), S.1–3
- ▶ BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (o.J.): Fragen und Antworten zur Einführung der 5G-Mobilfunknetze und den damit in Verbindung stehenden elektromagnetischen Feldern (EMF). Stand 16.4.2019, <https://www.bmu.de/WS5251> (20.7.2023)
- ▶ Caton, J. (2015): Space-based Solar Power: A technical, economic, and operational assessment. Strategic Studies Institute, US Army War College, <https://www.jstor.org/stable/resrep11703> (20.7.2023)
- ▶ Clery, D. (2022): Has a new dawn arrived for space-based solar power? In: Science 378(6617), S.238–239
- ▶ David, L. (2022): Is Space-Based Solar Power Ready for Its Moment in the Sun? Scientific American, <https://www.scientificamerican.com/article/is-space-based-solar-power-ready-for-its-moment-in-the-sun/> (20.7.2023)

- ▶ Dhinakaran, V.; Arul Daniel, S. (2021): New Frontiers in Solar Power Generation: A Comprehensive Review of Solar Power Satellite Schemes. In: IEEE: 2021 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON). Pune, S.1–5
- ▶ Dudenhofer, J.; George, P. (2000): Space Solar Power Satellite Technology Development at the Glenn Research Center – An Overview. NASA, <https://web.archive.org/web/20090318230601/http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2000/TM-2000-210210.pdf> (20.7.2023)
- ▶ ESA (European Space Agency) (2022a): ESA reignites space-based solar power research. https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/ESA_reignites_space-based_solar_power_research (20.7.2023)
- ▶ ESA (2022b): SOLARIS activity plan 2023–2025. Summary, https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/SOLARIS_activity_plan_2023-2025_Public_Version_22Dec22.pdf (20.7.2023)
- ▶ ESA (2023): ESA developing Space-Based Solar Power plant plans. https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/ESA_developing_Space-Based_Solar_Power_plant_plans (20.7.2023)
- ▶ ESA (o.J.): FAQ: Frequently Asked Questions on Space-Based Solar Power. https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/FAQ_Frequently_Asked_Questions_on_Space-Based_Solar_Power (20.7.2023)
- ▶ Foust, J. (2022): NASA to reexamine space-based solar power. SpaceNews, <https://spacenews.com/nasa-to-reexamine-space-based-solar-power/> (20.7.2023)
- ▶ Frazer Nash Consultancy Limited (2021): Space Based Solar Power. De-risking the pathway to Net Zero. <https://www.fnc.co.uk/media/e15ing0q/frazer-nash-sbsp-executive-summary-final.pdf> (20.7.2023)
- ▶ Gosavi, S.; Mane, H.; Pendhari, A.; Magdum, A.; Deshpande, S.; Baraskar, A.; Jadhav, M.; Husainy, A. (2021): A Review on Space Based Solar Power. In: Journal of Thermal Energy Systems 6(1), S.16–24
- ▶ Hader, M.; Hoyer, M.; Dy, D.; Wurm, B.; Haid, S.; Paulitsch, M.; Gyebnar, D.; Scheper, M.; Voigt, N.; Ganzer, B.; Carpenter, J.; Vijendran, S. (2022): Energie aus dem All. Ein möglicher Beitrag zur Dekarbonisierung und Energieunabhängigkeit Europas? Roland Berger GmbH; OHB Systems AG, <https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/roland-berger-SBSP-cost-benefit-study-full-deliverables.zip> (20.7.2023)
- ▶ Hou, X. (2022): Development Status of SPS in China. Space Solar Power Session, ISDC 2022. National Space Society, Arlington
- ▶ JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) (o.J.): About the SSPS. <https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/ssps-ssps.html> (20.7.2023)
- ▶ Kost, C.; Shammugam, S.; Fluri, V.; Peper, D.; Memar, A.; Schlegl, T. (2021): Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien. Juni 2021. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE_2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf (20.7.2023)
- ▶ Landis, G. (2004): Reinventing the Solar Power Satellite. NASA, <https://web.archive.org/web/20090716133000/http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2004/TM-2004-212743.pdf> (20.7.2023)
- ▶ Lawler, S.; Boley, A.; Rein, H. (2022): Visibility Predictions for Near-future Satellite Megaconstellations: Latitudes near 50° Will Experience the Worst Light Pollution. In: Astronomical Journal 163(1), S.21
- ▶ Lin, J. (2002): Space solar-power stations, wireless power transmissions, and biological implications. In: IEEE Journal of Microwaves 3(1), S.36–42
- ▶ Malaviya, P.; Sarvaiya, V.; Shah, A.; Thakkar, D.; Shah, M. (2022): A comprehensive review on space solar power satellite: an idiosyncratic approach. In: Environmental Science and Pollution Research 29(28), S.42476–42492
- ▶ Mankins, J. (2011): Space Solar Power. The First International Assessment of Space Solar Power: Opportunities, Issues and Potential Pathways Forward. International Academy of Astronautics, https://iaaspace.org/wp-content/uploads/iaa/Studies/sg311_finalreport_solarpower.pdf (20.7.2023)
- ▶ NDR (Norddeutscher Rundfunk) (2018): Watt? Das leisten Kraftwerke im Vergleich. <https://www.ndr.de/nachrichten/info/Watt-Das-leisten-die-Anlagen-im-Vergleich,watt250.html> (20.7.2023)
- ▶ NRL (U.S. Naval Research Laboratory) (2021): NRL PRAM Mission: One Year and Still Going. <https://www.navy.mil/Press-Office/Press-Releases/display-pressreleases/Article/2652805/nrl-pram-mission-one-year-and-still-going/> (20.7.2023)
- ▶ Pagel, J. (2022): A Study of Space-Based Solar Power Systems. Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, <https://core.ac.uk/download/pdf/543795437.pdf> (20.7.2023)
- ▶ Roberts, T. (2022): Space Launch to Low Earth Orbit: How Much Does It Cost? Aerospace Security, <https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost/> (20.7.2023)
- ▶ Rodenbeck, C.; Jaffe, P.; Strassner II, B.; Hausgen, P.; McSpadden, J.; Kazemi, H.; Shinohara, N.; Tierney, B.; DePuma, C.; Self, A. (2021): Microwave and Millimeter Wave Power Beaming. In: IEEE Journal of Microwaves 1(1), S.229–259
- ▶ Roland Berger GmbH; OHB Systems AG (2022): Assessment of strategic, economic, environmental, and societal benefits, costs, and risks. TN 04, Study on Cost-Benefit Analysis of Space-based Power Generation (SBSP) for Terrestrial Energy Needs. <https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/roland-berger-SBSP-cost-benefit-study-full-deliverables.zip> (20.7.2023)
- ▶ Space Energy Initiative (2021): Space Based Solar Power – answering questions, <https://www.spaceenergyinitiative.org.uk/wp-content/uploads/2021/10/SBSP-FAQs-Sep-2021-v2.pdf> (20.7.2023)

- ▶ SPD, B90/Die Grünen, FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen: Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021–2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). Berlin, https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf (20.7.2023)
- ▶ TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2020): New Space – neue Dynamik in der Raumfahrt. (Kind, S.; Jetzke, T.; Nögel, L.; Bovenschulte, M.; Ferdinand, J.-P.) TAB-Kurzstudie 1, Berlin
- ▶ U.S. Department of Energy; NASA (National Aeronautics and Space Administration) (1980): Final Proceedings of the Solar Power Satellite Program Review. Washington D.C., <https://space.nss.org/wp-content/uploads/1981-DOE-SPS-Final-Proceedings-Of-The-Solar-Power-Satellite-Program-Review.pdf> (20.7.2023)
- ▶ Voigt, N. (2022a): System breakdown, costs and technical feasibility of a SPS. TN 03, Study on Cost-Benefit Analysis of Space-based Power Generation (SBSP) for Terrestrial Energy Needs. OHB Systems AG, <https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/roland-berger-SBSP-cost-benefit-study-full-deliverables.zip> (20.7.2023)
- ▶ Voigt, N. (2022b): TN 01 SBSP Study Review. Study on Cost-Benefit Analysis of Space-based Power Generation (SBSP) for Terrestrial Energy Needs. OHB Systems AG, <https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/roland-berger-SBSP-cost-benefit-study-full-deliverables.zip> (20.7.2023)
- ▶ Voigt, N. (2022c): TN 02 SBSP Methodology. Study on Cost-Benefit Analysis of Space-based Power Generation (SBSP) for Terrestrial Energy Needs. OHB Systems AG, <https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/roland-berger-SBSP-cost-benefit-study-full-deliverables.zip> (20.7.2023)
- ▶ White, S.; Flytkjaer, R.; Sabri, F. (2022): Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs. Frazer Nash Consultancy Limited, <https://www.fnc.co.uk/media/fi4pvbgy/space-based-solar-power-final-report.pdf> (20.7.2023)
- ▶ Wilson, A.; Vasile, M.; Oqab, H.; Dietrich, G. (2020): A process-based life cycle sustainability assessment of the space-based solar power concept. In: 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, 12.–14.10.2020, S.1–19, https://strathprints.strath.ac.uk/74277/1/Wilson_etal_IAC_2020_A_process_based_life_cycle_sustainability_assessment_of_the_space_based_solar_power_concept.pdf (20.7.2023)

Das Horizon-Scanning ist Teil des methodischen Spektrums der Technikfolgenabschätzung im TAB.

Horizon
SCANNING

Mittels Horizon-Scanning werden neue technologische Entwicklungen beobachtet und diese systematisch auf ihre Chancen und Risiken bewertet. So werden technologische, ökonomische, ökologische, soziale und politische Veränderungspotenziale möglichst früh erfasst und beschrieben. Ziel des Horizon-Scannings ist es, einen Beitrag zur forschungs- und innovationspolitischen Orientierung und Meinungsbildung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung zu leisten.

In der praktischen Umsetzung werden im Horizon-Scanning softwaregestützte Such- und Analyseschritte mit expertenbasierten Validierungs- und Bewertungsprozessen kombiniert.

Herausgeber: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)

Gestaltung und Redaktion: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Bildnachweise: RomoloTavani/iStock (S.1); Pgiam/iStock (S.3); gorodenkoff/iStock (S.7); bombermoon/iStock (S.9)

ISSN-Internet: 2629-2874