

DePIN zur Steigerung der Resilienz von EWF-Infrastrukturen

Systematisierung und Potenziale für Brandenburg

Bastian Halecker¹ und Robert Henker¹

¹ XU Exponential University, Potsdam, Germany

*Correspondence: Bastian Halecker, b.halecker@xu-university.de, Robert Henker, r.henker@xu-university.de

Abstract. Kritische Infrastrukturen in den Bereichen Energie, Wasser und Nahrungsmittel (EWF) benötigen angesichts zunehmender globaler Herausforderungen neue Resilienzkonzepte. Dieser Artikel untersucht, wie Decentralized Physical Infrastructure Networks (DePIN) durch die Kombination von Blockchain, Internet der Dinge und Künstlicher Intelligenz zur Steigerung der Widerstandsfähigkeit von EWF-Systemen beitragen können. Der Fokus liegt auf der Region Brandenburg, wo das Projekt "Resiliente Infrastructure Technology Suite (RITS)" als praktisches Beispiel für dezentrale Infrastrukturlösungen dient. Die Ergebnisse zeigen, dass DePIN-Ansätze "Single Points of Failure" reduzieren und eine schnellere, autonome Reaktion auf Störungen ermöglichen, wodurch die regionale Versorgungssicherheit nachhaltig verbessert werden kann.

Keywords: Decentralized Physical Infrastructure Networks, Resilienz, Energy-Water-Food Nexus, Künstliche Intelligenz, Blockchain

1. Einleitung und Kontext

Die Resilienz kritischer Infrastrukturen in den Bereichen Energie, Wasser und Nahrungsmittel (Energy, Water, Food - EWF) ist angesichts des Klimawandels und globaler Herausforderungen ein zentrales Thema – insbesondere für Regionen wie Brandenburg. Diese Sektoren bilden das Rückgrat der Versorgung und müssen sowohl gegen physische als auch digitale Bedrohungen gewappnet sein [13]. Traditionelle zentralisierte Infrastruktursysteme weisen häufig „Single Points of Failure“ auf, die im Krisenfall zu großflächigen Ausfällen führen können. Vor diesem Hintergrund rückt das Konzept der Decentralized Physical Infrastructure Networks (DePIN) zunehmend in den Fokus, da durch dezentrale Strukturen und den damit einhergehenden Einsatz moderner Technologien wie Blockchain, Internet der Dinge (IoT) und Künstliche Intelligenz (KI) eine höhere Robustheit und Flexibilität erzielt werden kann [6], [9].

Der vorliegende Artikel untersucht systematisch, wie DePIN-Ansätze zur Resilienz der EWF-Infrastrukturen beitragen können. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Integration von KI zur Optimierung, Überwachung und Entscheidungsfindung in dezentralen Netzwerken – ein Aspekt, der in der Literatur zu Künstlicher Intelligenz immer mehr Beachtung findet [4], [7].

2. Methodik

Für diese Systematisierung wurden wissenschaftliche Datenbanken wie Google Scholar, IEEE Xplore und SpringerLink sowie praxisorientierte Quellen (z. B. Whitepapers, Projektberichte und behördliche Veröffentlichungen) herangezogen. Insbesondere wurden folgende Schlagworte verwendet:

- „Decentralized Physical Infrastructure Networks“ / „DePIN“
- Resilienz, Energie, Wasser, Ernährung, Brandenburg
- Blockchain, IoT, „Künstliche Intelligenz“
- „EWF“, „dezentrale Systeme“

Eingeschlossen wurden wissenschaftliche Veröffentlichungen wie Studien, Journal- und Konferenzbeiträge, aber auch nichtwissenschaftliche, praxisnahe Berichte der letzten fünf Jahre (2019–2024), die einen Bezug zu den Themen DePIN, EWF-Infrastrukturen und KI aufweisen. Als ausgewählte Quellen werden sowohl theoretische Grundlagen als auch praktische Fallstudien und Projektberichte herangezogen.

3. Konzeptionelle Grundlagen von DePIN

DePIN beschreibt ein neues Paradigma, bei dem physische Infrastrukturen dezentral organisiert und über eine Vielzahl von Knotenpunkten (sog. Nodes) betrieben werden. Die zugrunde liegenden Technologien umfassen:

- **Blockchain:** Eine spezifische Ausprägung der Digital Ledger Technology (DLT) ist die transparente, sichere und unveränderliche Dokumentation sowie automatisierte Überprüfung und Ausführung von Transaktionen und Prozessen [5], [7].
- **Internet der Dinge (IoT):** Ermöglicht die Echtzeiterfassung von Daten direkt aus der physischen Umgebung [9], [12].
- **Künstliche Intelligenz (KI):** Nutzt (bspw. die durch IoT gewonnenen) Daten zur Optimierung, Vorhersage und autonomen Steuerung von Systemprozessen [1], [4].

Durch die Kombination dieser Technologien können zentrale Steuerungsinstanzen entlastet und gleichzeitig die Reaktionsfähigkeit auf Störungen erhöht werden. DePIN-Ansätze fördern so die Dezentralisierung, Flexibilität und Transparenz kritischer Infrastruktursysteme [3], [6].

4. DePIN zur Steigerung der Resilienz von Energieinfrastrukturen

4.1 Herausforderungen zentralisierter Energiesysteme

Traditionelle, zentralisierte Energiesysteme basieren auf großen Kraftwerken, zentralen Netzbetreibern und wenigen systemkritischen physischen oder softwarebasierten Systemkomponenten, was sie anfällig für systemweite Störungen macht. Insbesondere weist diese Architektur folgende Schwächen auf:

Single Point of Failure: Die starke Abhängigkeit von wenigen zentralen Systemkomponenten führt dazu, dass ein Ausfall – sei es durch technische Fehler, Naturkatastrophen oder gezielte physische bzw. Cyberangriffe – zu großflächigen Stromausfällen führen kann [3], [13].

Langsame Reaktionsfähigkeit: Zentrale Systeme agieren oft zu träge, da Entscheidungen von einer zentralen Instanz getroffen werden, die aggregierte Daten verarbeitet. Dies führt zu Verzögerungen bei der Bewältigung von Lastspitzen oder bei der Integration variabel bereitgestellter erneuerbarer Energien, was die Flexibilität stark einschränkt [13].

Ineffiziente Ressourcennutzung: Lange Transportwege und starre Steuerungsmechanismen resultieren in hohen Energieverlusten und suboptimaler Auslastung der Anlagen [12]. Diese Ineffizienz verschärft das Risiko von Engpässen in bestimmten Regionen.

Herausforderungen bei der Integration erneuerbarer Energien: Die fluktuierende Natur von Wind- und Solarenergie ist in zentralisierten Systemen, die auf konstante Einspeisung ausgelegt sind, nur schwer kompensierbar. Fehlende flexible Speicherkapazitäten und langsame Regelmechanismen können zu Netzinstabilitäten führen [3].

Sicherheitsrisiken: Zentralisierte Steuerungssysteme stellen ein attraktives Ziel für Cyberangriffe dar, da ein einziger erfolgreicher Angriff erhebliche Auswirkungen auf das gesamte Netz haben kann [3].

Diese Herausforderungen zeigen, dass zentralisierte Energiesysteme in ihrer aktuellen Form zunehmend an ihre Grenzen stoßen.

4.2 DePIN als Lösungsansatz

DePIN-Ansätze bieten ein neues vielversprechendes Konzept, um die Schwächen zentralisierter Energiesysteme zu überwinden.

Dezentrale Ansätze wie DePIN bieten hier Potenzial, indem sie durch den Einsatz von Blockchain, IoT und KI die Abhängigkeit von zentralen Kontrollpunkten reduzieren und eine schnellere, lokal gesteuerte Reaktion auf Störungen ermöglichen [2], [12]. Durch die Dezentralisierung der Steuerung und den Aufbau eines Netzwerks aus zahlreichen verteilten und autonomen Knotenpunkten können kritische Engpässe umgangen und die Gesamtstabilität des Systems erhöht werden. Anstatt auf wenige zentrale Anlagen zu setzen, werden bspw. bevorzugt kleinere Erzeuger und Verbraucher miteinander vernetzt – was zu einer signifikanten Reduzierung des „Single Point of Failure“-Risikos führt [2].

Ein zentraler Aspekt von DePIN ist die Integration moderner Technologien wie Blockchain, IoT und KI. Blockchain gewährleistet dabei die transparente, manipulationssichere Dokumentation aller Transaktionen und Betriebsdaten. Dies ermöglicht es den Teilnehmern bspw. Energieflüsse in Echtzeit zu überwachen und sicherzustellen, dass alle Daten authentisch sind. Gleichzeitig liefern IoT-Sensoren kontinuierlich Echtzeitinformationen über Erzeugung, Verbrauch und Netzstatus, wodurch dynamische Anpassungen ermöglicht werden. Diese Datenbasis kann durch KI-gestützte Algorithmen analysiert werden, die etwa Prognosen zu Lastspitzen erstellen oder Optimierungspotenziale aufzeigen – beispielsweise durch das automatische Anpassen der Batteriespeicher-Ladezyklen oder das Ausbalancieren von dezentralen Einspeisungen [4], [12].

Darüber hinaus bietet der dezentrale Charakter von DePIN die Möglichkeit, lokale Ressourcen optimal zu nutzen und kurzfristig auf regionale Besonderheiten zu reagieren. In Regionen wie Brandenburg, in denen erneuerbare Energien wie Wind und Solar eine zunehmend wichtige Rolle spielen, können lokale Mikrogrids geschaffen werden, die im Falle von Störungen eigenständig isoliert und stabil betrieben werden können. Diese autonomen Einheiten ermöglichen es, überschüssige Energie lokal zu speichern oder direkt an benachbarte Haushalte zu verteilen, wodurch das Risiko großflächiger Ausfälle verringert und die Energieeffizienz gesteigert wird. Pilotprojekte in anderen Regionen belegen, dass solche Ansätze zu einer verbesserten Netzstabilität und einer schnelleren Reaktionsfähigkeit bei unerwarteten Schwankungen beitragen können [2], [11].

Insgesamt bietet DePIN somit einen integrativen Lösungsansatz, der nicht nur die technischen Schwächen zentralisierter Systeme adressiert, sondern auch eine höhere Beteiligung lokaler Akteure ermöglicht. Diese partizipative Komponente kann zu einer stärkeren Identifikation der Bürger mit der Energieversorgung führen und ermöglicht innovative, gemeinschaftsbasierte Modelle – ein entscheidender Faktor für die langfristige Resilienz und Nachhaltigkeit moderner Energiesysteme sowie deren Einbettung in die lokale und regionale Gesellschaft.

5. DePIN im EWF Kontext

Die Integration von DePIN in den Bereichen Energie, Wasser und Nahrungsmittelversorgung (EWF) eröffnet neue Möglichkeiten, die Resilienz kritischer Infrastrukturen zu erhöhen. Durch die Dezentralisierung von Steuerungs- und Managementprozessen werden nicht nur technische Schwächen zentralisierter Systeme adressiert, sondern auch lokale Potenziale besser genutzt und vernetzt. Im Folgenden wird dieser Ansatz im Kontext der drei Sektoren detailliert beleuchtet, wobei nach wie vor ein besonderer Schwerpunkt auf dem Energiesektor liegt.

5.1 Herausforderungen zentralisierter Energiesysteme

Im Energiesektor bietet DePIN insbesondere dann Vorteile, wenn es um die Integration erneuerbarer Energien und die Optimierung dezentraler Stromnetze geht. Traditionelle, zentral gesteuerte Netze stoßen zunehmend an ihre Grenzen, wenn es darum geht, fluktuierende erneuerbare Energien wie Wind und Solar in das Stromsystem zu integrieren. Dezentrale Ansätze ermöglichen hier folgende Vorteile:

Lokale Energieerzeugung und -verteilung: Durch den Aufbau von Mikrogrids und Peer-to-Peer-Energiehandelssystemen können regionale Akteure (z. B. Haushalte, kleine Unternehmen und lokale Energiegenossenschaften) eigenständig Strom erzeugen, speichern und austauschen. Dies verringert die Abhängigkeit von zentralen Versorgungsnetzen und reduziert das Risiko großflächiger Ausfälle [2].

Transparenz und Echtzeitsteuerung: Mit Hilfe von IoT-Sensoren werden Erzeugungs- und Verbrauchsdaten in Echtzeit erfasst und mittels Blockchain-Technologie fälschungssicher dokumentiert. KI-Algorithmen analysieren diese Daten, um beispielsweise Lastspitzen vorherzusagen und Batteriespeicher bedarfsgerecht zu steuern. Diese automatisierten Prozesse ermöglichen eine flexible und reaktionsschnelle Energieverteilung, die sich schnell an wechselnde Bedingungen anpassen kann [4], [12].

Integration erneuerbarer Energien: In Regionen wie Brandenburg, die einen hohen Anteil an erneuerbaren Energiequellen aufweisen, unterstützt DePIN die Verteilung von Überschussenergie und ermöglicht es, lokale Einspeisungen besser auszubalancieren. Durch dezentrale Energiemanagementsysteme wird sichergestellt, dass auch bei starken Schwankungen im Angebot ein stabiler Betrieb gewährleistet bleibt [10].

Diese dezentralen Konzepte führen zu einer robusteren Energieinfrastruktur, die im Krisenfall durch lokale Inselnetze operieren kann und somit die Versorgungssicherheit erhöht.

5.2 DePIN im Wassermanagement

Auch im Wassersektor eröffnet die Dezentralisierung neue Perspektiven. Brandenburg steht in puncto Wassermanagement vor Herausforderungen wie Dürren, steigendem Wasserbedarf und veralteten Versorgungsnetzen. DePIN kann hier wie folgt unterstützen:

Echtzeitüberwachung und -steuerung: IoT-Sensoren messen kontinuierlich Parameter wie Wasserqualität, Druck und Durchfluss. Diese Daten werden in einer Blockchain ge-

speichert, sodass alle Akteure – von Betreibern bis zu lokalen Behörden – in Echtzeit auf aktuelle Informationen zugreifen können. Dies ermöglicht eine schnellere Identifikation von Leckagen oder Störungen und eine autonome Reaktion auf kritische Ereignisse [14].

Regionale Anpassungsfähigkeit: Dezentrale Wassermanagementsysteme können auf lokale Gegebenheiten reagieren, indem sie beispielsweise bestimmte Netzabschnitte autonom steuern und so den Wasserfluss je nach Bedarf anpassen. Dies erhöht die Effizienz und reduziert Wasserverluste, was insbesondere in wasserknappen Zeiten von Bedeutung ist [14].

Einsatz von KI: KI-gestützte Analysen der Sensordaten unterstützen Betreiber dabei, Engpässe frühzeitig zu erkennen und automatisierte Maßnahmen einzuleiten – etwa das Umleiten von Wasserströmen oder das gezielte Aktivieren von Reservekapazitäten. Dadurch wird die gesamte Wasserinfrastruktur resilienter gegen kurzfristige Störungen [4].

5.3 DePIN in der Landwirtschaft und Nahrungsmittelversorgung

Die Landwirtschaft und damit verbundene Nahrungsmittelversorgung sind durch klimatische Schwankungen und logistische Herausforderungen geprägt. DePIN-Ansätze können auch hier wichtige Impulse zur Steigerung der Resilienz liefern:

Transparente Lieferketten: Blockchain-Technologie ermöglicht eine lückenlose Rückverfolgbarkeit von landwirtschaftlichen Produkten – von der Erzeugung über die Verarbeitung bis zum Endverbraucher. Dies erhöht nicht nur die Lebensmittelsicherheit, sondern erleichtert auch im Krisenfall die schnelle Lokalisierung von Problemen in der Lieferkette [8].

Präzisionslandwirtschaft: IoT-Sensoren erfassen kontinuierlich Umweltdaten wie Bodenfeuchte, Temperatur und Nährstoffgehalte. KI-gestützte Systeme werten diese Daten aus und unterstützen Landwirte dabei, den Ressourceneinsatz zu optimieren und Ernteverluste zu minimieren. Dadurch kann auf kurzfristige Wetterveränderungen flexibel reagiert werden, was die Produktion stabilisiert [1].

Direktvermarktung und regionale Netzwerke: Dezentrale Marktplätze, die auf Blockchain-Technologie basieren, ermöglichen es Landwirten, ihre Produkte direkt an Verbraucher zu verkaufen. Dies reduziert Abhängigkeiten von zentralen Vertriebskanälen und fördert die regionale Wirtschaft, wodurch auch die Versorgung in Krisenzeiten gesichert wird [6].

5.4 Zusammenfassung

DePIN bietet im Kontext der EWF-Infrastrukturen einen integrativen Ansatz, der die Vorteile der Dezentralisierung in allen drei Sektoren – Energie, Wasser und Landwirtschaft – bündelt. Während der Energiesektor durch lokale Mikrogrids und intelligente Steuerungssysteme an Resilienz gewinnt, ermöglichen dezentrale Wassermanagementlösungen eine präzise und schnelle Reaktion auf Störungen. Gleichzeitig schafft die Anwendung von DePIN in der Landwirtschaft durch transparente Lieferketten und präzise Steuerungssysteme eine robustere Nahrungsmittelversorgung. Die Kombination dieser Ansätze kann zu einem nachhaltigen, regional angepassten und widerstandsfähigen System führen, das den aktuellen und zukünftigen Herausforderungen in Brandenburg gerecht wird.

6. Kombination von DePIN und KI zur Optimierung dezentral organisierter Systeme

Künstliche Intelligenz spielt eine zentrale Rolle, indem sie die durch IoT generierte Datenmengen analysiert und dabei hilft, Betriebsprozesse zu optimieren. Insbesondere in dezentral organisierten Systemen sind KI-gestützte Prognosen und Entscheidungsunterstützungssysteme von Bedeutung [1], [4].

Anwendungsbereiche des Einsatzes und der Integration von KI in mit Hilfe von DePIN betriebener dezentral organisierter Systeme umfassen unter anderem die:

Vorhersage und Anomalieerkennung: KI-Algorithmen können Anomalien in den Sensordaten identifizieren – etwa ungewöhnliche Energieverbrauchsmuster oder plötzliche Änderungen in der Wasserqualität – und automatisch Gegenmaßnahmen einleiten [4].

Ressourcenoptimierung: Durch dynamische Modelle lassen sich Angebot und Nachfrage in Echtzeit ausbalancieren. KI ermöglicht es, in einem dezentralen Energiesystem beispielsweise den optimalen Zeitpunkt für das Laden und Entladen von Batteriespeichern zu bestimmen [1].

Automatisierte Steuerung: In Notfällen können KI-gesteuerte Systeme über Smart Contracts auf der Blockchain unmittelbar reagieren – etwa durch das automatische Isolieren eines defekten Netzabschnitts [5].

Lernende Systeme: Durch kontinuierliches Lernen aus historischen und Echtzeitdaten können KI-Systeme ihre Vorhersagen und Optimierungen ständig verbessern, was langfristig zu einer immer robusteren Infrastruktur führt [4].

Die Integration von KI, Blockchain und IoT verkörpert das Zusammenspiel von Daten, Vertrauen und Intelligenz – eine Kombination, die als zentraler Treiber für die Resilienz digitalisierter, dezentraler Infrastrukturen gilt [4], [5].

7. Potentiale von DePIN für Brandenburg am Beispiel des RITS Projektes

Das **Resilient Infrastructure Technology Suite (RITS)**-Projekt, das von der Landesregierung Brandenburg bzw. der ILB gefördert wird, dient als praktisches Testprojekt für den Einsatz von DePIN in einer Region mit vielfältigen Herausforderungen. Das Forschungsprojekt entwickelt ein Vorgehensmodell und eine Technologie-Suite, um die Transformation hin zu einer „Resilienten Infrastruktur“ (RI) in Brandenburg voranzutreiben. Ziel ist es, Infrastrukturen intelligent zu vernetzen, sodass sie flexibel auf äußere Einflüsse reagieren und negative Auswirkungen auf bestehende Systeme abmildern können. Im Fokus stehen die Bereiche Energie, Wasser und Nahrung (EWF-Systeme), die eine zentrale Rolle für eine resiliente und nachhaltige Zukunft Brandenburgs spielen.

Das Projekt integriert hierzu Blockchain, IoT und KI, um eine interaktive digitale Plattform zu schaffen, die den Zustand der Energie-, Wasser- und Nahrungsmittelinfrastruktur in Brandenburg in Echtzeit überwacht und optimiert [3], [10].

Interoperabilität und Synergien: Ein zentrales Ziel ist es, die Synergien zwischen den EWF-Sektoren zu nutzen. Beispielsweise kann überschüssige erneuerbare Energie zur Steuerung von Wasserpumpen in der Landwirtschaft genutzt werden – ein Beispiel für sektorübergreifende Resilienz.

Stakeholder-Integration: Neben wissenschaftlichen Akteuren sind lokale Unternehmen, Landwirte und kommunale Verwaltungen aktiv in die Entwicklung und Umsetzung eingebunden. So wird eine breite Akzeptanz der dezentralen Ansätze gefördert.

Im Rahmen des RITS-Projektes werden bewusst auch internationale Fallbeispiele herangezogen und dahingehend analysiert, welche Erkenntnisse sie für den Transfer in Brandenburg liefern können. Beispiele für erfolgreiche Projekte im EWF-Kontext sind:

Power Ledger: Mehrere Pilotprojekte in Australien und Europa zeigen, wie Blockchain-basierte Energiehandelsplattformen zu einer robusteren lokalen Stromversorgung beitragen können [11].

Helium Network: Dieses globale Projekt demonstriert, wie ein dezentral organisiertes IoT-Netzwerk aufgebaut werden kann, um auch in ländlichen Regionen eine zuverlässige Datenübertragung sicherzustellen [5].

IBM Food Trust und Ambrosus: Projekte, die sich mit der Transparenz und Rückverfolgbarkeit in der Lebensmittelversorgung befassen, verdeutlichen, wie DePIN-Ansätze zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz in der Supply Chain beitragen können [8].

Das RITS-Projekt wird einen entscheidenden Beitrag zur Gestaltung der resilienten Infrastrukturen von morgen leisten. Durch die Verbindung von Energie, Wasser und Food in einem dezentralen, digitalen Ökosystem entsteht eine Blaupause für widerstandsfähige, nachhaltige Infrastrukturlösungen, die sich flexibel den Herausforderungen der Zukunft anpassen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Artikel zeigt, dass DePIN-Ansätze das Potenzial besitzen, die Resilienz kritischer Infrastrukturen im EWF-Bereich erheblich zu steigern. Durch die Dezentralisierung wird nicht nur die Abhängigkeit von zentralen Kontrollinstanzen reduziert, sondern auch eine flexible, autonome Reaktion auf Krisen ermöglicht.

- **Blockchain** sichert die Integrität und Transparenz der Datenspeicherung.
- **IoT** liefert umfangreiche Echtzeitdaten, die als Basis für alle weiteren Steuerungsprozesse dienen.
- **KI** optimiert diese Datenflut, trifft Vorhersagen und ermöglicht eine schnelle, automatisierte Reaktion auf Störungen.

Brandenburg – als Vorreiter in der Nutzung erneuerbarer Energien und als Region, die bereits an der Digitalisierung ihrer Infrastrukturen arbeitet – könnte durch den gezielten Einsatz von DePIN-Lösungen beispielhaft zur resilienten Gestaltung der regionalen EWF-Systeme beitragen [10], [13]. Dabei sind jedoch weiterhin Herausforderungen wie Skalierbarkeit, Interoperabilität, Datenschutz und regulatorische Anpassungen zu beachten.

Zukünftige Forschung und Praxis: Um die Vorteile von DePIN voll auszuschöpfen, bedarf es weiterer interdisziplinärer Forschungsprojekte, die nicht nur technologische Lösungen entwickeln, sondern auch soziale und regulatorische Aspekte adressieren. Pilotprojekte wie RITS könnten dabei als „Living Labs“ dienen, um innovative Ansätze zu testen und den Transfer in andere Regionen zu ermöglichen. Auch die Integration von KI muss fortlaufend überwacht und optimiert werden, um sicherzustellen, dass automatisierte Entscheidungen stets transparent und nachvollziehbar bleiben.

Author contributions

Bastian Halecker: Conceptualization, funding acquisition, writing – original draft, Robert Henker: Conceptualization, funding acquisition, writing – review and editing.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Funding

Die Arbeit und ihre Ergebnisse sind Bestandteil des Förderprojekts „Resiliente Infrastructure Technology Suite (RITS)“ an der XU Exponential University in Potsdam, das von der Investitionsbank des Landes Brandenburg (ILB) über europäische Mittel und Mittel des Landes Brandenburg unterstützt und gefördert wird.

References

- [1] Arévalo, P., & Jurado, F. „Impact of artificial intelligence on the planning and operation of distributed energy systems in smart grids.“ *Energies*, 17(17), 4501. (2024).
- [2] Basseyy, K. E., Rajput, S. A., & Oyewale, K. „Peer-to-peer energy trading: Innovations, regulatory challenges, and the future of decentralized energy systems.“ *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 24, 172-186. (2024).
- [3] Haji, M., Namany, S., & Al-Ansari, T. „Strengthening resilience: decentralized decision-making and multi-criteria analysis in the energy-water-food nexus systems.“ *Frontiers in Sustainability*, 5, 1367931. (2024).
- [4] Hammad, A., & Abu-Zaid, R. „Applications of AI in Decentralized Computing Systems: Harnessing Artificial Intelligence for Enhanced Scalability, Efficiency, and Autonomous Decision-Making in Distributed Architectures.“ *Applied Research in Artificial Intelligence and Cloud Computing*, 7, 161-187. (2024).
- [5] Hasankhani, M., van Engelen, J., Celik, S., & Carel Diehl, J. „Emerging decentralized infrastructure networks.“ (2023).
- [6] Helmrich, A., Markolf, S., Li, R., Carvalhaes, T., Kim, Y., Bondank, E., & Chester, M. „Centralization and decentralization for resilient infrastructure and complexity.“ *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 1(2), 021001. (2021).
- [7] Jiang, S., Jakobsen, K., Bueie, J., Li, J., & Haro, P. H. „A tertiary review on blockchain and sustainability with focus on Sustainable Development Goals.“ *IEEE Access*, 10, 114975-115006. (2022).
- [8] Li, K., Lee, J. Y., & Gharehgozli, A. „Blockchain in food supply chains: a literature review and synthesis analysis of platforms, benefits and challenges.“ *International Journal of Production Research*, 61(11), 3527-3546. (2023).
- [9] Lin, Z., Wang, T., Shi, L., Zhang, S., & Cao, B. „Decentralized Physical Infrastructure Networks (DePIN): Challenges and Opportunities.“ *IEEE Network*. (2024).
- [10] MLUK Brandenburg. „Innovationsförderung im Bereich kritischer Infrastrukturen in Brandenburg.“ <https://mwaek.brandenburg.de/de/innovationsfoerderung/bb1.c.478820.de> (2023), (zuletzt zugegriffen am 27.02.2025)
- [11] Seven, S., Yoldas, Y., Soran, A., Yalcin Alkan, G., Jung, J., Ustun, T. S., & Onen, A. „Energy trading on a peer-to-peer basis between virtual power plants using decentralized finance instruments.“ *Sustainability*, 14(20), 13286. (2022).
- [12] Smirnov, O., Sydorenko, V., Aleksander, M., Zhyharevych, O., & Yanchev, S. „Simulation of the cloud IoT-based monitoring system for critical infrastructures.“ In *CMiGIN* (pp. 256-265). (2022).
- [13] Voßschmidt, S., & Karsten, A. „Resilienz und kritische Infrastrukturen.“ (2020).

- [14] Zeng, H., Dhiman, G., Sharma, A., Sharma, A., & Tselykh, A. „An IoT and Blockchain-based approach for the smart water management system in agriculture.“ *Expert Systems*, 40(4), e12892. (2023).