

ENERGIEEFFIZIENZ 4.0 IN DER PRODUKTION: BESTANDSAUFNAHME UND AUSBLICK

19. Symposium Energieinnovation | 11.02.-13.02.2026

DI Dr. techn. Martin Paczona
contact@martin-paczona.com
[LinkedIn Martin-Paczona](#)

Ausgangssituation

- EU Green Deal: systematische Reduktion der CO₂-Emissionen um 55% bis 2030 gegenüber 1990 [1]
- In der Europäischen Union entfielen im Jahr 2023 24,6% des Endenergieverbrauchs auf den Industriesektor [2],
- 20–40% der Gesamtenergie in industriellen Systemen kann als technisch vermeidbare Verschwendung klassifiziert werden können, während zusätzliche 40–70% auf prozessnotwendige, jedoch nicht direkt wertschöpfende Funktionen entfallen [3]
- Energiemanagementsysteme ermöglichen im Mittel 11% jährliche Einsparungen [4]

Ausgangssituation

- KI-gestützte Technologien sind in der Lage sind, Ineffizienzen in Echtzeit zu identifizieren und die Energieverschwendung in industriellen Anwendungen um bis zu 20% zu reduzieren [5]
- Etablierte normative Frameworks wie ISO 50001 definieren organisatorische Strukturen für Energiemanagement, adressieren jedoch digitale Schlüsseltechnologien ausschließlich auf konzeptioneller Ebene.
- bestehende Energiemanagementsysteme beschränken sich überwiegend auf deskriptives Monitoring [3]

Die systematische Integration von Industrie 4.0 Technologien erfordert ein strukturiertes, fundiertes Framework, das physikalische Grundprinzipien mit digitalen Technologien methodisch verknüpft und den Übergang von reaktiven zu proaktiven, selbstadaptiven Energiesystemen realisiert

Forschungsfrage:

Wie kann ein physikalisch fundiertes Framework die systematische Reduktion von Energieverschwendung in industriellen Produktionssystemen durch Integration von Industrie 4.0 Technologien ermöglichen?

- **F1:** Welche technologischen Säulen müssen integriert werden, um Energieverschwendung quantifizierbar zu reduzieren?
- **F2:** Wie kann das Framework den ROI von Energieeffizienzmaßnahmen verbessern?

Methodik: Literaturanalyse

- Identifikation der technologischen Säulen des Energieeffizienz 4.0-Frameworks
- Literaturrecherche erfolgte in der Datenbank Google Scholar für den Zeitraum 2015-2025.
- Bewertungsverfahren: Zweistufiges Screening durch Titel-/Abstract-Analyse, gefolgt von Volltext-Bewertung anhand einer vierstufigen Relevanzskala (0=irrelevant bis 3=Kernpublikation).
- Ergebnisse: Von 75 identifizierten Publikationen wurden 10 als Kernpublikationen identifiziert

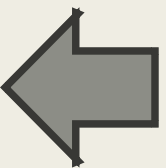
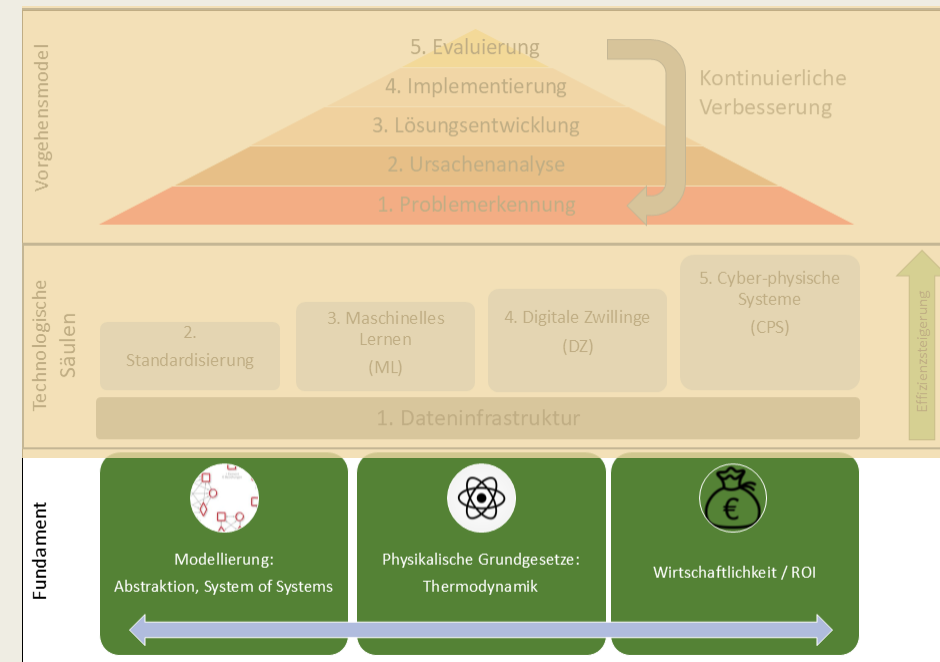
→ fünf zentrale technologische Säulen, die als Grundlage des entwickelten Frameworks dienen

Suchabfragen:

- "energy waste" AND manufacturing AND (digitalization OR "industry 4.0" OR "smart manufacturing")
- Energieeffizienz AND Produktion AND ("Digitalisierung" OR "Industrie 4.0")
- energy efficiency AND manufacturing AND (digitalization OR "industry 4.0" OR "smart manufacturing")

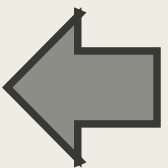
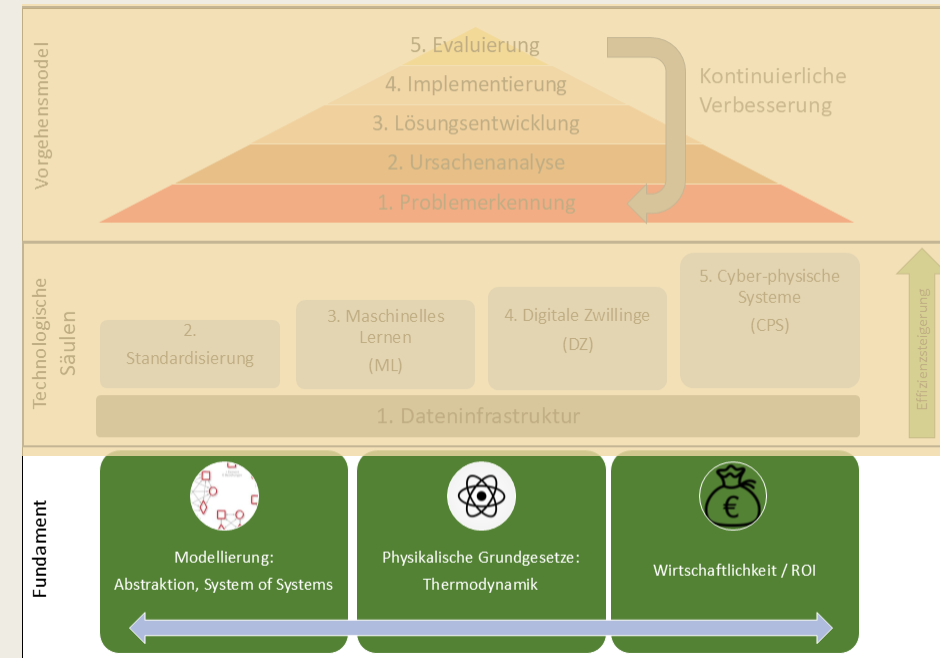
Fundament: Modellierung

- Sparsamkeitsprinzip
- Semantische Interoperabilität
- Gesamtsystemeffizienz durch Multipurpose-Energiemodelle werden durch Nutzung in z.B. Energiemanagement, Diagnosesystemen und Vorhersagesystemen [6]
- Moderne Produktionsanlagen erfordern eine hierarchische System-of-Systems-Architektur [7]



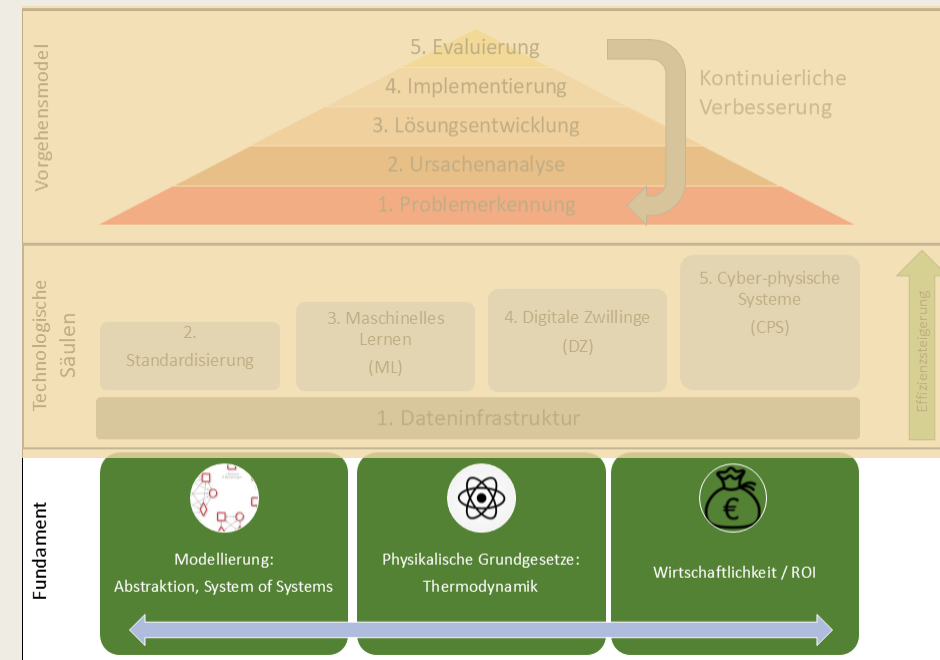
Fundament: Physikalische Grundgesetze

- Ausgangsbasis:
 - *Erste Hauptsatz der Thermodynamik – Energie wird nicht verbraucht, sondern umgewandelt.*
 - *Zweite Hauptsatz der Thermodynamik definiert die Obergrenzen der Effizienz.*
- Integration thermodynamischer Prinzipien mit digitalen Technologien ermöglicht eine Effizienzsteigerung gegenüber rein empirischen Energiemanagement-Ansätzen [8]
- Integration physikalischer Gesetzmäßigkeiten in ML-Algorithmen



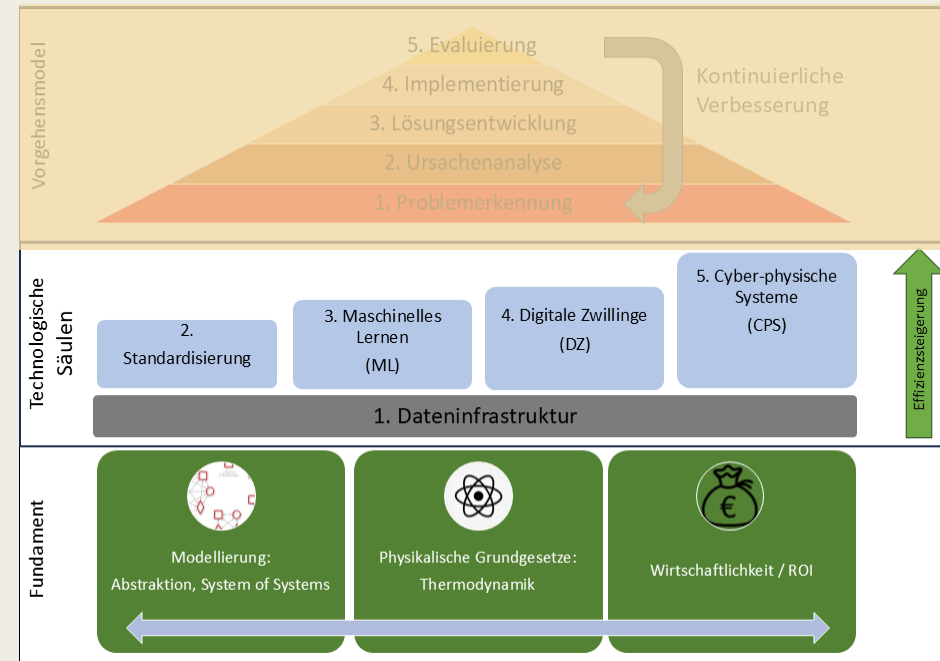
Fundament: Wirtschaftlichkeit / ROI

- Return on Investment (ROI) als fundamentales Bewertungskriterium
- Echtzeit-Monitoring: Kontinuierliche Prüfung der erzielten Einsparung
- Realistische Vorab-Abschätzung des Einsparpotenzials



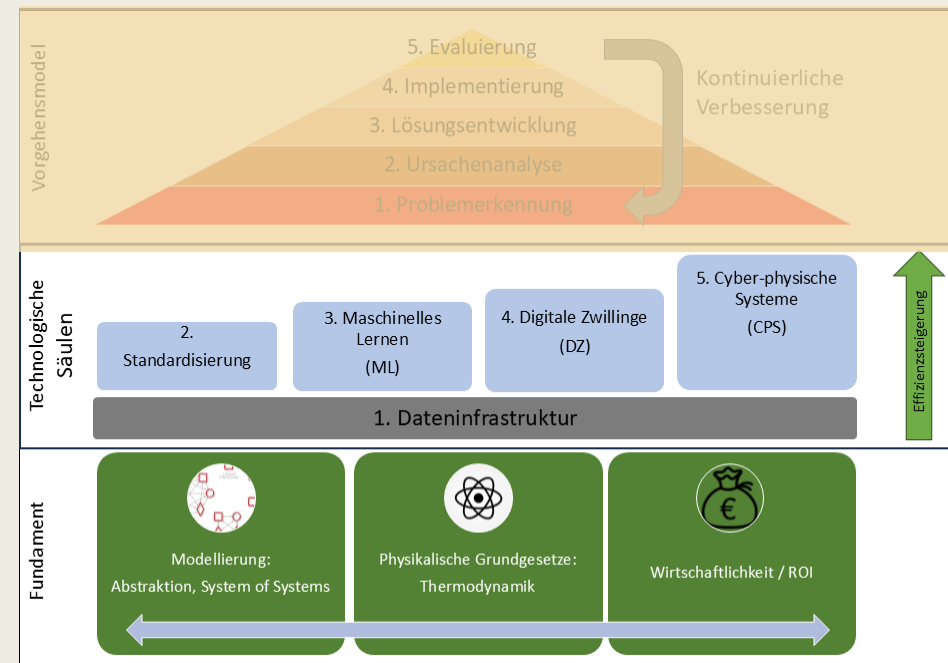
Technologische Säulen: Dateninfrastruktur

- Energieoptimierung erfordert eine durchgängige digitale Infrastruktur als Grundlage für energetische Transparenz
- Echtzeit-Energieoptimierung erfordert niedrige Latenzzeiten für kritische Regelkreise -> Edge-Geräte
- Interoperabilität zwischen Produktions- und Energiesystemen ermöglicht die Identifikation von System-of-Systems Ineffizienzen



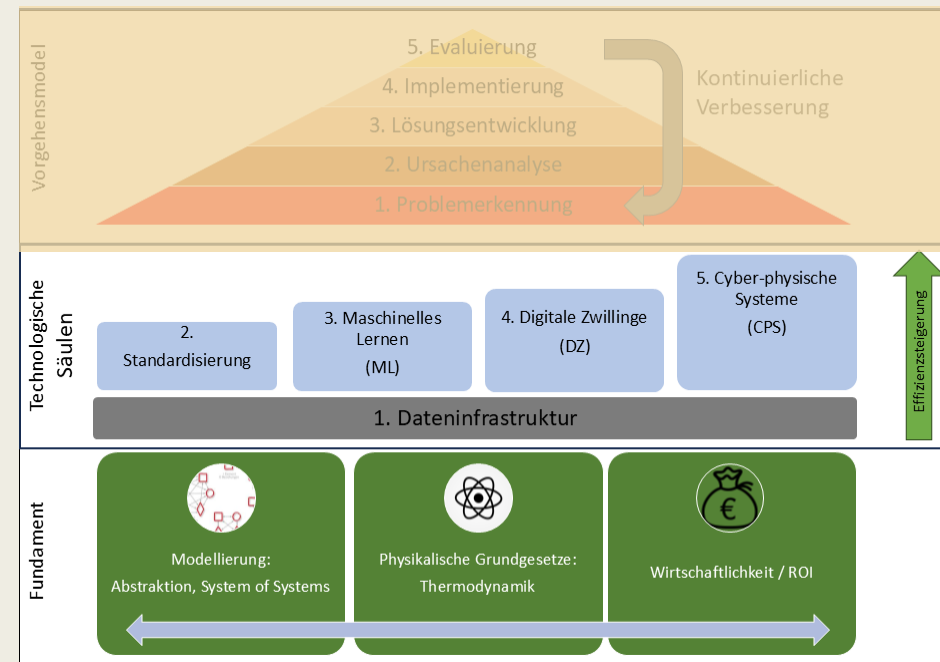
Technologische Säulen: Standardisierung

- Standardisierung ermöglicht die Datennutzung innerhalb des Werks und über Werksgrenzen hinweg
- EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten etabliert Bewertungskriterien für Energieeffizienz
- ISO 50001 Energiemanagementsysteme
- Protokollstandards: OPC UA, MQTT...



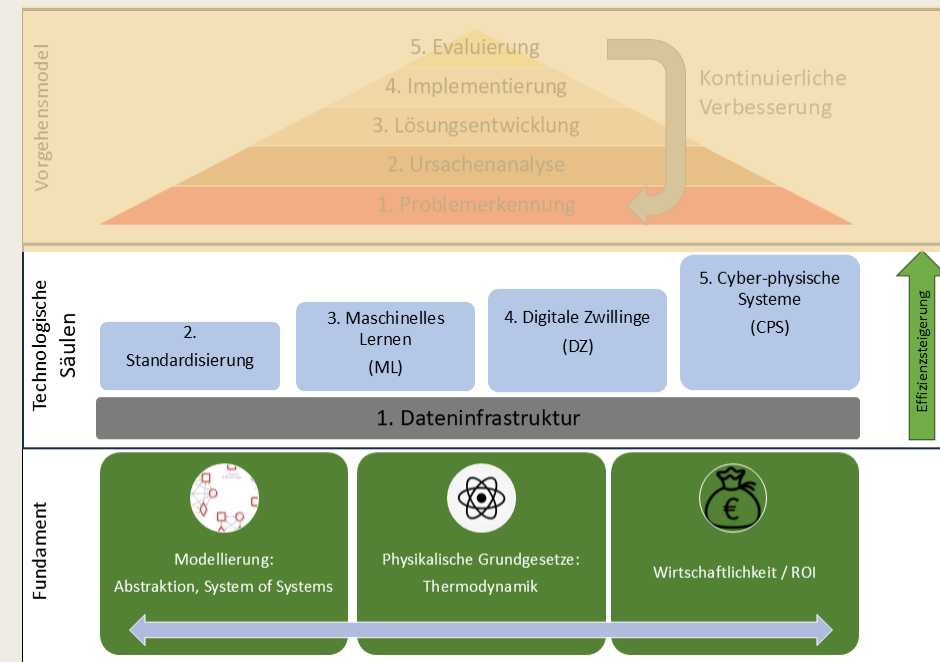
Technologische Säulen: Maschinelles Lernen

- Daten → intelligente Optimierungsvorschläge
- Physics-informed ML um
 - *Datenbedarf zu reduzieren*
 - *und Modellrobustheit zu verbessern*
- Feature Engineering zur Abstraktion relevanter Prozesscharakteristika
- Federated Learning für datenschutzkonformes, herstellerübergreifendes Lernen
- „Active learning“ Methoden zur Anomalieerkennung
- Maschinenspezifische Energieprofile aus zentralen Stromnetzen durch Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) [9]



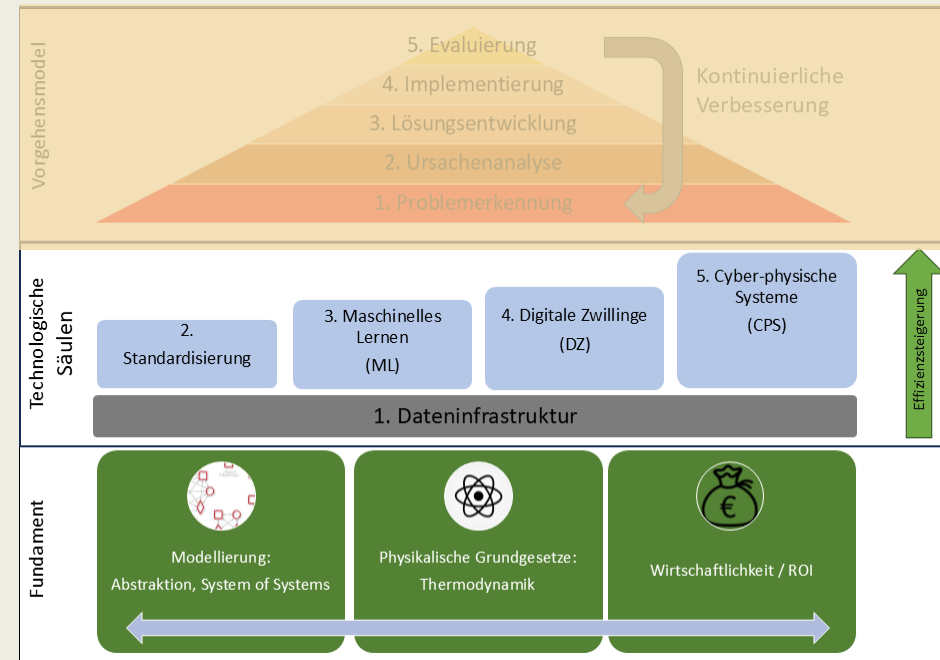
Technologische Säulen: Digitale Zwillinge

- proaktive Analyse systematischer Energieverschwendung durch kontinuierliche Soll-Ist-Vergleiche
- Was-wäre-wenn Simulationen
- Autonome Entscheidungsfindung z.B. für Roboterzellen [10]



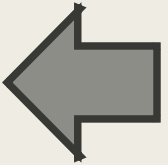
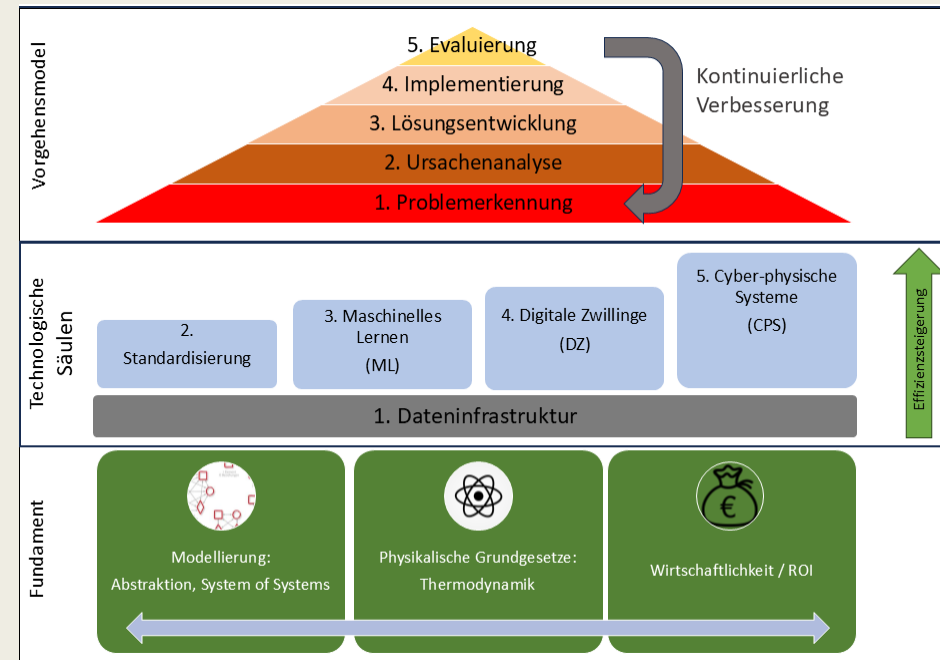
Technologische Säulen: Cyber- physische Systeme

- Integration von Maschinen, Peripheriesystemen, Steuerungstechnik, IoT-Infrastrukturen
- adaptive Mensch-Maschine-Interfaces, die Weiterentwicklung der reaktiven Dashboards zu interaktiven Optimierungsumgebungen
- ermöglichen auf allen Fertigungsebenen (Maschinen-, Linien-, Anlagenebene) die Informationsnutzung
- Auflösung der traditionellen Automatisierungspyramide hin zu lokal gesteuerten Modulen.
- Kooperation über Systemgrenzen hinweg

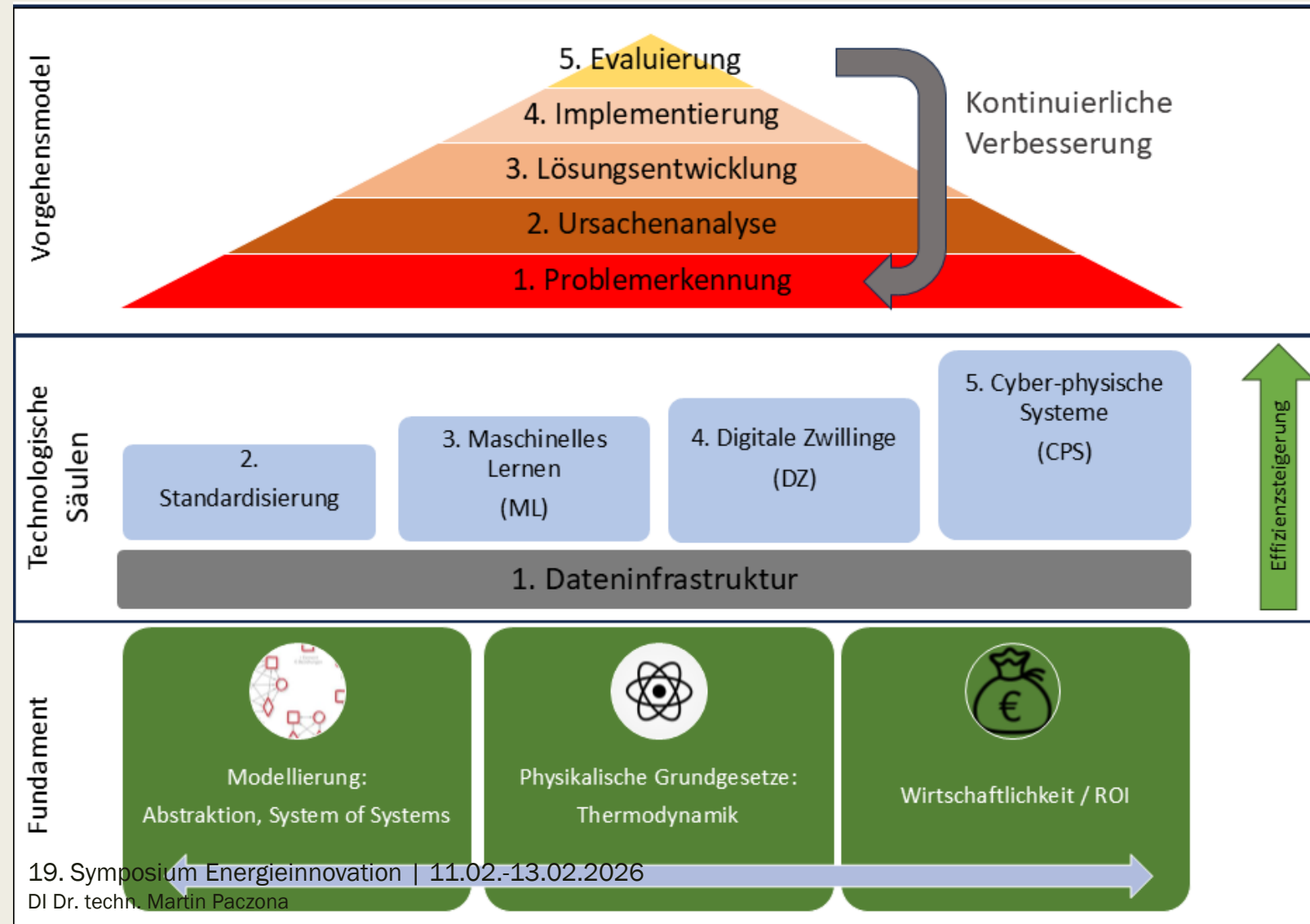


Vorgehensmodell

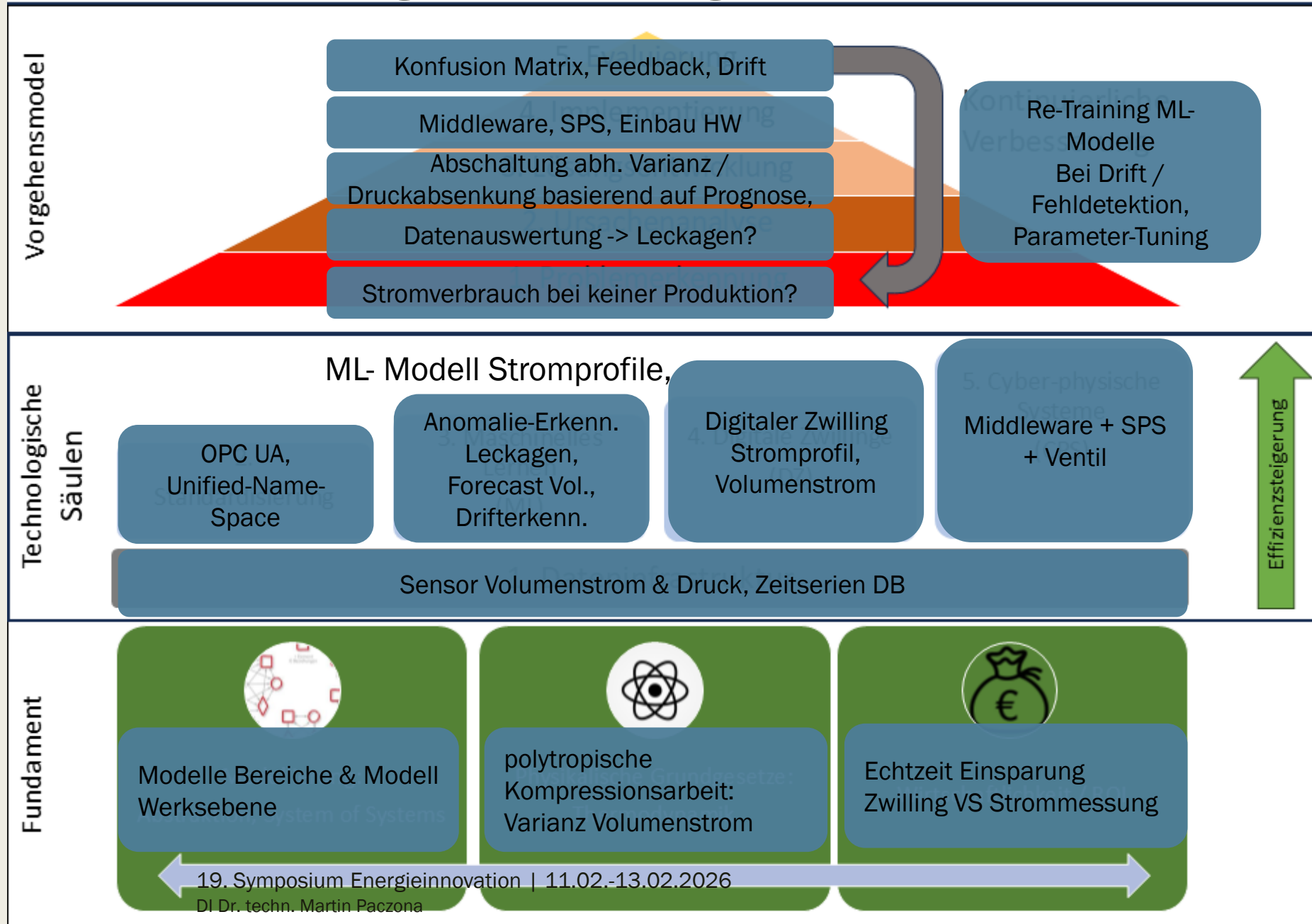
Das Prozessmodell realisiert systematische iterative Optimierung durch Rückkopplungsschleifen



Framework Energieeffizienz 4.0 (F1)



Druckluftoptimierung: Absenkung und Bereichsabschaltung



F2: Wie kann das Framework den ROI von Energieeffizienzmaßnahmen verbessern?

- *Zielgerichtete Investitionen durch physikalisch fundierte Prognosen*
- *Modulare Implementierung (kleine Datenbasis ausreichend)*
- *Multipurpose-Infrastruktur durch Kombination mit Vorrauschauender Wartung & Qualitätssicherung*
- *Ableitung von maschinenspezifischen Energieprofilen aus zentralen Zählerdaten*
- *Kontinuierliche Verbesserung*
- *Echtzeit-Bewertung der Wirksamkeit*

Ausblick

- Physics-informed ML gewinnt an Bedeutung für industrielle Energiesysteme.
- Standardisierung der Dateninfrastruktur: OPC UA, MQTT
- Digitale Zwillinge für
 - *1. Echtzeitmonitoring und Predictive Analytics*
 - *2. vollautonome Systeme*
- Datenschutz: Federated Learning, Encryption -> fördert kollaborative Energiemodellierung
- Adoptionsbarrieren: Anfangsinvestitionen, Fachkräftemangel, Komplexität, Anpassung bestehender Infrastruktur, regulatorische Unsicherheiten, kultureller Widerstand
- White-Box-Modelle / Explainable AI
- LLM – Knowledge Graph Systeme: ermöglichen die automatisierte Auswertung komplexer Energiedaten und generieren Empfehlungen in natürlicher Sprache

Literaturverzeichnis

1. Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. (2023). Richtlinie (EU) 2023/1791 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. September 2023 zur Energieeffizienz und zur Änderung der Verordnung (EU) 2023/955 (Neufassung). Amtsblatt der Europäischen Union, L 231/1. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32023L1791>
2. Eurostat. (2025, July 25). Final energy consumption in industry - detailed statistics. Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_industry_-_detailed_statistics
3. T. Schmitt, S. Mattsson, E. Flores-García, and L. Hanson, "Achieving energy efficiency in industrial manufacturing," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 216, Art. 115619, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115619.
4. International Energy Agency. (2025). Industrial facilities could save billions by implementing energy management. IEA Commentary. Retrieved from <https://www.iea.org/commentaries/industrial-facilities-could-save-billions-by-implementing-energy-management>
5. Bera, M., Das, S., Garai, S., Dutta, S., Choudhury, M. R., Tripathi, S., & Chatterjee, G. (2025). Advancing energy efficiency: innovative technologies and strategic measures for achieving net zero emissions. *Carbon Footprints*, 4(1), N-A.
6. M. A. Bermeo-Ayerbe, C. Ocampo-Martinez, and J. Diaz-Rozo, "Data-driven energy prediction modeling for both energy efficiency and maintenance in smart manufacturing systems," *Energy*, vol. 238, pt. B, Art. 121691, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121691.
7. May, G., Barletta, I., Stahl, B., & Taisch, M. (2015). Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency. *Applied Energy*, 149, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.065>
8. Yasuri, A. K. (2025). Harnessing Entropy: Innovations in Energy Efficiency and Sustainability. *Sustainable Futures*, 100952.
9. Tan, D., Suvarna, M., Tan, Y. S., Li, J., & Wang, X. (2021). A three-step machine learning framework for energy profiling, activity state prediction and production estimation in smart process manufacturing. *Applied Energy*, 291, Art. 116808. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116808>
10. Barenji, A. V., Liu, X., Guo, H., & Li, Z. (2021). A digital twin-driven approach towards smart manufacturing: Reduced energy consumption for a robotic cell. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(7-8), 844-859. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1775297>

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

DI Dr. techn. Martin Paczona

contact@martin-paczona.com

[LinkedIn Martin-Paczona](#)