

Cercetări privind managementul costurilor pentru optimizarea capacității de producție și a celei operaționale în cadrul Industriei 4.0

Teza de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie și Management

autor Dipl. Kffr. M.A. Eng. Elif OCAKCI (OCAKCI-NIEMANN)

Conducător științific Prof.univ.dr.ing. Anca DRAGHICI

luna 9, anul 2025

1. Context și motivație: A patra revoluție industrială

Apariția celei de-a patra revoluții industriale, cunoscută sub numele de Industria 4.0, marchează o transformare profundă a producției industriale, a strategiilor operaționale și a organizării economice. Industria 4.0 (I4.0) se caracterizează prin integrarea sistemelor cyber-fizice (CPS), a internetului obiectelor (IoT), a analizei datelor mari (BDA), a Cloud Computing-ului și a inteligenței artificiale (AI). Aceste tehnologii permit crearea unor medii de producție inteligente și conectate, care funcționează cu un grad ridicat de automatizare și capacitate de reacție în timp real (Lasi et al., 2014; Xu et al., 2018). Nu este vorba doar de o evoluție tehnologică a sistemelor existente, ci de o schimbare de paradigmă în modul în care companiile gestionează costurile, utilizează capacitatea și optimizează procesele operaționale, în special pe piețele din ce în ce mai complexe și volatile.

Sistemele tradiționale de management al costurilor, adesea bazate pe abordări retrospective și liniare, se dovedesc inadecvate în mediile dinamice și intensive din punct de vedere al datelor din Industria 4.0. Datele în timp real generate de dispozitivele IoT, combinate cu analiza predictivă și luarea deciziilor bazată pe AI, deschid noi oportunități pentru controlul și optimizarea costurilor la nivel detaliat (Oesterreich & Teuteberg, 2016). Această evoluție transformă managementul costurilor dintr-o funcție contabilă statică într-o competență strategică, bazată pe date.

În plus, capacitatea de producție și optimizarea operațională - doi piloni cheie ai competitivității în industria prelucrătoare - sunt, de asemenea, redefinite de tehnologiile Industriei 4.0. Rețelele de senzori încorporați, gemenii digitali și sistemele inteligente de planificare permit niveluri fără precedent de reacție și eficiență (Lu, 2017). Această teză este motivată de nevoia urgentă de a dezvolta o înțelegere integrată a modului în care aceste tehnologii pot fi utilizate nu numai pentru îmbunătățirea operațională, ci și pentru controlul eficient al costurilor în sistemele inteligente de fabricație.

2. Provocările în continuă evoluție din industrie: costuri, capacitate și concurență

Companiile industriale moderne se confruntă cu mai multe provocări: presiunea crescândă asupra costurilor, cerințele dinamice de capacitate, variabilitatea mediului de producție (Dequeant et al., 2016), necesitatea unei mai mari reziliențe în lanțurile de aprovizionare (Ralston & Blackhurst, 2020) și intensificarea concurenței globale. Din 2021, multe firme de producție se confruntă cu probleme grave din cauza unei combinații de perturbări legate de pandemie și conflicte geopolitice, cum ar fi războiul din Ucraina. Aceste crize suprapuse au provocat

întreruperi în fluxurile de materiale, penurii neașteptate de componente cheie și creșteri semnificative ale costurilor logistice și energetice. Ca urmare, companiile se află sub o presiune tot mai mare de a-și reevalua structurile lanțului de aprovizionare și de a le face mai adaptabile și mai rezistente la crize (Bai et al., 2024; Srai et al., 2023). Acești factori sporesc semnificativ complexitatea proceselor industriale și copleșesc din ce în ce mai mult sistemele de producție clasice și instrumentele tradiționale de management.

O provocare cheie în acest sens este managementul costurilor de producție, care sunt în continuă creștere în rețelele moderne cu valoare adăugată. Pe lângă creșterea prețurilor materiilor prime și a costurilor cu personalul, principalele motive pentru aceasta sunt sistemele de producție mai complexe și cerințele mai ridicate privind calitatea și personalizarea produselor (Stock & Seliger, 2016; Jagatheesaperum et al., 2021). Prin urmare, companiile sunt din ce în ce mai obligate să-și eficientizeze și să-și transpore procesele de producție, cu obiectivul de a-și optimiza structura costurilor pe termen lung și de a rămâne competitive (Porter & Heppelmann, 2015; Khan et al., 2025). Managementul costurilor este îngreunată în mod special de creșterea prețurilor la energie, de costurile mai mari ale forței de muncă și de investițiile în metode de producție durabile. Sistemele convenționale bazate pe suprataxe statice și ipoteze fixe privind volumele de producție își ating limitele într-un mediu de piață volatil și oferă doar o bază inadecvată pentru luarea deciziilor (Kaplan & Anderson, 2007). În schimb, tehnologiile digitale permit transparența în timp real a factorilor de cost și sprijină controlul adaptativ și orientat spre viitor al costurilor (Porter & Heppelmann, 2015; Strandhagen et al., 2017).

Asigurarea unor capacități de producție suficiente și flexibile reprezintă o altă provocare. Cererea crescândă de produse personalizate necesită ca unitățile de producție să poată răspunde în mod flexibil și dinamic la cerințele fluctuante (Lasi et al., 2014; Platform Industry 4.0, 2023). Sistemele tradiționale de producție rigide își ating din ce în ce mai mult limitele. Implementarea tehnologiilor digitale, cum ar fi sistemele cyber-fizice (CPS), permite companiilor să-și controleze mai precis planificarea capacității și să răspundă mai rapid la schimbările pieței (Wang et al., 2016; Platform Industry 4.0, 2023).

Creșterea concurenței globale intensifică și mai mult cerințele industriei prelucrătoare. Companiile sunt nevoite nu numai să gestioneze eficient costurile și capacitățile, ci și să se poziționeze strategic pentru a-și asigura avantaje competitive pe termen lung (Müller et al., 2018). Strategiile competitive hibride, care combină eficiența și diferențierea, devin deosebit de importante (Precedence Research, 2025). Capacitatea de a se adapta rapid și de a valorifica noile modele de afaceri digitale și inovații va fi crucială în acest sens (Herman et al., 2016).

Pe lângă transformarea tehnologică, aspectele organizaționale și culturale sunt cruciale pentru implementarea cu succes a tehnologiilor Industriei 4.0. O cultură corporativă orientată spre dezvoltare corelează în mod semnificativ cu utilizarea și succesul tehnologiilor digitale în producție (Wiese et al., 2024; acatech, 2024).

În concluzie, companiile producătoare se confruntă cu sarcina de a-și adapta în mod continuu și sistematic structurile de costuri, planificarea capacității și strategiile competitive la noile evoluții tehnologice și cerințele pieței. Tehnologiile Industriei 4.0 oferă puncte de plecare decisive pentru a răspunde în mod eficient acestor provocări și pentru a asigura avantaje competitive durabile. Costurile, capacitatea și concurența nu mai sunt, așadar, domenii de control izolate, ci sunt strâns legate între ele într-un ecosistem digital care necesită abordări de management integrate.

3. Enunțarea problemei

3.1. Limitări ale managementului tradițional al costurilor în era digitală

Sistemele tradiționale de costuri, cum ar fi costurile standard și costurile bazate pe activități (ABC), au fost concepute pentru sisteme de producție stabile și ierarhice. În mediile dinamice, descentralizate și bogate în date, facilitate de Industria 4.0, aceste modele sunt insuficiente. Adesea, ele nu reușesc să surprindă complexitatea factorilor de cost din sistemele de producție inteligente, cum ar fi costurile de procesare a datelor, utilizarea activelor digitale sau fluctuațiile de energie monitorizate în timp real (Hansen & Mowen, 2021).

Mai mult, modelele convenționale de costuri sunt slab aliniate cu fluxul continuu de informații generate de senzorii IoT și echipamentele inteligente. Ca atare, acestea nu sunt suficient de agile pentru a informa prețurile just-in-time (JIT), alocarea resurselor sau analizele costurilor de servire în condiții dinamice (Gunasekaran et al., 2017).

3.2. Necesitatea unei abordări integrate a costurilor, capacității și operațiunilor

Separarea contabilității costurilor, planificării capacității și managementului operațional duce la apariția unor puncte nevralgice în procesul decizional. Diferitele funcții organizaționale se bazează adesea pe propriile date distincte și funcționează în baza unor ipoteze separate, ceea ce face ca luarea coordonată a deciziilor și răspunsul agil să fie mult mai dificile (Otley, 2016). Pe de altă parte, Industria 4.0 permite convergența datelor între sistemele de producție, logistică, finanțe și asigurarea calității, oferind astfel posibilitatea unui sprijin integrat și în timp real pentru luarea deciziilor (Brettel et al., 2014).

Pentru a exploata acest potențial, este necesar un nou cadru conceptual, care să conecteze tehnologiile digitale cu procesele de luare a deciziilor de afaceri, pentru a crește transparența costurilor, a alinia capacitățile cu volatilitatea cererii și a îmbunătăți performanța operațională. Această teză își propune să acopere această lacună centrală în teorie și practică.

4. Obiective și întrebări de cercetare

4.1. Obiectivele cercetării

Această cercetare doctorală urmărește, prin obiectivul său general, analiza, structurarea și dezvoltarea în mod sistematic a managementului costurilor în contextul proceselor de producție industrială în condițiile transformării digitale prin Industria 4.0. Pe baza acestui obiectiv, se pot deriva cinci obiective specifice de cercetare:

Obiectivul 1: Analiza transformării categoriilor de costuri prin Industria 4.0

Studiul își propune să arate cum tehnologiile Industriei 4.0 și mecanismele de control digitalizate schimbă percepția, evaluarea și prioritizarea categoriilor de costuri operaționale în producția industrială. Ar trebui să se stabilească dacă și în ce formă noile elemente de cost - cum ar fi costurile de sustenabilitate sau de management al datelor - sunt integrate în controlul operațional.

Obiectivul 2: Evaluarea eficacității practicilor de management digital al costurilor

Obiectivul este de a efectua o evaluare diferențiată a acelor practici de management al costurilor care sunt considerate deosebit de potrivite pentru optimizarea capacităților de producție și creșterea eficienței operaționale în contextul proceselor de transformare digitală. Studiul ar

trebui să stabilească în ce măsură metodele tradiționale (de exemplu, contabilitatea lean, ABC/TDABC) și abordările moderne bazate pe date (de exemplu, analiza predictivă, calcularea costurilor în timp real) diferă în ceea ce privește adecvarea lor.

Obiectivul 3: Investigarea sistemelor de sprijinire a deciziilor bazate pe date

Teza își propune să investigheze impactul sistemelor de sprijinire a deciziilor bazate pe date, al platformelor de informații în timp real și al rapoartelor automate asupra controlului operațional și transparenței costurilor în întreprinderile industriale. Scopul este de a determina rolul sistemelor ERP/MES, al arhitecturii IoT și al mijloacelor analitice pentru controlul și managementul strategic a producției.

Obiectivul 4: Evaluarea contribuțiilor Industriei 4.0 la sustenabilitate și reziliență

Studiul își propune să clarifice măsura în care tehnologiile Industriei 4.0 contribuie la integrarea obiectivelor de sustenabilitate (de exemplu, reducerea emisiilor de CO₂, eficiența energetică) și a strategiilor de reziliență (de exemplu, capacitatea de reacție la perturbări) - în special în contextul șocurilor exogene, cum ar fi pandemia COVID-19. Vor fi analizate atât nivelurile de impact strategic, cât și cele operaționale.

Obiectivul 5: Identificarea barierelor structurale în calea transformării digitale în managementul costurilor

Scopul este de a identifica barierele structurale, organizaționale și tehnice care împiedică implementarea eficientă a strategiilor digitale de optimizare a costurilor. În plus, trebuie dezvoltate abordări strategice cu privire la modul în care companiile pot face față acestor provocări - de exemplu, prin formare, ajustări ale guvernantei sau selecția tehnologiei.

Aceste obiective de cercetare servesc la operaționalizarea întrebărilor de cercetare într-o manieră științifică solidă. Ele structurează analizele empirice și teoretice ulterioare și constituie baza pentru obținerea de concluzii, recomandări de acțiune și necesități de cercetare viitoare în capitolul 5.

4.2. Întrebări de cercetare

Pe baza obiectivelor de cercetare definite anterior, este necesar să se traducă concluziile centrale ale acestei lucrări în întrebări care să ghideze cercetarea. Obiectivele cercetării servesc ca și cadru conceptual care definește tema centrală și structura țintă a studiului. Acestea abordează aspecte cheie ale transformării digitale în managementul costurilor industriale, inclusiv factori tehnologici, condiții organizaționale, căi de impact asupra proceselor și obiective strategice precum eficiența, reziliența și durabilitatea. Pentru a permite analiza empirică și teoretică sistematică a acestor domenii țintă, mai jos sunt derivate cinci întrebări de cercetare specifice.

Acestea constituie nucleul analitic al lucrării și structurează investigația în termeni de conținut și metodologie. Fiecare întrebare este concepută astfel încât să poată fi atribuită unuia sau mai multor obiective de cercetare și, în același timp, să permită o abordare operațională a analizei datelor empirice. Aceste întrebări de cercetare primesc răspunsuri în contextul unei analize a literaturii de specialitate (capitolul 3), al unei investigații empirice (capitolul 4) și al unei reflecții finale și integrări a rezultatelor (capitolul 5). Întrebarea centrală de cercetare va fi:

Cum pot fi integrate tehnologiile Industriei 4.0 în managementul costurilor și planificarea capacității de producție pentru a îmbunătăți performanța operațională în întreprinderile de producție?

Această întrebare centrală de cercetare este împărțită în cinci sub-întrebări care ajută la structurarea rezultatelor cercetării într-o manieră diferențiată:

1. Cum schimbă digitalizarea evaluarea și prioritizarea categoriilor de costuri în producția industrială, în special sub influența tehnologiilor Industriei 4.0?
2. Care practici de management al costurilor sunt percepute ca fiind deosebit de eficiente în mediul industrial pentru optimizarea capacităților de producție și a eficienței operaționale și în ce fel diferă acestea, relativ la adecvarea lor în diferite sisteme de producție?
3. Cum influențează luarea deciziilor bazate pe date și sistemele de informații în timp real controlul operațional și transparența costurilor în Industria 4.0?
4. În ce măsură tehnologiile Industriei 4.0 contribuie la integrarea obiectivelor de sustenabilitate și a strategiilor de reziliență, în special în condițiile pandemiei COVID-19?
5. Ce provocări structurale îngreunează implementarea măsurilor de optimizare digitală a costurilor și cum pot companiile să le contracareze în ceea ce privește transformarea strategică?

Problemele ridicate de aceste întrebări vor servi drept ghid pentru structurarea cercetării și evaluarea rezultatelor, așa cum este prezentat în capitolele următoare ale tezei.

5. Domeniul de aplicare și limitele cercetării

Acest studiu se concentrează pe analiza tehnologiilor Industriei 4.0 în ceea ce privește impactul lor asupra managementului costurilor, controlului capacității și competitivității în producția industrială. Accentul se pune pe companiile producătoare din sectoarele industriale care au o afinitate puternică pentru sistemele de producție digitalizate și automatizate. Sectoarele din afara producției industriale, cum ar fi sectorul serviciilor sau cel agricol, nu sunt incluse, deoarece dinamica costurilor și a capacității diferă semnificativ în cazul acestora. Studiul nu se limitează la o anumită regiune, ci ia în considerare în primul rând companiile din țările industrializate, deoarece acestea sunt pionieri în implementarea tehnologiilor Industriei 4.0. Datorită complexității și naturii dinamice a subiectului, studiul se limitează la analize calitative și cantitative ale literaturii științifice existente și la exemple practice selectate. De asemenea, a fost implementat un sondaj pe bază de chestionar pentru a genera date empirice. Deși chestionarul a fost completat de diferiți respondenți, la nivel internațional, statisticile utilizate în studiu se bazează în mare parte pe populația și industria germană (datorită dominantei respondenților). O limitare este faptul că, pe lângă chestionar, analiza se bazează în principal pe date secundare și publicații științifice existente. Studiile empirice extinse privind piețele internaționale nu fac parte din acest studiu. Datorită evoluției continue a tehnologiei, este posibil ca acest studiu să nu reflecte evoluțiile de care au avut loc după finalizarea sa, în special în domeniile legate de instrumente sau modele organizaționale emergente. Limita de timp a literaturii disponibile până în 2025 inclusiv reprezintă o altă limitare a studiului.

Principalele limitări ale studiului sunt determinate de următoarele aspecte:

- Diferențele în ceea ce privește maturitatea adoptării Industriei 4.0 între companii și regiuni;
- Disponibilitatea și coerența limitată a datelor relevante;
- Transferabilitatea limitată a rezultatelor către companii neindustriale sau care nu utilizează intens tehnologia;
- Posibila obsolescență a detaliilor tehnologice din cauza dezvoltării rapide a instrumentelor digitale.

Aceste limitări sunt subliniate în mod intenționat pentru a menține claritatea și focalizarea studiului, păstrând în același timp relevanța sa fundamentală atât pentru contextul academic, cât și pentru cel practic.

6. Structura și metodologia cercetării

Teza este structurată în opt capitole. Conform figurii 1, primul capitol conține o introducere în subiect și prezintă contextul cercetării, enunțul problemei, obiectivele, semnificația, sfera de aplicare și limitările cercetării efectuate.

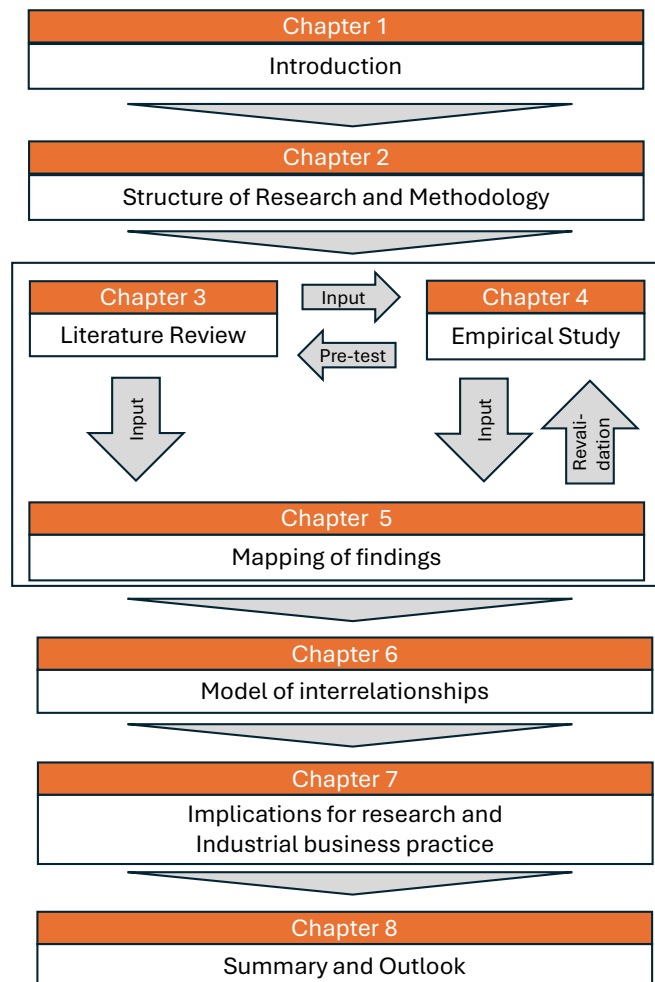


Figura 1: Metodologia de cercetare a tezei (sursa: grafic propriu)

Capitolul 2 descrie metodologia de cercetare și explică în detaliu proiectul de cercetare, sursele de date, instrumentele analitice și metodele de validare utilizate în capitolele 3 și 4.

Capitolul 3 prezintă concluziile analizei literaturii de specialitate. Capitolul examinează teoriile și cercetările existente privind managementul costurilor, optimizarea capacității și producția digitală.

Capitolul 4 analizează rezultatele studiului empiric realizat cu participanți din industrie. Rezultatele cercetării bibliografice și constatările empirice vor fi prezentate și discutate în capitolul 5. În ceea ce privește obiectivele cercetării și întrebările de cercetare, rezultatele au servit la elaborarea unui cadru de interrelații între Industria 4.0, capacitatea de producție, eficiența costurilor, reziliența și durabilitatea. Acest cadru este prezentat în capitolul 6 și servește ca sinteză a rezultatelor cercetării teoretice și empirice.

Pe baza rezultatelor cercetării și a cadrului, capitolul 7 prezintă concluziile generale,

contribuția originală și propunerile pentru viitoare studii de cercetare. În plus, conținutul capitolului derivă și propune implicații pentru cercetarea academică și recomandări pentru practica industrială.

Capitolul 8 rezumă procesul de cercetare executat, evidențiază concluziile cheie și prezintă posibilele evoluții viitoare.

7. Contribuții și implicații

7.1. Contribuția la teoria academică

Acest studiu extinde înțelegerea științifică prin corelarea teoriei contabilității costurilor cu managementul operațiunilor digitale. Acesta îmbogățește discursul teoretic în domeniul contabilității de gestiune prin adaptarea modelelor de contabilitate a costurilor la mediile de date în timp real și extinde teoria sistemelor pentru a include interdependențele digitale în producția industrială (Otley, 2016).

Cadrul interdisciplinar dezvoltat în această teză contribuie la o bază teoretică pentru înțelegerea modului în care Industria 4.0 schimbă comportamentul costurilor, planificarea resurselor și indicatorii de performanță. Astfel, acesta acoperă decalajul dintre contabilitate, cercetarea operațională și sistemele informatice.

7.2. Implicații practice pentru industrie și politici

Pentru industrie, această cercetare oferă un cadru practic pentru utilizarea ținută a tehnologiilor Industriei 4.0 în managementul costurilor și a capacităților. Ea arată companiilor avantajele și dezavantajele și le sprijină în luarea de decizii informate cu privire la introducerea tehnologiilor inteligente. De asemenea, oferă informații valoroase pentru factorii de decizie: rezultatele identifică factorii cheie de succes pentru transformarea digitală și arată cum pot fi proiectate structuri de stimulare adecvate. Pentru economiile puternic industrializate, aceasta oferă puncte de plecare pentru consolidarea durabilă a forței inovatoare și a competitivității printr-o politică industrială ținută.

7.3. Perspective

Teza demonstrează că tehnologiile Industriei 4.0 oferă un potențial semnificativ pentru transformarea managementului costurilor și a planificării capacității de producție. Cu toate acestea, succesul depinde de integrarea strategică, de dezvoltarea continuă a competențelor și de disponibilitatea de a regândi abordările tradiționale de management. Pandemia COVID-19 a consolidat importanța rezilienței digitale și a determinat companiile să accelereze strategiile de digitalizare. Cercetările arată că implementarea cu succes a Industriei 4.0 în managementul costurilor necesită nu numai schimbări tehnologice, ci și schimbări organizaționale și culturale. Companiile care stăpânesc cu succes această transformare holistică pot obține avantaje competitive durabile, contribuind în același timp la atingerea obiectivelor de sustenabilitate și reziliență.

8. Bibliografie selectivă

- [1] acatech. (2024). Kurzformat Erfolg im Mittelstand. Acatech
- [2] Bai, X., Fernández Villaverde, J., Li, Y., & Zanetti, F. (2024). The causal effects of global supply chain disruptions on macroeconomic outcomes: Evidence and Theory

- (NBER Working Paper No. 32098). Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w32098>
- [3] Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Information and Communication Engineering*, 8(1), 37–44.
- [4] Dequeant, K., Vialletelle, P., Lemaire, P., & Espinouse, M. (2016). A literature review on variability in semiconductor manufacturing: The next forward leap to Industry 4.0. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 1–8. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3042094.3042419>
- [5] Gunasekaran, A., Papadopoulos, T., Dubey, R., Fosso, S.W., Childe, S. J., Hazen, B., Akter, S. (2017). Big data and predictive analytics for supply chain and organizational performance, *Journal of Business Research*, Volume 70, Pages 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.08.004>.
- [6] Hansen, D. R., Mowen, M. M., & Heitger, D. L. (2021). *Cost Management*. Cengage Learning.
- [7] Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios," 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI, USA, 2016, pp. 3928–3937, <https://doi:10.1109/HICSS.2016.488>
- [8] Jagatheesaperumal, S. K., Rahouti, M., Ahmad, K., Al-Fuqaha, A., & Guizani, M. (2021). The duo of artificial intelligence and big data for Industry 4.0: Review of applications, techniques, challenges, and future research directions. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(15), 12861–12885. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2021.3139827>
- [9] Kaplan, R. S., & Anderson, S. R. (2007). *Time-Driven Activity-Based Costing: A Simpler and More Powerful Path to Higher Profits*. Harvard Business Press.
- [10] Khan, M. I., Yasmeen, T., Khan, M., Hadi, N. U., Asif, M., Farooq, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2025). Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: Pathways and prospects. *Sustainable Production and Consumption*, 54, 149–189. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012>
- [11] Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- [12] Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- [13] Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K.-I. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.12.019>
- [14] Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>

- [15] Otley, D. T. (2016). The contingency theory of management accounting and control: 1980–2014. *Management Accounting Research*, 31, 45–62.
<https://doi.org/10.1016/j.mar.2016.02.001>
- [16] Plattform Industrie 4.0. (n.d.). Chancen durch Industrie 4.0: Von smarten Objekten und vernetzten Maschinen zurück zum Menschen. <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Standardartikel/chancen-durch-industrie-40.html>
- [17] Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2015). How smart, connected products are transforming companies. *Harvard Business Review*, 93(10), 96–114.
- [18] Precedence Research. (2025). Industry 4.0 market size, share & growth analysis 2025–2034. Precedence Research. Industry 4.0 Market Size to Hit Around USD 884.84 Billion By 2034
- [19] Ralston, P., & Blackhurst, J. (2020). Industry 4.0 and resilience in the supply chain: A driver of capability enhancement or capability loss? *International Journal of Production Research*, 58(16), 5006–5019.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1736724>
- [20] Srai, J. et al. (2023). Operations locked in amid geopolitical conflicts: A study of the 2022 disruptions. *International Journal of Operations & Production Management*.
- [21] Strandhagen, J. & Alfnes, E. & Strandhagen, J. Ola & Vallandingham, L. (2017). The fit of Industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple case study. *Advances in Manufacturing*. 5. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0200-y>
- [22] Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- [23] Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the Art and Future Trends. *International Journal of Production Research*, 56, 2941–2962.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- [24] Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016). Towards Smart Factory for Industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data-based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158–168.
- [25] Wiese, S. A., Lehmann, J., & Beckmann, M. (2024). Organizational culture and usage of Industry 4.0 technologies. Evidence from Swiss businesses. *arXiv preprint arXiv:2412.12752*.