



Arbeitsübersetzung unter Zuhilfenahme maschineller Übersetzungstools aus dem Englischen: „Navigating the Energy Transition in Korea and Germany“, 12. März 2025.

Perspektiven der Energiewende in Korea und Deutschland

Das 8. bilaterale KAST-Leopoldina-Symposium, das am 14. und 15. Januar 2025 in Seoul stattfand, und eine Reihe virtueller Workshops im Jahr 2024 brachten führende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Korea und Deutschland in den Bereichen Solartechnologien, Wasserstoff, Batterien, Netzmanagement und zukünftige Energiequellen zusammen. Ziel war es, die Zusammenarbeit zu fördern und Fortschritte auf dem Weg zu nachhaltigen und widerstandsfähigen Energiesystemen in beiden Ländern zu erzielen. Dieses gemeinsame Papier fasst die Ergebnisse der Workshops und des Symposiums zusammen, zeigt wissenschaftliche Herausforderungen auf, identifiziert Prioritäten für die bilaterale Forschung und bietet Empfehlungen für politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger in Korea und Deutschland.

Photovoltaik

Die Photovoltaik (PV) bietet unter den erneuerbaren Energietechnologien die niedrigsten Stromerzeugungskosten und das größte Potenzial für einen großflächigen Einsatz. Sowohl Korea als auch Deutschland haben sich ehrgeizige Ziele für die Energiewende gesetzt, und die Photovoltaik spielt dabei eine herausragende Rolle. Dank des technologischen Know-hows und der weltweit führenden Forschung in beiden Ländern sind Korea und Deutschland Schlüsselakteure bei der Weiterentwicklung von Solartechnologien.

Herausforderungen

- **Grenzen des Wirkungsgrads:** Solarzellen aus kristallinem Silizium, die den weltweiten PV-Markt dominieren, sind eine ausgereifte Technologie, die sich der Single-Junction Wirkungsgradgrenze nähert.
- **Hohe Forschungs- und Entwicklungskosten:** Die Weiterentwicklung von PV-Technologien erfordert umfangreiche Forschung, beträchtliche finanzielle Investitionen und lange Entwicklungszeiträume.
- **Umweltauswirkungen:** Die weltweit steigende Produktion von PV-Modulen erzeugt Abfälle. Landnutzungskonflikte erschweren die Einführung in großem Maßstab.

Empfehlungen

- **Förderung von Innovationen bei PV-Technologien der nächsten Generation:** Weiterentwicklung von Perowskit-Silizium-Tandems und silikonfreien Mehrfachsolarzellen, die einen höheren Wirkungsgrad versprechen, sowie weiterer PV-Technologien der nächsten Generation, wie z. B. organische Solarzellen mit sehr niedrigem CO₂-Fußabdruck.
- **Investitionen in Künstliche Intelligenz und Strategien zur Materialforschung:** Die Integration von maschinellem Lernen in PV-Forschungslabore kann die Kosten erheblich senken und die

Entwicklungszeit beschleunigen. So können neue, optimierte Materialien entdeckt werden, die für einen direkten Transfer in die Industrie geeignet sind.

- **Förderung eines Kreislaufkonzepts:** Dies beginnt bei der Materialbeschaffung und reicht bis zum Recycling am Ende des Lebenszyklus, zum Beispiel durch die Konzentration auf organische Solarzellen. Verstärkte Integration von PV-Anlagen mit Mehrfachnutzen in Gebäude, landwirtschaftliche Flächen, Fahrzeuge und schwimmende Strukturen, um Landnutzungskonflikte zu verringern.

Prioritäten für bilaterale Forschungsprojekte

Durchführung strategischer, aufeinander abgestimmter Projekte durch die Einrichtung gemeinsamer Forschungsstipendien und Industriepartnerschaften zur Förderung des Wissenstransfers, gemeinsamer Forschungs- und Entwicklungs-Infrastrukturen und gemeinsamer Produktionsanlagen für Solarzellen der nächsten Generation, wie z. B. Tandem-PV.

Wasserstofftechnologien

Wasserstoff spielt eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung schwer zu elektrifizierender Sektoren, bei der Unterstützung der Netzstabilität und bei der Speicherung von Energie in großem Maßstab. Sowohl Korea als auch Deutschland treiben die Wasserstofftechnologien voran, wobei der Schwerpunkt auf Elektrolyse, Katalysatorinnovationen und Brennstoffzellen liegt. Wasserstoff wird als unverzichtbar für die Energiewende anerkannt. Neben der Produktion benötigen beide Länder auch Infrastruktur für den Import, den Transport und die Speicherung von Wasserstoff und seinen Derivaten.

Herausforderungen

- **Abhängigkeit von Importen:** Der hohe Energiebedarf und die begrenzten inländischen Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff machen neue internationale Energiepartnerschaften erforderlich.
- **Teure und komplexe Infrastruktur:** Die geografische Entfernung zwischen Erzeugern und Verbrauchern von grünem Wasserstoff erfordert erhebliche Investitionen in Schiffe, Pipelines und Häfen, die für Wasserstoff und seine Derivate gebaut und angepasst werden müssen.
- **Langsame Markteinführung:** Die hohen Produktionskosten und das begrenzte Angebot an grünem Wasserstoff behindern eine schnelle Einführung und stellen eine Herausforderung für die Erreichung der Klimaziele dar.

Empfehlungen

- **Steigerung der Effizienz der Wasserstoffproduktion:** Die Optimierung und groß angelegte Produktion von Elektrokatalysatoren und Thermokatalysatoren, die für die Wasserstoffwirtschaft von Bedeutung sind, sollte beschleunigt werden.
- **Weiterentwicklung effizienter Wasserstoffträger:** Verstärkte Nutzung flüssiger organischer Wasserstoffträger wie LOHC und Dimethylether (DME) für einen effizienten Langstreckentransport unter Nutzung der bestehenden Infrastruktur, einschließlich umgewidmeter Gaspipelines.
- **Skalierung bestehender und Einführung neuer grüner Wasserstofftechnologien:** Die Praxistauglichkeit von Wasserstoff sollte anhand von Anwendungen in der Schwerindustrie (z. B. Stahl- und Zementherstellung) und im Langstreckentransport (z. B. Schiffe und Züge) demonstriert

werden, um die Akzeptanz der Technologie zu fördern. Investitionen in die Wasserstofferzeugung aus erneuerbaren Energien und die Hochtemperatur-Elektrolyse, können die Kosten zu senken und die Verfügbarkeit zu erhöhen.

Prioritäten für bilaterale Forschungsprojekte

Die Zusammenarbeit in der Grundlagenforschung und bei Anwendungen von katalytischen und elektrokatalytischen Materialien und Wasserstoffträgerkreisläufen auf niedrigem und hohem technologischem Niveau (TRL) sollte durch gemeinsame strategische Projekte verstärkt werden. Dieser Ansatz kann die Innovation in der gesamten Wasserstoff-Lieferkette beschleunigen.

Batterien

Batterien sind für den Übergang zur Elektromobilität unerlässlich, da sie die Netzstabilität gewährleisten und kurz- und mittelfristige (von Minuten bis zu einigen Stunden) Energiespeicherlösungen bieten. Mit ihrer starken Forschungslandschaft und ihren industriellen Kapazitäten sind Korea und Deutschland wichtige Akteure bei der Entwicklung moderner Batterietechnologien.

Herausforderungen

- **Engpässe in den Lieferketten:** Die steigende Nachfrage nach Rohstoffen für Batterien erhöht den wirtschaftlichen Druck. Hohe Energiedichte, verlängerte Lebensdauer und Leistung unter extremen Bedingungen, insbesondere für Elektrofahrzeuge (EV), müssen angestrebt werden.
- **Risiken und Bedenken der Öffentlichkeit:** Der großflächige Einsatz von Batterien in Elektrofahrzeugen und Gebäuden bringt neue Herausforderungen mit sich, wie z. B. thermisches Durchgehen oder Brandgefahren.
- **Saisonale Schwankungen erneuerbarer Energien:** Die saisonale und jährliche Speicherung erneuerbarer Energien bleibt eine große Herausforderung, ist aber für das Ziel der Kohlenstoffneutralität von entscheidender Bedeutung.

Empfehlungen

- **Einführung eines geschlossenen Kreislaufs bei der Batterieherstellung:** Recyclingverfahren für Batterien sowie der Widerstandsfähigkeit von Batterien sollte verbessert werden. Die Suche nach alternativen Batteriechemikalien (Na, K) kann Umweltauswirkungen verringern, einschließlich der Verwendung von Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS). Ausgemusterte Batterien von Elektroautos können in intelligenten Gebäuden als Netzspeicher weiterverwendet werden.
- **Erhöhung der Batteriesicherheit:** Investitionen in Forschung zu feuerfesten Materialien und Festkörperbatterien sollten ausgebaut werden.
- **Förderung saisonaler und ganzjähriger Speicherlösungen:** Forschung zu langfristigen, skalierbaren Energiespeicherlösungen wie primäre, groß angelegte Salzwasser- und Aluminium-Luft-Batterien sollte gestärkt werden. Hier können die energetisch reaktiven Metalle außerhalb der Batterien untergebracht werden.

Prioritäten für bilaterale Forschungsprojekte

Verstärkte Zusammenarbeit bei groß angelegten gemeinsamen Forschungsinitiativen mit Schwerpunkt auf Flüssig- und Festkörperbatterien sowie Post-Lithium-Technologien. Die deutsche Stärke in der Grundlagenforschung und die Stärke koreanischer Erstausrüster („*original equipment manufacturer*“) sollte

beim Aufbau von Partnerschaften genutzt werden, um den Weg von experimentellen Durchbrüchen zu marktreifen Produkten zu beschleunigen.

Netzmanagement

Intelligente Netze sind für die Integration erneuerbarer Energien, die Verringerung von Netzengpässen und die Verbesserung der Netzstabilität unerlässlich. Im Gegensatz zu Deutschland, das in das europäische Energiesystem eingebunden ist, kann sich Korea nicht auf seine Nachbarländer verlassen, um Netzauswirkungen auszugleichen. Aus diesen unterschiedlichen Rahmenbedingungen ergeben sich komplementäre Anforderungen an Smart-Grid-Lösungen. Die Berücksichtigung dieser Anforderungen, von Konzepten bis hin zu Demonstratoren, wird die Forschungs- und Entwicklungsbemühungen beschleunigen. Deutschlands Erfahrungen bei der Integration erneuerbarer Energien und Koreas Pionierarbeit bei der KI-gesteuerten Netzoptimierung sind vielversprechende Werkzeuge zur Verbesserung der Netzstabilität.

Herausforderungen

- **Überlastung und Instabilität der Stromnetze:** Die Veränderung der Erzeugungsstruktur führt zu Netzüberlastung. Fehlende konventionelle Kraftwerke führen zu einem „schwächeren“ Netz mit Spannungsinstabilität; unbeständige Einspeisung erneuerbarer Energien führt zu Frequenzproblemen.
- **Verzögerter Netzausbau:** Windenergie wird oft weit entfernt vom Ort des Verbrauchs erzeugt. Erforderliche neue Übertragungsleitungen können zu sozialen Konflikten führen. Gleichzeitig belasten PV-Anlagen für Haushalte, Wärmepumpen sowie Ladestationen für Elektrofahrzeuge die bestehende Infrastruktur, wodurch die Rolle des Verteilungsnetzes an Bedeutung gewinnt.
- **Transformation der fossilen Strommärkte:** Die Schwankungen der Wind- und Solarenergie erfordern flexible Back-up-Kapazitäten und/oder dezentrale Speicherkapazitäten. Unterschiede in Bezug auf Zeitpunkt und Ort von Angebot und Nachfrage verkomplizieren die Strommärkte zusätzlich.

Empfehlungen

- **Erhöhung der Systemflexibilität:** Steuerung der Residuallast durch nachfrageseitiges Management mit Power-to-Gas, Integration der Batterien von Elektrofahrzeugen, Sektorkopplung (Wärme, Gas/Wasserstoff) und intelligentem Verbrauch in Haushalten und Industrie.
- **Kombination zentraler und lokaler Energiesysteme:** Dezentrale Energieressourcen (Distributed Energy Resources) helfen bei der Lokalisierung von Energiesystemen. Dies geschieht durch den Ausbau von virtuellen Kraftwerken (VPPs), Energie-Cloud-Systemen und fraktalen, mikro- und modularen Netzen. Integrierte Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssysteme (HGÜ) ermöglichen die Stromübertragung von weit entfernten erneuerbaren Energiequellen. Das daraus resultierende hybride Wechselstrom-Gleichstrom-Übertragungsnetz ermöglicht einen stabilen Betrieb mit höherer Auslastung und kontrollierter Stromübertragung.
- **Förderung wettbewerbsorientierter Energiemärkte und eines kohärenten Plans zur Digitalisierung der Energieinfrastruktur:** Die Digitalisierung ist der Schlüssel für eine effizientere Nutzung der vorhandenen Infrastruktur. Eine Flexibilisierung des Systems ist nur möglich, wenn auf jeder Ebene des Netzes eine angemessene Digitalisierung vorhanden ist. KI-gestützte Anwendungen können das Netzmanagement und die Netzstabilität verbessern. Flexible, marktbasierte Mechanismen für Echtzeit-Energieanpassungen sollten eingeführt werden, um sowohl Investitionen in erneuerbare

Energien als auch in die Bereitstellung von Reservekraftwerken zu unterstützen. Internationale Abstimmung ist von zentraler Bedeutung, um sicherzustellen, dass Lösungen, die in einem Land funktionieren, auch in einem anderen Land anwendbar sind.

Prioritäten für bilaterale Forschungsprojekte

Förderung gemeinsamer Forschung zur Organisation widerstandsfähiger Netze mit dem Schwerpunkt auf neuen operativen Grundsätzen und integrierter Planung von Netzen. Gemeinsame Studien zu Anwendungen von Microgrids und zur Systemstabilität bieten vielversprechende Ansätze zur Verbesserung der Netzflexibilität und -stabilität sowohl in Korea als auch in Deutschland. Investitionen in die Entwicklung und Umsetzung gemeinsamer Plattformen für Netzdesign und -management.

Zukünftige Energiequellen

Kleine modulare Reaktoren (Small Modular Reactors, SMRs) und die Fusionsenergie sind Technologien, mit dem Potenzial, globale Maßnahmen für kohlenstoffarme und widerstandsfähige Energiesysteme zu unterstützen. Die Fusionsenergie könnte in Zukunft eine Quelle für saubere Energie sein. Jüngste Fortschritte bei Stellarator- und Tokamak-Designs sowie internationale Initiativen wie ITER ebnen neue Wege, um ab Mitte des Jahrhunderts oder später nutzbare Fusionsenergie zu erzeugen. SMRs bieten potenziell eine flexible Lösung für eine zuverlässige Strom- und Wärmeerzeugung, die gut geeignet ist, den Ausstieg aus fossilen Energiesystemen zu unterstützen und eine stabile Energieversorgung zu gewährleisten. Zwar stehen beide Technologien noch vor wissenschaftlichen, technologischen und kommerziellen Herausforderungen, doch haben sie das Potenzial, einen wichtigen ergänzenden Beitrag zu einer kohlenstoffarmen Energiezukunft zu leisten.

Herausforderungen

- **Technologische Herausforderungen:** Die Fusionsenergie erfordert u.a. einen stabilen, stationären Plasmaeinschluss und integrierte technische Lösungen. SMRs benötigen technische Lösungen, anhand derer eine verbesserte Sicherheit nachgewiesen werden kann, mit der sich die Notfallplanungszonen für Kernkraftwerke minimieren lassen.
- **Investitionsrisiken:** Hohe Investitionskosten, lange Projektzyklen und die Notwendigkeit der internationalen Zusammenarbeit erschweren die nachhaltige Finanzierung und Kommerzialisierung der Fusion. Es wird erwartet, dass SMRs innerhalb des nächsten Jahrzehnts demonstriert werden, aber die Unsicherheiten in Bezug auf die Baukosten und die Lernkurve der Serienproduktion (n-th of-a-kind-Geräte) müssen noch adressiert werden.
- **Öffentliche Akzeptanz:** Bei beiden Technologien müssen die Risiken in Bezug auf Sicherheit und Gefahrenabwehr effektiv gesteuert werden. Für eine erfolgreiche Kommerzialisierung müssen die Bedenken und die Akzeptanz der Öffentlichkeit hinsichtlich der Umweltauswirkungen berücksichtigt werden.

Empfehlungen

- **Weiterentwicklung von Plasma- und Reaktorkonzepten:** Ausweitung der Forschung zu Plasmaeinschluss und -stabilität, 3D-Magnetkonfigurationen und Materialentwicklung für Stellaratoren und Tokamaks. Fortsetzung und Demonstration innovativer Technologien für die Auslegung und Sicherheit von SMR, Optimierung von Konfigurationen für verschiedene Zielanwendungen und Wiederverwendung der Infrastruktur aus ausgedienten fossilen Kraftwerken.

- **Verbesserung der Netzintegration und der Speicherlösungen:** Die Forschung zu fortschrittlichen Einschlusskonzepten und neuen Werkstoffen hat das Potenzial, die Fortschritte auf dem Weg zu einer kostengünstigen Fusionslösung zu beschleunigen. Für SMRs sollten innovative Anwendungen wie die kohlenstofffreie Wasserstofferzeugung und die Nutzung von Energiespeichersystemen für einen flexibleren Betrieb untersucht werden.
- **Verstärkung der Transparenz und der Sicherheitsmaßnahmen:** Entwicklung von Sicherheits- und Genehmigungskonzepten, sowohl für die Fusion als auch für SMRs, mit denen die Notwendigkeit von Notfallmaßnahmen praktisch ausgeschlossen werden kann. Verbesserung der Möglichkeiten der Reaktorresilienz für die Entsorgung nuklearer Abfälle. Einsatz hochpräziser Simulationsplattformen und KI-gestützter Ansätze, um Notfallmaßnahmen in Echtzeit zu ermöglichen. Proaktive Förderung eines Dialogs über Sicherheitsfragen und Kommunikation möglicher langfristiger Umweltvorteile, um das Vertrauen der Öffentlichkeit zu stärken.

Prioritäten für bilaterale Forschungsprojekte

Schlüsselbereiche der Forschungszusammenarbeit könnten sein: die Weiterentwicklung der 3D-Physik bei der Reaktorkonstruktion, die Entwicklung von Materialien, die hohen Temperaturen und neutronenreichen Umgebungen standhalten, und die Implementierung von Echtzeit-Simulationssystemen für Notfallmaßnahmen. Es besteht ein großes Potenzial für die Zusammenarbeit bei der Sicherheitsforschung sowohl für Fusions- als auch für SMR-Systeme sowie bei der Entsorgung nuklearer Abfälle, die für die langfristige öffentliche Akzeptanz und die ökologische Nachhaltigkeit von entscheidender Bedeutung sind.

Übergeordnete Empfehlungen

Zur Unterstützung der oben genannten Empfehlungen in den fünf zentralen Bereichen der Energiewende in Korea und Deutschland sollten die folgenden übergreifenden Maßnahmen umgesetzt werden:

- **Etablierung langfristiger Förderzyklen (10-15 Jahre)** zur Entwicklung und Skalierung innovativer, nachhaltiger, effizienter und sicherer Technologien für die globale Energiewende im Rahmen koreanisch-deutscher Forschungs- und Entwicklungskooperationen. Die koreanische und die deutsche Regierung und Förderorganisationen sollten gemeinsam maßgeschneiderte Förderprogramme entwickeln.
- **Erleichterung des Austauschs junger Forscherinnen und Forscher**, um die Zusammenarbeit und den Wissensaustausch zwischen Korea und Deutschland bereits in einem frühen Stadium ihrer Karriere zu fördern.
- **Ausweitung von Ausbildungsprogrammen**, um die Entwicklung qualifizierter Arbeitskräfte in der Energiebranche zu unterstützen und eine effiziente Umsetzung der Energiewende in Korea und Deutschland vorzubereiten.

Fazit

Korea und Deutschland vollziehen den Übergang von fossilen Brennstoffen zu nachhaltigen Energiequellen, und der Bedarf an innovativen wissenschaftlichen Lösungen war noch nie so groß wie heute. Trotz unterschiedlicher Herausforderungen haben beide Länder das gemeinsame Ziel, Kohlenstoffneutralität zu erreichen und grüne Energietechnologien voranzutreiben. Die Stärken Koreas und Deutschlands ergänzen sich und können den Fortschritt durch eine vertiefte wissenschaftliche Zusammenarbeit in Schlüsselbereichen beschleunigen, die in diesem gemeinsamen Papier identifiziert wurden. Durch ihre

Partnerschaft werden KAST und Leopoldina weiterhin den interdisziplinären Dialog fördern, von der Grundlagenforschung bis hin zur Demonstration von Spitzentechnologien, um einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Energiezukunft zu leisten.

Dieses gemeinsame Papier basiert auf den Ergebnissen des 8. bilateralen KAST-Leopoldina-Symposiums „Energy Transition“ und einer Reihe von virtuellen Expertenworkshops, die im Jahr 2024 stattfanden. Es wurde von den wissenschaftlichen Koordinatoren des Symposiums, **Leopoldina-Mitglied Prof. Dr. Wolfgang Marquardt**, ehemaliger Vorstandsvorsitzender des Forschungszentrums Jülich, und **KAST-Fellow Prof. Dr. Nam-Gyu Park**, Sungkyunkwan University, mit Unterstützung der internationalen Abteilungen von KAST und Leopoldina erstellt. Weitere Informationen zum Symposium finden Sie unter:

<https://www.leopoldina.org/veranstaltungen/veranstaltung/event/3219/>