FluxLane-Studie

Wann rechnet sich hochautomatisierte Produktion in Deutschland?

Eine Modell- und Sekundärdatenstudie zu Vollkosten je gutem Teil, vier Alternativen und Standortbedingungen

Studie I der fluxlane-Forschungsreihe zur Automatisierungsdividende · Pfad B · Modell- und Sekundärdatenstudie

Fassung 1.0 · Stand: 18. November 2026 · Deutschland

Einordnung. Modell- und Sekundärdatenstudie. Keine Betriebsdatenerhebung, keine Rechts-, Steuer-, Anlage- oder Investitionsberatung, keine Prognose. Die Ergebnisse sind Rechnungen unter offengelegten Annahmen; sie sind keine Entscheidungsgrundlage für konkrete Investitionen.

Entstehung. Text und Rechnungen sind mit Unterstützung eines KI-Systems entstanden; verantwortlich ist die Redaktion von fluxlane. Die Rechenprogramme, Eingaben und Nachweise sind offengelegt (Nachweise: Begleitdatei „Nachweise“). Die Studie ist eine redaktionelle Eigenrechnung und nicht fachlich begutachtet. Es wurden keine Unternehmen kontaktiert und keine Betriebsdaten erhoben.

Pflichtsatz. Jede Rechenaussage steht unter dem Satz: *Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.*

Steckbrief

Merkmal	Wert
Dokumenttyp	Modell- und Sekundärdatenstudie
Zielgruppe	Betriebe und Planende, die Alternativen prüfen; Redaktionen und Öffentlichkeit; Forschung
Fassung	1.0 vom 18. November 2026
Stand	18. November 2026
Umfang	12.943 Wörter, 29 Seiten
Belege	Quellenverzeichnis mit Kennung, Quelle und Art der Quelle (Abschnitt 12); Nachweise im Begleitdokument
Gliederung	12 Hauptabschnitte, 24 Tabellen

Inhalt

1 Zusammenfassung . . . 5

2 Forschungsfragen und Hypothesen . . . 6

2.1 Pfad A: Hypothesenpfad, unverändert . . . 6

2.2 Pfad B: Fragen der Modellstudie . . . 6

3 Forschungsstand . . . 7

3.1 Verbreitung als Kontext, nicht als Rechengröße . . . 7

3.2 Öffentliche Wirtschaftlichkeitsrechnungen und ihre Eingaben . . . 7

3.3 Anlaufkosten und komplementäre Investitionen . . . 8

3.4 Datenlücke . . . 8

4 Methodik . . . 8

4.1 Datenklassen . . . 8

4.2 Der Annahmensatz . . . 9

4.3 Modellprozess . . . 10

4.4 Die vier Alternativen . . . 10

4.5 Formeln . . . 11

4.6 Äquivalenztest . . . 11

4.7 Aufnahmekriterien für Fälle . . . 11

4.8 Standortübersetzung . . . 12

4.9 Methodenwechsel und Reihenfolge . . . 12

4.10 Doppelte Rechnung und ihre Grenze . . . 13

5 Ergebnisse . . . 13

5.1 Kosten je gutem Teil . . . 13

5.2 Arbeitsstunden, direkt und indirekt . . . 14

5.3 Kapital, Energie, Wartung, Integration . . . 14

5.4 Break-even und Kippauslastung . . . 15

5.5 Auslastung und Produktmix . . . 16

5.6 Schwellen für Arbeits-, Kapital- und Energiekosten im Inland . . . 16

5.7 Standortvergleich Deutschland, China, USA . . . 17

5.8 Materialanteil, Fertigungstiefe und Kapital (nachträglich ergänzt) . . . 19

5.9 Risiken: Kippauslastung und Stillstand . . . 19

6 Fälle . . . 20

6.1 Ergebnis der Kriterienprüfung . . . 20

6.2 Was zu den acht Fällen belegt ist . . . 21

6.3 Kandidaten mit Datenlücken . . . 21

6.4 Auslastung als Mechanismus . . . 21

7 Sensitivität . . . 21

8 Grenzen der Aussagen und Gegenprobe . . . 22

8.1 Wann die Aussagen nicht tragen . . . 22

8.2 Strukturannahmen ohne Quellendeckung . . . 23

8.3 Die fehlende nachsteuerliche Variante . . . 24
8.4 Beobachtung zu einer Bachelorarbeit: Break-even [Q56] . . . 24
8.5 Vergleich mit einem früheren fluxlane-Beitrag (nachträglich ergänzt) . . . 24
8.6 Weitere Grenzen . . . 24
9 Interpretation . . . 25
9.1 Was die Rechnung zeigt . . . 25
9.2 Was daraus nicht folgt . . . 25
10 Hinweise nach Adressaten, nur bedingt . . . 25
11 Grenzen der Verallgemeinerung . . . 26
12 Quellenverzeichnis . . . 26

Rechtliche Hinweise **28**

Keine Beratung . . . 28
Keine Zusicherung, keine Konformitätsaussage . . . 28
Rechtsstand . . . 28
Haftung . . . 28
Verweise auf fremde Inhalte . . . 28
Marken und Produktbezeichnungen . . . 28
Urheberrecht und Nutzung . . . 28
Keine personenbezogenen Daten . . . 29
Unabhängigkeit . . . 29
Anwendbares Recht . . . 29

Impressum und Verantwortlichkeit

Die folgenden Angaben sind wörtlich dem Impressum von fluxlane.eu entnommen, abgerufen am 24. September 2026. Sie wurden nicht ergänzt und nicht umformuliert.

Angabe	Inhalt
Angaben gemäß § 5 DDG	WebTrades GmbH Am Ölberg 2 55459 Grolsheim Deutschland
Vertreten durch	Geschäftsführerin: Laurice Bussmer
Kontakt	Telefon: 0170 890 78 00 E-Mail: info@fluxlane.eu
Registereintrag	Eintragung im Handelsregister Registergericht: Amtsgericht Mainz Registernummer: HRB 54479
Umsatzsteuer-ID	Umsatzsteuer-Identifikationsnummer gemäß § 27 a Umsatzsteuergesetz: DE461650292
Redaktionell verantwortlich	Verantwortlich für den Inhalt nach § 18 Abs. 2 MStV: Laurice Bussmer, Am Ölberg 2, 55459 Grolsheim
Verbraucherstreitbeilegung	Wir sind nicht bereit oder verpflichtet, an Streitbeilegungsverfahren vor einer Verbraucherschlichtungsstelle teilzunehmen.

Redaktioneller Hinweis des Herausgebers (wörtlich)

„fluxlane ist ein unabhängiges, redaktionelles Fachportal für Robotik, autonome physische Systeme und verkörperte KI. Der redaktionelle Geltungsbereich umfasst Industrie und Produktion, Logistik, Medizin, Pflege und Rehabilitation, Service und Haushalt sowie Forschung, Hersteller, Markt und Regulierung; künstliche Intelligenz gehört dazu, auch ohne physischen Körper. Die Inhalte dienen der allgemeinen Information und stellen keine Rechts-, Kauf- oder Anlageberatung dar. Angaben zu Preisen, Verfügbarkeit und Terminen erfolgen ohne Gewähr und können sich jederzeit ändern.“

Zitierweise

FluxLane (2026): Wann rechnet sich hochautomatisierte Produktion in Deutschland? Eine Modell- und Sekundärdatenstudie zu Vollkosten je gutem Teil, vier Alternativen und Standortbedingungen. Fassung 1.0, Stand 18. November 2026. Herausgegeben von der WebTrades GmbH, Grolsheim, fluxlane.eu.

Herstellung dieses Dokuments

Das vorliegende PDF ist maschinell aus der Markdown-Fassung des Manuskripts gesetzt. Vor dem Satz prüft das Erzeugungsskript Belegziffern gegen das Literaturverzeichnis und die Anrede. Gesetzt wurde mit IBM Plex Sans und Sora.

Abbildungsnachweis

Diese Studie enthält keine Abbildungen.

1 Zusammenfassung

Frage. Ab welchen Arbeits-, Kapital- und Energiekosten liegen die Vollkosten je gutem Teil einer automatisierten deutschen Fertigung unter denen der Alternativen, und ab welchen Kosten ist sie gegenüber automatisierten Standorten in China und den USA konkurrenzfähig? Die Studie beantwortet das für einen **definierten Modellprozess**: eine Werkzeugmaschine mit einem Referenzteil von sechs Minuten Zykluszeit, gefertigt in Losen und Varianten, in vier Alternativen von der Fortführung (A0) bis zum maschinenorientierten Re-Design (A3).

Einordnung der Methode. Das vorab festgelegte Studienprotokoll sah einen Hypothesenpfad vor (Pfad A, H1 bis H5). Sein Abbruchkriterium A1 wurde am 17.11.2026 ausgelöst, weil kein Mittelstandsfall vorliegt; Pfad A ist deshalb **nicht testbar**. Danach wurde Pfad B eingeführt, eine Modellrechnung ohne Fallbezug, die Pfad A nicht ersetzt und über H1 bis H5 kein Urteil fällt. Für den Mittelstand gilt: „Für den Mittelstand liegt in diesem Pfad kein Fall vor; Aussagen zum Mittelstand sind nicht möglich."

Aussagekraft. Von 81 Modelleingaben sind 63 gesetzt, also nicht aus einer Quelle abgeleitet; elf tragen einen Basiswert aus einer Quelle (drei beobachtet, acht Modellannahmen Dritter), sieben mischen Quelle und Setzung. Kein geprüfter Fall erfüllt die Aufnahmekriterien. Die Aussagen sind so belastbar wie die gesetzten Eingaben und ihre Bandbreiten; sie sind keine Häufigkeits-, Branchen- oder Mittelstandsaussage.

Ergebnisse, jeweils bedingt auf den Annahmensatz.

1. *Inland, Kippauslastung.* Die selektive Nachrüstung (A2) ist im Rechenpunkt ab einer Nachfrageauslastung von rund 0,12 günstiger je gutem Teil als die Fortführung (A0), das sind rund 7.300 gute Teile im Jahr. Über ein Gitter aus acht Eingaben mit je drei Stufen (6.561 Kombinationen, drei hoch acht) liegt diese Grenze zwischen 0,07 und 0,36 (10- und 90-Prozent-Quantil der 6.546 Gitterpunkte mit Kipp), im Median bei 0,16. In 15 der 6.561 Gitterpunkte wird A2 nie günstiger; das ist eine Zählung im Gitter und keine Häufigkeit in der Wirklichkeit.
2. *Rangfolge.* Mit steigender Auslastung wechselt die günstigste Alternative von A0 über A1 zu A2. A3 wird nur dort die günstigste, wo A2 die Menge nicht mehr schafft (Kapazitätseffekt bei mindestens 50 Varianten). Wo beide die Menge schaffen, ist A2 im Basisfall immer günstiger als A3.
3. *Schwellen im Inland.* Bei Lohnkosten von 28 bis 50 EUR je Stunde ist A2 bei den Auslastungen 0,3, 0,5 und 0,7 günstiger als A0; die Lohnschwelle liegt dort bei 15, 8,7 und 6,1 EUR je Stunde. Der Anlagenpreis darf bei u = 0,5 bis zum rund 5,2-Fachen des Annahmensatzes steigen, bevor A2 gegenüber A0 verliert. Der Strompreis kippt die Rangfolge im Inland im Modell nicht, weil die Zelle wenig Leistung zieht.
4. *Standort.* Bei gleicher Technik liegen die Stückkosten einer deutschen Anlage bei u = 0,5 rund 4,9 Prozent über der chinesischen und rund 1,8 Prozent über der amerikanischen. Der Abstand zu China hängt am stärksten an der Auslastung und an der Variantenzahl; der gesetzte Materialanteil von 74 Prozent bestimmt zusätzlich, wie viel vom Kostenabstand überhaupt sichtbar wird.
5. *Wer den Abstand trägt.* Gegenüber China trägt bei automatisierter Anlage (A2) der Lohn rund 80 Prozent des verbleibenden Abstands, der Strom rund 16 und das Kapital rund 5 Prozent. Gegenüber den USA überwiegt der Strom (rund 63 Prozent), der Lohn trägt rund 37 Prozent.
6. *Konkurrenzfähigkeit.* Ob die deutsche automatisierte Anlage „konkurrenzfähig" ist, entscheidet fast vollständig der Parameter δ, die als tolerierbar gesetzte Preislücke. **δ ist nicht belegt.** Bei δ = 0 ist Gleichstand mit der chinesischen Anlage über Energie oder Zins nie, über den Lohn erst bei rund 2,3 EUR je Stunde erreichbar; bei δ = 5 Prozent genügt der Basispunkt knapp.
7. *Risiko.* Ein Nachfrageeinbruch um 30 Prozent oder eine Investitionsüberschreitung um 50 Prozent macht A3 teurer als A0; A2 bleibt in allen drei Stressfällen und in ihrer Kombination günstiger als A0.

Was nicht gezeigt wird. Nicht gezeigt wird, dass ein reales Werk diese Kostenstruktur hat, wie oft solche Bedingungen vorliegen, ob Betriebe die Alternativen so wählen und ob die Ergebnisse nach Steuern und Förderung gleich ausfallen. Die im Protokoll verlangte nachsteuerliche Variante fehlt in Pfad B und ist eine ausgewiesene Lücke (Abschnitt 8.3).

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

2 Forschungsfragen und Hypothesen

2.1 Pfad A: Hypothesenpfad, unverändert

Das Studienprotokoll (festgelegt am 16.11.2026, danach nicht geändert) fragt, unter welchen dokumentierbaren Betriebs-, Markt- und Investitionsbedingungen die Vollkosten je gutem, abgenommenem Produkt nach einer Automatisierungsentscheidung in einem deutschen Produktionsprozess niedriger sind als bei den realistischen Alternativen. Die Teilfragen betreffen die Vollkosten (F1), die Rangfolge der vier Alternativen (F2) und den Standortvergleich im Fallpaar (F3). Die Hypothesen sind vorab festgelegt und werden hier **weder verändert noch beurteilt**. „Nicht testbar“ bedeutet: Die Voraussetzung des Tests fehlt; es gibt weder Bestätigung noch Widerlegung.

ID	Aussage laut Protokoll (verkürzt)	Stand
F1, F2	Vollkosten und Rangfolge der Alternativen innerhalb vorab festgelegter Bandbreiten	nicht testbar
F3	Standortvergleich im Fallpaar	nicht testbar (kein Fallpaar)
H1	K_gut(A2 oder A3) liegt bei überdurchschnittlicher Auslastung und unterdurchschnittlicher Variantenzahl um mehr als 10 Prozent unter K_gut(A0)	nicht testbar
H2	Rangfolge wechselt innerhalb der festgelegten Bandbreite	nicht testbar
H3	Herstellerangaben überzeichnen den realisierten Effekt	in dieser Studienphase nicht vorgesehen, nicht getestet
H4	Nach Automatisierung beider Standorte bleibt ein Nachteil, der vom Lohn zu Energie und Kapital wandert	nicht testbar (kein Fallpaar)
H5	Mindestens ein deutscher Revisionsfall mit Kostengröße aus unabhängiger Quelle	nicht testbar; im abgelegten Bestand kein solcher Fall

Die vorab festgelegten Gegenhypothesen (G1 Verlagerung der Stunden, G2 keine Rangfolgeänderung, G3 Bestätigung der Herstellerangaben, G4 Verschwinden des Standortnachteils, G5 kein deutscher Revisionsfall, G6 Sicherung statt Ausbau) bleiben ebenfalls ungetestet. Grund der Nichttestbarkeit: Für keinen der acht Fälle liegen beide Mediane der Herleitungsregel, eine festgelegte Bandbreite oder ein bestandener Äquivalenztest vor; die Rechentabelle der Fallwerte ist leer (0 von 32 Fall-Alternative-Zeilen mit Eingaben). Das Abbruchkriterium A1 („Weniger als fünf Fälle mit Primärbelegen oder kein Mittelstandsfall“) wurde am 17.11.2026 ausgelöst; der erste Teil trifft nach Nachbeschaffung zweier Quellen nicht mehr zu (fünf Fälle mit Primärbeleg), der zweite Teil trifft zu. **A1 und die Hypothesen bleiben wörtlich unverändert.** Aus „nicht testbar“ folgt weder, dass sich Automatisierung rechnet, noch dass sie sich nicht rechnet.

2.2 Pfad B: Fragen der Modellstudie

Pfad B wurde nach dem Auslösen des Abbruchkriteriums A1 am 17.11.2026 eingeführt und wird hier ausdrücklich so benannt. Er ergänzt Pfad A in einer dokumentierten Protokollergänzung vom 18.11.2026, die Pfad A unverändert lässt, und hat eine andere Fragestellung und geringere Aussagekraft. Er formuliert **keine Hypothesen**, sondern Fragen an ein Modell: Unter welchen ausdrücklich benannten Annahmen liegen die Break-even-Grenzen (Break-even-Menge, Kippauslastung, Rangwechsel der Alternativen A0 bis A3) für einen definierten Prozess, und welche dieser Annahmen sind durch öffentlich belegte Fälle gedeckt, welche nicht? Daraus folgen sechs Teilfragen, die zugleich die Offenlegung der Kapital-, Energie- und Arbeitskostenschwellen abbilden.

Die sechs Teilfragen lauten:

Nr	Teilfrage
B1	Bei welcher Auslastung ist die jeweils teurere, kapitalintensivere Alternative im Inland günstiger als die Fortführung (Kippauslastung), und wie breit ist diese Grenze unter den Bandbreiten der Eingaben?
B2	Wie ändert sich die Rangfolge der vier Alternativen mit Auslastung und Variantenzahl?
B3	Bis zu welchen Lohn-, Kapital-, Anlagenpreis- und Energiekosten bleibt A2 beziehungsweise A3 im Inland günstiger als A0?

Nr	Teilfrage
B4	Wie groß ist der Stückkostenabstand einer deutschen Anlage zu einer chinesischen und einer amerikanischen Anlage gleicher Technik, wer trägt ihn, und ab welchen deutschen Kosten ist sie unter einer gesetzten Toleranz δ konkurrenzfähig?
B5	Wie robust sind diese Aussagen gegen Nachfrageeinbruch, Investitionsüberschreitung und Stillstand?
B6	Welche dieser Annahmen sind durch öffentlich belegte Fälle gedeckt?

3 Forschungsstand

Der Forschungsstand beschränkt sich auf die Quellen, die im Quellenverzeichnis (Abschnitt 12) aufgeführt sind. Er zeigt, was öffentlich verfügbar ist, um die Eingaben des Modells zu begründen oder zu begrenzen, und wo die Datenlage endet. Eine Übersicht zur Automatisierungsökonomik im Ganzen ist nicht beabsichtigt.

3.1 Verbreitung als Kontext, nicht als Rechengröße

Die Roboterdichte im verarbeitenden Gewerbe liegt nach einer Pressemitteilung der International Federation of Robotics vom 12.11.2026 in Deutschland bei 469 Einheiten je 10.000 Beschäftigte, in Südkorea bei 1.066 und im globalen Durchschnitt bei 152 [Q01]. Die Dichte ist kein Produktivitätsmaß und sagt nichts über Stückkosten. Die Neuinstallationen in Deutschland fielen 2025 nach einer weiteren Pressemitteilung desselben Verbands um 8 Prozent auf unter 25.000 Einheiten [Q02]; ein exakter Wert steht dort nicht. Eine Befragung der KfW zu KI-Technologien im Mittelstand (Zeitraum 2022 bis 2024, Fokus Volkswirtschaft Nr. 554) weist aus, dass Technologien zur physischen Bewegung von Maschinen anhand autonomer Entscheidungen von lediglich 1 Prozent der befragten mittelständischen Unternehmen eingesetzt werden und damit am seltensten [Q03]. Die KfW vermutet als wesentlichen Grund, dass Industrieroboter erst für größere Unternehmen mit entsprechender Massenproduktion rentabel seien; sie formuliert das als Vermutung („dürfte“), nicht als Messung. Die Vermutung ist ein Anlass, die Auslastungsschwelle im Modell offenzulegen (Abschnitt 5.4); sie ist weder Beleg noch Gegenbeleg.

3.2 Öffentliche Wirtschaftlichkeitsrechnungen und ihre Eingaben

Öffentlich zugängliche Wirtschaftlichkeitsrechnungen zu Automatisierung stammen im abgelegten Bestand überwiegend aus drei Quellentypen, die alle nicht aus dem laufenden Betrieb gemessen sind.

Simulationen mit gesetzten Kosten. Der Leitfaden Wirtschaftlichkeit des Fraunhofer IPA (Revision vom 30.04.2026, nicht begutachtet; der Technologiereifegrad humanoider Roboter ist dort unterstellt) rechnet drei Anwendungsszenarien für humanoide Roboter mit gesetzten Kosten und weist Amortisationszeiten je Investitionsjahr aus: für das Montage-Szenario 3,9 Jahre bei Investition 2028, 2,8 Jahre bei 2031 und 2,0 Jahre bei 2036, für den Materialtransport bei Investition 2028 keine Amortisation innerhalb der fünf Jahre Abschreibungszeit [Q38]. Lohnkosten setzt der Leitfaden mit 33 beziehungsweise 40 EUR je Stunde im ersten Jahr an. Der Leitfaden betrifft humanoide Roboter; seine Ansätze zu Hardware, Engineering und Wartung gehen in dieser Studie nur als Anker für Bandbreiten der Zellen A2 und A3 ein (Abschnitt 4.2), nicht als Beleg für Cobot-Zellen.

Planungs- und Abschlussarbeiten mit Betriebsbezug. Zwei frei zugängliche Bachelorarbeiten rechnen Automatisierungsprojekte mit Betriebsangaben durch: ein Planungskonzept für einen kollaborierenden Roboter in der Elektronikendmontage (2019) [Q56] und eine Untersuchung zur Roboterbeladung von CNC-Drehmaschinen (2022) [Q59]. Beide sind Planungen, keine Betriebsmessungen, und sie sind nicht fachlich begutachtet; die zweite hält die Umsetzung für „nur schwer realistisch und auch wirtschaftlich“ umsetzbar, weil es an ausreichend Aufträgen fehle; die erste verneint die Wirtschaftlichkeit für eine zweite Anwendung. Die erste liefert Komponentenpreise, einen Lohnkostensatz, eine Nutzungsdauer und eine Verfügbarkeit als Planansätze, die zweite einen Investitionsansatz aus neun Posten und eine Amortisationsvorgabe. Zu einer Auffälligkeit in der ersten siehe Abschnitt 8.4.

Praxisleitfäden und Forschungsberichte. Der Leitfaden „Automatisierungspotenziale in der Produktion nutzen“ des Landes Hessen (Broschüre, nicht begutachtet) nennt typische Amortisationszeiten von sechs bis zwölf Monaten für einfache Maschinenbestückung, zwei bis vier Jahre für komplexere Anwendungen und fünf bis sieben Jahre für verkettete Anlagen, gestützt auf ein nicht öffentlich zugängliches Experteninterview (die kurzen Zeiten gelten dort für einfache Tätigkeiten, bei Maschinenbestückung in der Regel, im Extremfall rund ein Monat); er schildert zudem ein

Unternehmen, bei dem die vorgesehene Amortisationszeit durch die entstandenen Kosten von sechs auf neun Jahre stieg [Q60]. Der Schlussbericht des Forschungsvorhabens FlexARob (Berichtszeitraum 2017 bis 2019) weist Komponentenausgaben der Forschungsstelle für eine roboterunterstützte Werkzeugmaschinenbeschickung aus; das sind Ausgaben eines Forschungsvorhabens, keine Betriebswerte [Q61]. Zwei Modellrechnungen für Einzelfälle liegen mit dem Abschlussbericht des Projekts DeMoBat (manuelle Demontage von Traktionsbatterien, Projektbericht) und der Fallstudie zu zehn Baurobotern von Brosque und Fischer (2022, Fachzeitschrift) vor [Q48, Q49]. Beide bestehen den Äquivalenztest nicht (Abschnitt 6).

3.3 Anlaufkosten und komplementäre Investitionen

Brynjolfsson, Rock und Syverson legen in einem Arbeitspapier (NBER, später in einer Fachzeitschrift erschienen; Theorie mit US-Daten) dar, dass der Ertrag allgemeiner Technologien von komplementären, oft immateriellen und schlecht gemessenen Investitionen abhängt und deshalb mit Verzögerung sichtbar wird (Produktivitäts-J-Kurve) [Q13]. Für diese Studie ist das der Grund, das Anlaufkonto (Hochlauf, Integratorstunden, Anlaufausschuss) als Anteil an Hardware und Integration zu aktivieren und seine Bandbreite offenzulegen, statt es auszuklammern.

3.4 Datenlücke

Im abgelegten Bestand (Quellenregister dieser Studie, Stand 18.11.2026; durchsucht wurden die acht Fallblätter, sieben weitere Kandidaten und die in Abschnitt 3.2 genannten Quellen) liegen nur wenige Kontenwerte vor: Von 88 Kontenfeldern (elf je Fall, acht Fälle) tragen 13 eine belegte Zahl, davon vier in der Kontoeinheit wörtlich belegt, und 75 sind nicht erhoben. Die vier wörtlich belegten Werte stammen aus zwei Modellrechnungen Dritter (ein US-Baufall, ein manueller Demontage-Fall ohne Roboteralternative). Im abgelegten Bestand findet sich kein deutscher Betrieb mit öffentlichen Angaben zu direkten und indirekten Stunden, Auslastung, Variantenbandbreite, Kapitalkosten und Energieverbrauch zugleich. Diese Lücke schließt Pfad B nicht; er überbrückt sie mit einem offengelegten Modell. Schließen könnte sie nur eine Erhebung mit Betriebsdaten.

4 Methodik

4.1 Datenklassen

Jeder Wert und jede Ergebnisaussage trägt genau eine Klasse. Die Klassen entsprechen den Belegtypen des Studienprotokolls; neu ist nur die Klasse für Rechenergebnisse, die den Pflichtsatz trägt: *Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.*

Klasse	Belegtyp im Protokoll	Bedeutung in dieser Studie
beobachtet	gemessen	tatsächlich gemessener oder amtlich erhobener Wert, Quelle mit Volltext im Register (zum Beispiel Zinssatz, Strompreisstatistik)
Unternehmensangabe	Angabe des Unternehmens über sich selbst oder Herstellerangabe	Angabe eines Unternehmens über sich selbst, nicht testiert (zum Beispiel Lagebericht, Pressemitteilung)
Modellannahme	referiert (Ursprung Modellannahme Dritter) oder eigene Setzung im Annahmensatz	Planansatz einer Abschlussarbeit, Simulationsparameter, Bandbreitenanker oder eigene Festlegung; nie ein Messwert
berechnet (Modellergebnis)	neu: Modellergebnis	Ergebnis einer Rechnung aus dem Annahmensatz; trägt den Pflichtsatz
nicht nachweisbar	„nicht erhoben“ oder kein Fund im abgelegten Bestand	kein Befund über die Sache

„Gesetzt“ ist **keine Klasse und kein Belegtyp**, sondern die Herkunftsangabe einer Eingabe im Annahmensatz. Der Annahmensatz kennt vier Herkunftswerte: *Quelle* (Basiswert aus einer Quelle), *Quelle+gesetzt* (Spanne oder Anker belegt, Basiswert gesetzt), *gesetzt* (eigene Festlegung mit Begründung, ohne Quelle) und *Rechnung* (abgeleiteter Wert). Eine gesetzte Eingabe hat die Klasse „Modellannahme“.

4.2 Der Annahmensatz

Der Annahmensatz enthält 105 Zeilen: 84 Eingaben und 21 Prüf- und Ankerzeilen (84 plus 21). Unter den 84 Eingaben sind drei reine Stressgrößen, die nur in den Stressrechnungen vorkommen; es bleiben 81 Modelleingaben (84 minus drei). Je Zeile stehen Wert, Bandbreite (niedrig, hoch), Klasse, Herkunft, Quelle mit Stellenangabe oder bei Setzung eine Begründung, und bei Quellenwerten der wörtliche Belegtext. Von den 81 Modelleingaben gilt:

Herkunft	Anzahl	Klasse
Basiswert aus Quelle	11	3 beobachtet (Fremdkapitalzins Deutschland, chinesischer Referenzzins, Strompreis Deutschland Band IC), 8 Modellannahme Dritter
Quelle und gesetzt gemischt	7	Modellannahme
gesetzt	63	Modellannahme

Nicht gesetzt sind damit 18 der 81 Eingaben (elf aus einer Quelle, sieben gemischt); nur drei sind Messwerte (beobachtet).

Die wichtigste Einschränkung steht hier: 63 von 81 Eingaben sind gesetzt. Gesetzt sind insbesondere Lohn (40 EUR je Stunde, gesetzt zwischen dem Planansatz 28,41 EUR aus Q56 und den Arbeitskosten von 49,5 EUR je Stunde im verarbeitenden Gewerbe 2025 laut Eurostat), gebundene Bedienerzeiten, Rüstzeiten, mannlose Stunden, Auslastung, Variantenzahl, Materialkosten, Maschinenpreis und Ausschuss. Die Aussagen der Studie sind so belastbar wie diese Setzungen und ihre Bandbreiten; der Tornado (Abschnitt 7) zeigt, wie stark die Ergebnisse an ihnen hängen.

Das Modell rechnet nicht, wenn eine Eingabe ohne Herkunft oder Begründung vorliegt oder wenn ein Belegtext nicht wörtlich in der abgelegten Quelle steht. Im Endstand wurden 42 Belegtexte geprüft und 42 gefunden. Nicht nachweisbar ist der Fremdkapitalzins der USA; als Ersatz gilt der deutsche Zins, gesetzt, und jedes US-Ergebnis trägt diese Einschränkung.

Basiswerte des Rechenpunkts (Deutschland; Nachfrageauslastung u = 0,5; 20 Varianten; Quelle: Annahmensatz):

Größe	Basis	Bandbreite	Klasse, Herkunft
Zykluszeit je Teil t_c	0,10 h	0,05 bis 0,25	Modellannahme, gesetzt
Referenz-Jahresstunden der Anlage H_ref	6.000 h	5.000 bis 6.220	Modellannahme, Quelle+gesetzt (Obergrenze Q56)
Variantenzahl je Jahr V	20	5 bis 100	Modellannahme, gesetzt
Lose je Variante und Jahr	4	2 bis 12	Modellannahme, gesetzt
Materialkosten je Bruttoteil	8 EUR	4 bis 20	Modellannahme, gesetzt (Platzhalter ohne Quelle)
Nachfrageauslastung u_ref	0,50	0,20 bis 0,80	Modellannahme, gesetzt
Lohnkosten Deutschland	40 EUR/h	28,41 bis 49,5	Modellannahme, gesetzt
Strompreis Deutschland Band IC	0,2058 EUR/kWh	0,1267 bis 0,2281 (Untergrenze: Verbrauchsband ab 150 GWh; Obergrenze: 2025-S1)	beobachtet, Quelle (Eurostat, Strompreise für Nichthaushaltskunden; 2026-S1 vorläufig)
Fremdkapitalzins Deutschland	3,99 %	3,55 bis 6,0	beobachtet, Quelle (Deutsche Bundesbank, Zinsstatistik; 09/2026 vorläufig; Obergrenze gesetzt)
Eigenkapitalanteil	0,333 und 10 %	0,20 bis 0,50; 8 bis 14 %	Modellannahme, gesetzt
Werkzeugmaschine, Anschaffung	250.000 EUR	150.000 bis 500.000	Modellannahme, gesetzt (kürzt sich aus allen Differenzen zwischen Alternativen)
Mittlere elektrische Last der Maschine	10 kW	5 bis 20	Modellannahme, gesetzt (keine Messung, kein Datenblattwert)

Daraus folgt ein Mischzins von 5,99 Prozent (Eigenkapitalanteil mal Eigenkapitalkostensatz plus Fremdkapitalanteil mal Fremdkapitalzins). Der Strompreis ist der Tarif eines Betriebs mit 500 bis 1.999 MWh Jahresverbrauch ohne Mehrwertsteuer und erstattungsfähige Abgaben und nicht der Tarif der Zelle. Die Quelle der Standortverhältnisse und ihre Grenzen stehen in Abschnitt 4.8.

4.3 Modellprozess

Das Modell beschreibt einen Prozess, keinen Betrieb: eine Werkzeugmaschine, die ein Referenzteil in Losen und Varianten fertigt. Die Nachfrage wird als Nachfrageauslastung u = Q_gut · t_c / H_ref ausgedrückt, das heißt als gute Menge in Referenzstunden bezogen auf die verfügbaren Anlagenstunden. In allen Alternativen wird dieselbe gute Menge erzeugt. Für jede Alternative und jeden Standort berechnet das Modell in dieser Reihenfolge: Bruttomenge aus Ausschuss, Produktionsstunden aus Zykluszeit und Verfügbarkeit, Rüststunden aus Variantenzahl, Losen je Variante und Rüstzeit je Los, die Summe der Maschinenstunden (übersteigt sie H_ref, ist die Alternative bei diesem u „nicht zulässig“), die Aufteilung in bemannte und mannlose Stunden, die Bedienerstunden mit Schichtzuschlägen, den Programmieraufwand je neuer Variante (indirekte Arbeit, mit einem Qualifikationsfaktor auf den Lohn), die Energie aus mittlerer Maschinenlast und Zellenzusatzlast, das Material aus der Bruttomenge und die Kapitalkosten.

Rüstzeiten sind im Modell vollständig bemannt; Zuschläge für zweite und dritte Schicht wirken nur auf bemannte Stunden außerhalb der ersten Schicht. Störungen gehen ausschließlich über die Verfügbarkeit (reduziertes Q_gut) und über Wartungskosten ein; ein entgangener Deckungsbeitrag steht nicht in K_gut. Der Anlaufaufwand ist als Anteil an Hardware und Integration in I_0 aktiviert, also eine Methode je Rechnung. Fremdleistung steht nur als fester Jahresbetrag für Software, Lizenz und IT-Sicherheit im Modell; mangels eines belegten Stundensatzes ist sie nicht in Stunden umrechenbar, und die Verlagerungsfrage G1 des Protokolls ist im Modell deshalb nicht prüfbar.

4.4 Die vier Alternativen

Alternative	Inhalt im Modell	Investition I_0 im Rechenpunkt
A0 Fortführung	keine Investition; Bediener überwiegend gebunden (0,8 Bedienerstunden je bemannter Maschinenstunde); nur bemannte Schichten	0 EUR
A1 organisatorisch oder konstruktiv	geringe Investition (Vorrichtungen, Rüstoptimierung); gebundene Bedienerzeit 0,6; Rüstzeit je Los 0,5 h statt 1,0 h	rund 20.500 EUR
A2 selektive Nachrüstung	Cobot-Zelle mit Zuführung; gebundene Bedienerzeit 0,1; bis zu 900 mannlose Stunden im Jahr; Rüstzeit je Los 1,2 h; Programmieraufwand 6 h je neue Variante	rund 70.100 EUR
A3 maschinenorientiertes Re-Design	hohe Investition einschließlich Palettenspeicher; gebundene Bedienerzeit 0,05; bis zu 2.700 mannlose Stunden im Jahr; Rüstzeit je Los 0,6 h; höhere Wartung	rund 365.400 EUR

Die Parameter der Alternativen sind überwiegend gesetzt. Quellenanker tragen die Hardware von A2 (Komponentensumme 48.242,25 EUR aus dem FlexARob-Schlussbericht und Planansatz der Bachelorarbeit [Q56]; Klasse Modellannahme Dritter), die Hardware von A3 (180.000 EUR einschließlich Inbetriebnahme, IPA-Leitfaden Q38, Szenario Montage, Investition 2028), die Integrationsanteile (A2: 0,2577 aus Q56, 8.392,56 EUR

Programmierung durch 32.570 EUR Hardware; A3: 0,6111 aus Q38, 110.000 EUR Engineering durch 180.000 EUR Hardware), Nutzungsdauer von A2 (fünf Jahre), die Wartung von A2 (3 Prozent der Anschaffung laut Q56) und die Verfügbarkeit von A2 (90 Prozent, Q56). Das Anlaufkonto beträgt 10 Prozent (A2) und 20 Prozent (A3) von Hardware plus Integration; beide Werte sind gesetzt, und A3 liegt höher, weil ein größerer Umbau unterstellt wird. Die Anker stammen aus Planungen und einer Simulation für humanoide Roboter; ein Anker ist keine Deckung durch einen Fall (Abschnitt 6).

4.5 Formeln

Die Formeln des eingefrorenen Protokolls werden unverändert verwendet.

- **Annuität:** `a · (I_0 − RW · (1 + r)^−n)` mit `a = r (1 + r)^n / ((1 + r)^n − 1)`; für `r = 0` gilt `a = 1/n`. Kapitalkosten gehen in K_gut ausschließlich als Annuität ein; die Annuität unterstellt die Auslastung des jeweiligen Szenariopunkts.
- **Vollkosten je gutem Teil:** K_gut = Summe der Jahreskosten / Q_gut, mit Q_gut = Q_brutto − Ausschuss − Nacharbeit.
- **Kippauslastung u_kipp:** kleinste Nachfrageauslastung, ab der K_gut der einen Alternative höchstens K_gut der anderen beträgt.
- **Break-even-Menge Q_BE:** kleinste gute Menge mit m · Q ≥ Jahreskosten, numerisch gelöst, weil Schichtzuschläge stufig wirken; die linearisierte Form `F/(m − v)` weicht bis zu 7 Prozent ab. Der Nettoerlös je Teil m ist gesetzt (12 Prozent über K_gut von A0 im Basispunkt; Bandbreite 5 bis 30 Prozent) und kein Marktpreis; Q_BE hängt deshalb unmittelbar an dieser Setzung.
- **Kapitalwert** je Alternative gegen A0 getrennt von K_gut und ohne Doppelzählung mit der Annuität: Rentenbarwertfaktor über die Nutzungsdauer der Alternative mal Differenz der Jahreskosten gegenüber A0, vorsteuerlich (bei Restwert null gleich dem Rentenbarwert der operativen Einsparung abzüglich I_0). Entgangene Deckungsbeiträge gehen nur hier ein, und im Modell sind keine angesetzt.
- **Konkurrenzfähigkeit am Standort:** `K_gut(Deutschland) ≤ (1 + δ) · K_gut(beste Alternative am Zielstandort)`. δ ist die als tolerierbar gesetzte Preislücke, die Nähe, Transport, Zoll, Qualität und Lieferzeit ausgleichen könnten. **δ ist nicht belegt.**

4.6 Äquivalenztest

Das Protokoll (Aussagegrenze 4) verlangt, dass Alternativen nur verglichen werden, wenn Funktion, Toleranzen und Abnahmekriterium vor und nach der Umstellung dokumentiert sind und der Äquivalenztest besteht. Im Modell ist die gleiche gute Menge gleicher Qualität in allen Alternativen eine **Annahme**; ein bestandener Äquivalenztest wird nicht behauptet. Qualitätsunterschiede gehen nur über den gesetzten Ausschussanteil je Alternative ein. Für Fälle gilt: Besteht ein Fall den Äquivalenztest nicht, wird er nur beschrieben und geht nicht in die Rechnung ein. Das trifft auf alle 16 geprüften Fälle und Kandidaten zu (Abschnitt 6).

4.7 Aufnahmekriterien für Fälle

Fälle werden nur dann als „gedeckt“ ausgewiesen, wenn sie alle sechs Kriterien (a) bis (f) erfüllen und den Äquivalenztest bestehen. Die Kriterien wurden vor der Auswahl festgelegt.

Kriterium	Inhalt
(a)	Primärbeleg im Quellenregister, im Volltext gelesen
(b)	Systemgrenze, Output und Abnahmekriterium dokumentiert
(c)	mindestens eine Alternative A0 bis A3 mit Ausschlussbegründung
(d)	jede Zahl mit Belegtyp und Quelle, wörtlich geprüft
(e)	mindestens ein Kontowert aus einer Quelle, die nicht allein die Mitteilung des Unternehmens über sich selbst ist, oder ausdrückliche Kennzeichnung als Angabe des Unternehmens über sich selbst
(f)	Auswahl nicht nach erwartetem oder bekanntem Ergebnis

Erfüllt kein Fall alle Kriterien, bleibt Pfad B eine reine Modellrechnung ohne Fallbezug, und kein Fall wird als „gedeckt“ ausgewiesen. Ein Mittelstandsfall wird angestrebt, ist in Pfad B aber keine Pflicht; fehlt er, gilt der Mittelstandssatz aus der Zusammenfassung.

4.8 Standortübersetzung

Deutschland ist der Bezug. China und die USA erhalten dieselbe Technik und dieselben Mengen je Teil; es ändern sich nur die Preise. Die Übersetzung folgt der Konvention eines früheren fluxlane-Beitrags zu Standortkosten:

Größe	China	USA	Herkunft
Lohn	Deutschland geteilt durch 4,0 (Spanne 3,0 bis 6,1)	Deutschland geteilt durch 1,15 (Spanne 1,0 bis 1,3)	berechnet aus Jahresbruttolöhnen (CN: 3,81 bis 6,10 aus Destatis [Q04], NBS und EZB-Jahresmittel 2025) beziehungsweise aus Eurostat und dem U.S. Bureau of Labor Statistics (US: 1,15); Basis gesetzt innerhalb der berechneten Spanne
Strom	Deutschland geteilt durch 1,5 (1,0 bis 2,0)	Deutschland geteilt durch 2,0 (1,0 bis 3,2)	IEA, Electricity 2026 [Q06], nur für Großverbraucher über 150 GWh, hier auf Band IC übertragen: gesetzt
Fremdkapitalzins	3,5 % (Referenzzins LPR)	nicht nachweisbar; Ersatz gleich Deutschland, gesetzt	PBoC; für die USA keine Quelle im Register
Eigenkapitalkosten	an allen Standorten 10 %, Eigenkapitalanteil 0,333		gesetzt
Anlagenpreis	gleich (Faktor 1,0; 0,8 bis 1,0)	gleich (Faktor 1,0; 0,9 bis 1,1)	nicht belegt, gesetzt
Material	gleich an allen Standorten		Weltmarktannahme, gesetzt

Der chinesische Lohn ist ein Jahresbruttolohn und kein Stundenkostenwert ohne Arbeitgeberbeiträge, der chinesische Lohn damit eher zu niedrig und der deutsche Abstand eher zu groß angesetzt; der amerikanische Wert ist eine Gesamtvergütung je Stunde. Nationale Mittelwerte repräsentieren kein Werk. Die IEA-Aussage (die EU liegt bei energieintensiven Großverbrauchern knapp bis über 50 Prozent über China und mehr als doppelt so hoch wie die USA, dort Texas) gilt unter ihren Bedingungen; die Übertragung auf Band IC ist eine Setzung. Der Faktor 2,0 für die USA folgt dieser Aussage; das aus Eurostat und der US-Statistik berechnete Verhältnis von Band IC zu Texas (3,23) liegt oberhalb und begrenzt die Spanne (bis 3,2). Zölle, Transport, Lieferzeit und Währungsrisiko sind nicht im Modell.

4.9 Methodenwechsel und Reihenfolge

Die Studie legt offen, was in welcher Reihenfolge entstand, weil Pfad B eine nachträgliche Methode ist.

1. Am 16.11.2026 wurde das Studienprotokoll mit den Hypothesen H1 bis H5 und dem Abbruchkriterium A1 festgelegt.
2. Am 17.11.2026 wurde A1 ausgelöst, weil kein Mittelstandsfall vorliegt; Pfad A ist seitdem nicht testbar. Erst danach wurde Pfad B vorgeschlagen und am 18.11.2026 als dokumentierte Ergänzung des Protokolls eingeführt. Pfad A und A1 blieben dabei wörtlich unverändert. Für Pfad B gilt eine Frist von sechs Wochen (18.11.2026 bis 30.12.2026); das entspricht dem im Protokoll für die zweite Studienphase vorgesehenen Zeitdeckel.
3. Der Annahmensatz wurde vor dem ersten Rechenlauf geschrieben. Der erste Lauf brach bei der Prüfung der Belegtexte ab, bevor eine Kostenzahl entstand, weil zwei Suchtexte falsch abgeschrieben waren; korrigiert wurde nur der Suchtext, kein Wert. Nach den ersten Ergebnissen wurde kein Wert im Annahmensatz geändert. Danach kamen Auswertungen hinzu (getrennte Eckfälle, Kippverfügbarkeit, Materialanteil, Zerlegung des Standortabstands, Kapital nominal gegen real, Vergleich mit einem früheren Beitrag, Quantile der relativen Kostendifferenz); sie sind im Ergebnisteil jeweils als nachträglich ergänzt gekennzeichnet.

Der Annahmensatz wurde nicht vorab mit einer Prüfsumme festgehalten. Das ist ein Planungsmangel gegenüber Pfad A: Dass er ohne Kenntnis der Ergebnisse entstand, ist eine Zusicherung der Redaktion und kein extern prüfbarer Nachweis. Pfad B darf deshalb nicht als bestätigender Test gelesen werden; er ist ein offengelegtes Rechenmodell.

4.10 Doppelte Rechnung und ihre Grenze

Zusätzlich zum Modell rechnet ein zweites Programm die Kapitalkosten als Jahresäquivalent aus abgezinstem Restwert durch Rentenbarwertsumme einer expliziten Jahresschleife und zählt Stunden in Ein-Stunden-Blöcken. Ergebnisse: 180 Punkte (vier Alternativen mal drei Standorte mal fünf Auslastungen mal drei Variantenzahlen) mit größter relativer Abweichung von `4.822e-08`; Kippauslastung im linearen Sonderfall in geschlossener Form identisch mit dem Scan (0,121854 für A2 gegen A0); Handrechnung mit ausgeschriebenen Zwischenwerten für A0 und A2; alle 30 Ergebnistabellen in zwei Läufen identisch; Negativtests der Eingabeprüfung (fehlende Begründung, falscher Belegtext) schlugen wie vorgesehen an. Dazu wurden 42 Belegtexte wörtlich in den Quellendateien gefunden und abgeleitete Eingaben nachgerechnet (zum Beispiel Lohnverhältnis Deutschland zu China 3,81 und 6,10, Deutschland zu USA 1,15, Strompreisverhältnis Band IC zu Texas 3,23).

Der Modelllauf wurde in einer getrennten Kopie wiederholt: alle 30 Ergebnistabellen sind byte-gleich mit den abgelegten.

Grenze der Aussage. Beide Implementierungen stammen vom selben Verfasser aus derselben Spezifikation. Die Prüfung fängt Implementierungs- und Rechenfehler, **keine Fehler in den Annahmen und keine Fehler in der Modellstruktur.** Die Modellstruktur wurde nicht von einer unabhängigen Person gelesen, und die gesetzten Eingaben (63 von 81) wurden nicht von der Fertigungsplanung eines Betriebs geprüft. Nur mit der ersten Methode gerechnet sind: die Quantile des Faktorgitters (durch 41 Stichproben, jede 164. der 6.561 Kombinationen, und vier Ecken gedeckt, nicht durch eine vollständige zweite Rechnung), das Tornado (nur zwölf Werte doppelt gerechnet), die Stromlohn-Umschlagpunkte, die Karte Lohn mal Anlagenpreis, die Karte Lohn mal Strompreis, die Kippverfügbarkeit, der Vergleich mit dem früheren Beitrag und die Automobil-Illustration.

5 Ergebnisse

Alle Ergebnisse dieses Abschnitts gehören der Klasse „berechnet (Modellergebnis)“ an; die Nachweise zu den Tabellen stehen in der Begleitdatei. Rechenpunkte (Deutschland, u = 0,5, 20 Varianten) sind Punkte des Annahmensatzes und keine Prognosen; Aussagen stützen sich auf die Spannen darunter. Abschnitte, deren Auswertung erst nach dem ersten Lauf ergänzt wurde, sind gekennzeichnet.

5.1 Kosten je gutem Teil

Nachweis [N-5-1]. Klasse: Modellergebnis.

Alternative	K_gut (EUR je Teil, gerundet)	gegen A0	I_0 (EUR, gerundet)	Arbeitsstunden direkt plus indirekt je 1.000 Teile
A0	13,7		0	91
A1	12,8	rund –7 %	20.500	67
A2	11,0	rund –19 %	70.100	13
A3	12,9	rund –6 %	365.400	5

Im Rechenpunkt ist A2 die günstigste Alternative. Die Gitter-Eingaben sind:

Eingabe	niedrig	Basis	hoch
Lohn Deutschland (EUR/h)	28,41	40	49,5
Hardware A2 (EUR)	32.570	48.242,25	100.000
Integrationsanteil A2	0,15	0,2577	0,76
gebundene Bedienerzeit A0	0,5	0,8	1,0
gebundene Bedienerzeit A2	0,05	0,1	0,25
Fremdkapitalzins Deutschland (%)	3,55	3,99	6,0

Eingabe	niedrig	Basis	hoch
mannlose Stunden A2 (Anteil)	0,0	0,15	0,30
Nutzungsdauer A2 (Jahre)	5	5	8

Das Ergebnis hängt an gesetzten Größen; die Spanne darunter ist deshalb aussagekräftiger als der Punkt. Das Gitter variiert die acht Eingaben der folgenden Tabelle auf je drei Stufen (niedrig, Basis, hoch); das ergibt drei hoch acht, also 6.561 Kombinationen. Die Auslastung steht dabei auf dem Rechenpunkt u = 0,5, und alle Anteile dieses Absatzes beziehen sich auf K_gut bei dieser Auslastung. Über alle Gitterpunkte liegt die relative Differenz K_gut(A2) gegenüber K_gut(A0) im Minimum bei −33 Prozent, im 10-Prozent-Quantil bei −26 Prozent, im Median bei −15 Prozent, im 90-Prozent-Quantil bei −4 Prozent und im Maximum bei +10 Prozent. In 97 Prozent der Gitterpunkte liegt K_gut(A2) unter K_gut(A0), in 72 Prozent um mehr als 10 Prozent darunter. Die Gitterpunkte sind gleich gewichtet, die Anteile also Zählungen im Gitter und keine Häufigkeiten in der Wirklichkeit. Das ist eine Eigenschaft des Modells; es ist **kein Test der Hypothese H1**, denn H1 verlangt Fallwerte mit eingefrorenen Medianen, die nicht vorliegen.

Die statische Amortisation gegenüber A0 beträgt im Rechenpunkt für A1 rund 0,6 Jahre, für A2 rund 0,7 Jahre (bei der gesetzten gebundenen Bedienerzeit von 0,8 in der Fortführung gegen 0,1 in der Nachrüstung) und für A3 rund 4,1 Jahre; der Kapitalwert gegenüber A0 (Rentenbarwertfaktor mal Differenz der Jahreskosten, über die Nutzungsdauer der jeweiligen Alternative) liegt bei rund 113.600 EUR (A1), 333.500 EUR (A2) und 132.800 EUR (A3). Zur Plausibilität, ausdrücklich keine Validierung: Der Hessen-Leitfaden nennt für einfache Maschinenbestückung sechs bis zwölf Monate und für komplexere Lösungen zwei bis vier Jahre [Q60; referiert, gestützt auf ein nicht öffentliches Experteninterview]. Die A2-Amortisation des Modells liegt innerhalb der ersten, die A3-Amortisation knapp oberhalb der zweiten Spanne. Der Annahmensatz wurde vor dieser Gegenüberstellung festgelegt und danach nicht verändert; eine Übereinstimmung mit einer Quellenspanne bestätigt die Setzungen nicht, weil die Quelle ihre Spanne nicht belegt.

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

5.2 Arbeitsstunden, direkt und indirekt

Nachweis [N-5-1]. Klasse: Modellergebnis.

Die direkten Arbeitsstunden je 1.000 Teile sinken im Rechenpunkt von rund 91 (A0) über rund 67 (A1) auf rund 11,5 (A2) und rund 4,5 (A3). Die indirekten Stunden, also Programmieren und Teachen je neuer Variante, steigen gegenläufig von 0,4 (A0 und A1) auf 1,2 (A2) und 0,8 (A3). Die Gesamtbilanz sinkt damit von 91 auf 13 (A2) und auf 5 (A3) Stunden je 1.000 Teile. Rüststunden der Maschine betragen bei 20 Varianten und vier Losen je Variante 80 (A0), 40 (A1), 96 (A2) und 48 Stunden (A3) im Jahr; mannlos laufen im Rechenpunkt 900 Stunden (A2) und 1.615 Stunden (A3), weil die Obergrenze von A3 (2.700 Stunden) bei u = 0,5 nicht erreicht wird.

Diese Bilanz ist **unvollständig im Sinne von G1**: Fremdleistung steht nur als Festbetrag (A2 1.500 EUR, A3 6.000 EUR im Jahr) im Modell und lässt sich ohne belegten Dienstleister-Stundensatz nicht in Stunden umrechnen. Ob die eingesparten Stunden verlagert werden, ist im Modell nicht prüfbar; die Stundenbilanz zeigt die Mechanik der gesetzten Parameter, nicht eine beobachtete Verlagerung oder ihr Ausbleiben.

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

5.3 Kapital, Energie, Wartung, Integration

Nachweis [N-5-3]. Klasse: Modellergebnis.

Konto (EUR je Teil, Deutschland, u = 0,5)	A0	A1	A2	A3
Maschine (Annuität und Wartung, in allen Alternativen gleich)	1,40	1,40	1,40	1,40
Kapital der Automation (Annuität auf I_0)	0	0,16	0,55	2,18
Wartung der Automation	0	0,01	0,07	0,49
Software, Lizenz, IT-Sicherheit (Fremdleistung)	0	0	0,05	0,20

Konto (EUR je Teil, Deutschland, u = 0,5)	A0	A1	A2	A3
direkte Arbeit	3,89	2,85	0,48	0,18
indirekte Arbeit	0,02	0,02	0,06	0,04
Energie	0,23	0,22	0,24	0,30
Material	8,12	8,10	8,16	8,08
K_gut	**13,66**	**12,77**	**11,03**	**12,87**

Die Investition I_0 setzt sich bei A2 aus Hardware (48.242,25 EUR), Integration (rund 12.400 EUR), Anlaufkonto (rund 6.100 EUR) und Konformitätsaufschlag (rund 3.300 EUR) zusammen; bei A3 aus Hardware (180.000 EUR), Integration (rund 110.000 EUR), Anlaufkonto (rund 58.000 EUR) und Konformitätsaufschlag (rund 17.400 EUR). Der Konformitätsaufschlag bildet pauschal Sicherheit und Cybersicherheit ab, weil die Maschinenverordnung (EU) 2023/1230 ab 20. Januar 2027 gilt [Q27]; er ist gesetzt (5 Prozent, Bandbreite 0 bis 15 Prozent) und keine Bewertung der Konformität einer Anlage. Bei A3 ist Integration und Anlauf mit zusammen rund 168.000 EUR nahezu so groß wie die Hardware; das ist eine Folge der gesetzten Anteile (Anker: IPA-Leitfaden, Szenario Montage).

Die Automationskosten (Kapital, Wartung, Software) von A2 betragen rund 0,67 EUR je Teil und sind damit kleiner als die eingesparten direkten Arbeitskosten von rund 3,41 EUR je Teil. Bei A3 betragen sie rund 2,87 EUR je Teil gegenüber eingesparten direkten Arbeitskosten von rund 3,71 EUR je Teil. Der Energiebeitrag steigt mit der Automatisierung leicht (A2 plus 0,02, A3 plus 0,07 EUR je Teil gegenüber A0), weil die Zellen Zusatzlast haben; im Rechenpunkt macht Energie bei A2 rund 2,2 Prozent von K_gut aus. Nach Anteilen an K_gut (Deutschland, u = 0,5) fällt der Lohnanteil von 28,6 Prozent (A0) auf 4,9 Prozent (A2) und 1,7 Prozent (A3), während der Kapitalanteil (Maschine und Automation) von 10,3 Prozent (A0) auf 17,7 Prozent (A2) und 27,8 Prozent (A3) steigt und der Materialanteil bei A2 74,0 Prozent beträgt.

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

5.4 Break-even und Kippauslastung

Nachweis [N-5-4]. Klasse: Modellergebnis.

Die Kippauslastung u_kipp ist die Nachfrageauslastung, ab der die erste Alternative günstiger ist als die zweite.

Vergleich	Basis	10- bis 90-Prozent-Quantil (Median) der Gitterpunkte mit Kipp	Eckfall: nur wirtschaftliche Eingaben günstig / ungünstig
A2 gegen A0	0,12	0,07 bis 0,36 (0,16)	0,04 / 0,40
A1 gegen A0	0,06	nicht im Gitter	0,06 / 0,06
A3 gegen A0	0,40	nicht im Gitter	0,39 / 0,43
A2 gegen A1	0,15	nicht im Gitter	0,03 / 0,54
A3 gegen A1	0,52	nicht im Gitter	0,50 / 0,56
A3 gegen A2	nie günstiger	nicht im Gitter	nie günstiger / 0,66

Der Basiswert für A2 gegen A0 entspricht rund 7.300 guten Teilen im Jahr (u_kipp mal H_ref geteilt durch t_c). Die „Eckfälle“ setzen Lohn, Strom, Zins, Eigenkapitalanteil, Maschinenpreis und alle Anlagen- und Wartungsgrößen gleichzeitig auf die jeweils günstige oder ungünstige Seite für die Automation; sie sind nach dem Erstlauf ergänzt (Trennung in „wirtschaftliche Eingaben“ und „alle Eingaben“). Setzt man alle 78 Eingaben mit Spanne gleichzeitig günstig, sinkt u_kipp (A2 gegen A0) auf 0,02; setzt man alle gleichzeitig ungünstig, wird A2 gegenüber A0 nie günstiger. Diese beiden Extremfälle sind nicht plausibel gleichzeitig und stehen nur als äußere Hülle. Im Gitter liegen das Minimum bei 0,04, das 25- und das 75-Prozent-Quantil bei 0,10 und 0,26 und das Maximum bei 0,86; 15 der 6.561 Gitterpunkte haben keinen Kipp. In diesen 15 Kombinationen ist ausnahmslos zugleich der Lohn niedrig (28,41 EUR je Stunde), die gebundene Bedienerzeit in A0 niedrig (0,5), die Hardware von A2 hoch (100.000 EUR) und die gebundene Bedienerzeit in A2 hoch (0,25; eigene Auswertung des Gitters).

Break-even-Menge. Bei einem Nettoerlös, der 12 Prozent über K_gut(A0) im Basispunkt liegt (gesetzt, Bandbreite 5 bis 30 Prozent; kein Marktpreis), betragen die Break-even-Mengen rund 13.400 (A0), 11.300 (A1), 10.500 (A2) und

19.500 (A3) gute Teile im Jahr, entsprechend Auslastungen von 0,22 (A0), 0,19 (A1), 0,18 (A2) und 0,32 (A3). Q_BE hängt unmittelbar am gesetzten Erlös und ist deshalb schwächer belegt als u_kipp.

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

5.5 Auslastung und Produktmix

Nachweis [N-5-5]. Klasse: Modellergebnis.

Der Produktmix geht über die Variantenzahl V (bei vier Losen je Variante und Jahr), die Rüstzeiten und den Programmieraufwand je neuer Variante ein. Grenzen der Nachfrageauslastung u, ab denen die genannte Alternative die günstigste wird (Gitter ab u = 0,05):

Variantenzahl V	A0 → A1	A1 → A2	A2 → A3 (Kapazitätsgrenze von A2)
5	0,09	0,13	nein
10	0,08	0,13	nein
20	0,06	0,15	nein
50	schon bei u = 0,05 A1	0,19	0,85
100	schon bei u = 0,05 A1	0,25	0,81
200	schon bei u = 0,05 A1	0,35	0,74

Im Modell verschieben mehr Varianten die Schwelle für A2 nach oben, von 0,13 bei fünf auf 0,35 bei 200 Varianten, weil Rüsten und Programmieren in A2 mehr Zeit kosten. **Der Wechsel zu A3 ist ein Kapazitätseffekt, kein Kostenvorteil:** Bei 50, 100 und 200 Varianten stößt A2 bei u = 0,85, 0,81 und 0,74 an die Grenze von 6.000 Anlagenstunden, und A3 (kürzere Rüstzeit, mehr mannlose Stunden) schafft die Menge noch. Im Bereich, in dem beide die Menge schaffen, ist A2 günstiger; bei 50 Varianten und u = 0,8 kostet ein Teil in A2 10,5 EUR und in A3 11,3 EUR. Bei 200 Varianten ist im Gitter A2 bei u = 0,75, A0 bei u = 0,80 und A3 bei u = 0,85 nicht mehr zulässig; bei u = 0,85 bleibt allein A1 mit 12,8 EUR je Teil, und A3 wird ab u = 0,82 von A1 abgelöst, weil auch A3 die Menge nicht mehr schafft.

Das Ergebnis ist eine Rangfolge **im Modell**. Es zeigt, dass die Rangfolge mit Auslastung und Variantenzahl wechselt, aber nicht, bei welchen Werten reale Betriebe liegen; die Nachfrage ist nicht aus Daten gesetzt. Es ist kein Test von H2, weil H2 eingefrorene Fallbandbreiten verlangt.

Rüstzeiten. Die Rüstzeit je Los ist gesetzt (A0 1,0 h, A1 0,5 h, A2 1,2 h, A3 0,6 h) und wirkt über die Maschinenstunden und, weil das Rüsten im Modell vollständig bemannt ist, über die Personalkosten. Variiert man nur die Rüstzeit je Los von A2 zwischen 0,5 h und 2,5 h, verschiebt sich die Kippauslastung von A2 gegen A0 von 0,11 auf 0,14 und der Abstand zu China (A2, u = 0,5) von 4,3 auf 6,2 Prozent. Die Rüstzeit ist damit kein dominanter Treiber; sie wirkt vor allem über die Variantenzahl, denn je mehr Rüstvorgänge auf eine Zelle fallen, die ihre Rüstzeit nicht senkt, desto später wird A2 im Modell günstiger als A0. Die Rüstzeiten sind nicht belegt; ihre Größenordnung ist eine Prüfaufgabe für die Fertigungsplanung.

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

5.6 Schwellen für Arbeits-, Kapital- und Energiekosten im Inland

Nachweis [N-5-6]. Klasse: Modellergebnis.

Je Größe wird nur sie variiert; alle anderen Eingaben bleiben im Basisfall. Gefragt ist: Bis oder ab welchem Wert ist die Alternative im Inland günstiger als A0? („Anlagenpreis“ ist die Hardware der Alternative als Vielfaches des Basiswerts; „Zins“ der Mischzins, Basis 5,99 Prozent.)

Größe (Basiswert)	A2 gegen A0 bei u = 0,3 / 0,5 / 0,7	A3 gegen A0 bei u = 0,3 / 0,5 / 0,7
Lohn, A günstiger ab (40 EUR/h)	15 / 8,7 / 6,1 EUR/h	56 / 31 / 21 EUR/h

Größe (Basiswert)	A2 gegen A0 bei u = 0,3 / 0,5 / 0,7	A3 gegen A0 bei u = 0,3 / 0,5 / 0,7
Anlagenpreis, A günstiger bis zum Vielfachen von (1,0)	2,9 / 5,2 / 7,7	0,7 / 1,3 / 2,0
Zins (Mischzins), A günstiger bis (5,99 %)	68 % / im ganzen Bereich / im ganzen Bereich	nie günstiger / 15,5 % / 34 %
Strompreis, A günstiger bis (0,206 EUR/kWh)	im ganzen Bereich (kein Umschlag)	nie günstiger / 2,4 EUR/kWh / im ganzen Bereich

Für A1 gegen A0 gilt: Lohn ab 10 / 5,7 / 3,6 EUR je Stunde, Anlagenpreis bis zum 3,6- / 6,1- / 8,9-Fachen. Lesart: Im deutschen Lohnbereich des Annahmensatzes (28 bis 50 EUR je Stunde) schlägt A2 die Fortführung bei allen drei Auslastungen. A3 tut es erst ab etwa u = 0,5 und nur, wenn der Lohn mindestens rund 31 EUR je Stunde beträgt; bei u = 0,3 liegt die Lohnschwelle von A3 (56 EUR je Stunde) über dem ganzen betrachteten deutschen Bereich. **Antwort auf die Leitfrage für den Inlandsvergleich:** Die selektive Nachrüstung wird bei den Auslastungen 0,3, 0,5 und 0,7 schon ab Lohnkosten von 15, 8,7 und 6,1 EUR je Stunde günstiger als die Fortführung, solange der Anlagenpreis nicht das 2,9-, 5,2- beziehungsweise 7,7-Fache des Annahmensatzes übersteigt; das maschinenorientierte Re-Design braucht dagegen hohe Auslastung (ab etwa u = 0,5) oder hohe Lohnkosten und verträgt kaum höhere Anlagenpreise (bei u = 0,5 bis zum 1,3-Fachen). Der Strompreis begrenzt A2 in keinem betrachteten Fall; Zins und Strompreis werden im betrachteten Bereich erst bei A3 zur Grenze.

Die Karte Lohn mal Anlagenpreis (Hardware von A2) zeigt die Kippauslastung u_kipp von A2 gegen A0 (x):

Lohn EUR/h \ Anlagenpreis	0,5-fach	1-fach	2-fach	3-fach
30	0,09	0,16	0,29	0,39
40	0,07	0,12	0,23	0,31
50	0,06	0,10	0,18	0,26
60	0,05	0,08	0,15	0,22

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

5.7 Standortvergleich Deutschland, China, USA

Nachweis [N-5-7]. Klasse: Modellergebnis.

5.7.1 Abstand der Stückkosten

Der Abstand ist der Aufschlag von K_gut der deutschen Anlage gegenüber dem Zielstandort in Prozent. Je Standort wird die günstigste Alternative gewählt („beste Alternative“); die Spalten „gleiche Technik“ vergleichen dieselbe Alternative an beiden Standorten.

u	gegen China, beste Alternative	gegen USA, beste Alternative	gleiche Technik A2 gegen China	gleiche Technik A3 gegen China
0,20	14,4	1,7	6,1	3,0
0,35	7,1	1,7	4,9	2,8
0,50	4,9	1,8	4,9	2,5
0,65	5,0	1,9	5,0	2,3
0,80	5,2	1,9	5,2	2,4

Bei niedriger Auslastung ist der Abstand zu China größer, weil China dort bei A0 bleiben kann (billige Arbeit, keine Investition), während Deutschland für niedrige Stückkosten A2 braucht. Über die Einzelvariationen des Tornados liegt der Abstand zu China (A2, u = 0,5) zwischen 2,3 Prozent (halbe Fertigungstiefe) und 14,4 Prozent (u = 0,2), der Abstand zu den USA zwischen 0,6 und 3,2 Prozent. In der Karte Lohn mal Strompreis (Lohn 10 bis 60 EUR je Stunde, Strom 5 bis 30 ct/kWh, beste deutsche gegen beste chinesische Alternative) reicht der Abstand zu China von −0,8 bis +8,5 Prozent, zu den USA von −3,7 bis +5,3 Prozent. Dass bei sehr niedrigen deutschen Lohn- und Strompreisen der Abstand negativ wird, ist eine Rechenfolge der Karte und kein Befund über reale Standorte.

Der Wert von 14,4 Prozent bei u = 0,2 vergleicht die jeweils beste Alternative (China bleibt bei A0); der Wert von 6,1 Prozent bei gleicher Technik A2. Beide stehen nebeneinander, weil sie verschiedene Fragen beantworten.

5.7.2 Wer den Abstand trägt (nachträglich ergänzt)

Zerlegung bei gleicher Technik und u = 0,5 (Summe der Blöcke gleich K_gut-Differenz, geprüft):

Ziel, Alternative	Abstand (EUR je Teil)	Lohn	Strom	Kapital
China, A0	3,03	97 %	2,5 %	0,6 %
China, A2	0,51	80 %	16 %	4,6 %
China, A3	0,31	54 %	32 %	14 %
USA, A0	0,62	82 %	18 %	0
USA, A2	0,19	37 %	63 %	0
USA, A3	0,18	16 %	84 %	0

Gegenüber China bleibt der Lohn auch bei A3 der größte Block. Mit zunehmender Automatisierung wandern im Modell Anteile vom Lohn zum Strom und zum Kapital; der Abstand selbst schrumpft von 3,0 auf 0,3 EUR je Teil. Gegenüber den USA trägt bei A2 und A3 der Strom den größeren Teil. Die mittlere Last der Werkzeugmaschine, bei der der Strombeitrag zum Abstand gegenüber China den Lohnbeitrag erreicht, liegt bei A2 bei rund 52 kW (dem 5,2-Fachen der angenommenen 10 kW) und bei A3 bei rund 19 kW (dem 1,9-Fachen). Gegenüber den USA ist der Strombeitrag bei A2 und A3 schon im Basisfall größer als der Lohnbeitrag; bei A2 liegt die Gleichstandslast bei rund 5,6 kW. Die Gegenposition „der Nachteil wandert zur Energie“ (kein Test der Hypothese H4) trifft im Modell damit gegenüber China **erst bei energieintensiveren Prozessen** zu (Lasten über rund 50 kW bei A2) und nicht beim hier modellierten Prozess mit 10 kW; gegenüber den USA trifft sie schon beim Basisprozess zu. Eine Aussage über ein Werk ist das nicht.

5.7.3 Ab welchen Kosten ist die deutsche automatisierte Anlage konkurrenzfähig?

Konkurrenzfähig heißt hier `K_gut(Deutschland) ≤ (1 + δ) · K_gut(beste Alternative am Zielstandort)`. **δ ist ein offengelegter, nicht belegter Parameter**: die als tolerierbar gesetzte Preislücke, die Nähe, Transport, Zoll, Qualität und Lieferzeit ausgleichen könnten. Im abgelegten Bestand gibt es keinen Wert für δ; die Tabelle zeigt die Schwellen für vier gesetzte Werte, damit jede Leserin ihr eigenes δ ablesen kann. Der Zielstandort bleibt bei seinen Basiswerten; nur die deutsche Größe wird verändert. Dargestellt ist die höchste deutsche Größe, bei der die Bedingung noch erfüllt ist (A2, u = 0,5; mit „beste Alternative“ ergeben sich bei δ ≥ 5 Prozent dieselben Werte).

Größe (deutscher Basiswert)	China δ = 0	δ = 5 %	δ = 10 %	δ = 20 %	USA δ = 0	δ = 5 %	δ = 10 %
Lohn EUR/h (40)	2,3	41	80	157	26	66	106
Strom EUR/kWh (0,206)	nie erreichbar	0,22	0,66	1,55	0,043	0,50	0,96
Zins, Mischzins (6,0 %)	nie erreichbar	6,2 %	13,1 %	25,4 %	3,2 %	10,7 %	17,4 %
Anlagenpreis als Vielfaches (1,0)	0,18	1,02	1,86	3,55	0,69	1,56	2,43

Lesart: Am Basispunkt liegt Deutschland 4,9 Prozent über China und 1,8 Prozent über den USA. Gegenüber China mit δ = 0 ist Gleichstand allein über Energie oder Zins nie erreichbar; über den Lohn nur bei rund 2,3 EUR je Stunde (bei freier Wahl der deutschen Alternative bei rund 8,6 EUR je Stunde). Eine tolerierte Lücke von 5 Prozent genügt dem Basispunkt knapp (Lohn bis 41 statt 40 EUR je Stunde, Anlagenpreis bis zum 1,02-Fachen, Zins bis 6,2 Prozent). Bei u = 0,7 wird die Schwelle bei δ = 5 Prozent mit 39,2 EUR je Stunde vom Basislohn 40 EUR knapp verfehlt; „genügt knapp“ gilt nur bei u = 0,5. Bei 10 Prozent liegen die Schwellen weit außerhalb der deutschen Spannen. **Die Aussage „die automatisierte deutsche Anlage ist konkurrenzfähig“ hängt damit fast ganz an δ und am Materialanteil (Abschnitt 5.8) und ist keine Aussage über ein Werk.**

Die Schwellen hängen außerdem an der Auslastung. Bei δ = 5 Prozent und beste deutsche Alternative liegt die Lohnschwelle gegenüber China bei u = 0,3 bei 16,7 EUR je Stunde, bei u = 0,5 bei 41 EUR und bei u = 0,7 bei 39,2

EUR; bei δ = 10 Prozent bei 47,3, 79,8 und 75,6 EUR je Stunde. Bei niedriger Auslastung (u = 0,3) ist die deutsche Anlage gegenüber China unter δ = 5 Prozent bei Basislohn nicht konkurrenzfähig; gegenüber den USA liegen die Lohnschwellen bei δ = 5 Prozent für u = 0,3, 0,5 und 0,7 bei 63,4, 65,7 und 63,4 EUR je Stunde.

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

5.8 Materialanteil, Fertigungstiefe und Kapital (nachträglich ergänzt)

Nachweis [N-5-8]. Klasse: Modellergebnis.

Der Materialanteil ist im Basisfall **gesetzt** (8 EUR je Teil, Bandbreite 4 bis 20 EUR; 74 Prozent der Kosten von A2 in Deutschland bei u = 0,5) und nicht belegt. Er bestimmt, wie viel vom Kostenabstand überhaupt sichtbar wird, weil Material an allen Standorten gleich kostet. Abstand Deutschland zu China bei u = 0,5 (beste Alternative gegen beste Alternative):

Material EUR je Teil	0	1	2	4	8 (Basis)	12	20	40
Materialanteil, A2 Deutschland	0 %	26 %	42 %	59 %	74 %	81 %	88 %	93 %
Abstand Deutschland zu China	21,8 %	15,2 %	11,7 %	8,0 %	4,9 %	3,7 %	2,7 %	1,8 %

Innerhalb der Bandbreite von 4 bis 20 EUR je Teil liegt der Materialanteil also zwischen 59 und 88 Prozent und der Abstand zu China zwischen 8,0 und 2,7 Prozent (u = 0,5). Setzt man zusätzlich die Fertigungstiefe, also den Anteil der Bearbeitung im eigenen Werk (der Rest wird zu einem standortunabhängigen Zulieferpreis bezogen, gesetzt), sinkt der Abstand von 4,9 Prozent (alles im Werk) auf 3,4, 2,3 und 1,3 Prozent bei 75, 50 und 25 Prozent Eigenfertigung. Das folgt aus der Annahme, dass zugekaufte Stufen an beiden Standorten gleich kosten; die Zahlen quantifizieren die Fertigungstiefe nicht.

Das Kapital trägt im Modell nur wenig zum Abstand bei, und sein Vorzeichen hängt an der Zeitbasis: Für A2 bei u = 0,5 beträgt der Kapitalbeitrag zum Abstand Deutschland gegen China nominal rund +0,02 EUR je Teil (4,6 Prozent des Abstands) und real (deutscher Fremdkapitalzins minus 2,2 Prozent Preissteigerung) rund −0,08 EUR je Teil (−20 Prozent des realen Gesamtabstands von 0,41 EUR; bezogen auf den nominalen Abstand von 0,51 EUR rund −16 Prozent). Beide Beträge sind klein gegenüber dem Lohnbeitrag.

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

5.9 Risiken: Kippauslastung und Stillstand

Nachweis [N-5-9]. Klasse: Modellergebnis.

Stressgrößen sind gesetzt, mit Ausnahme des Planverfehlungsfaktors 1,5, der das Verhältnis neun zu sechs Jahre Amortisation aus der Landesbroschüre im Hessen-Leitfaden übernimmt [Q60]; I_0 ist dort nicht genannt, der Faktor ist ein Stresswert und kein Messwert. Deutschland, u = 0,5:

Szenario	A2 gegen Basis	A3 gegen Basis	A2 gegen A0 im Szenario	A3 gegen A0 im Szenario
Nachfrage −30 %	+8,5 %	+15 %	−16 %	+4,2 %
Stillstand 5 % der Jahresstunden (A2, A3)	+0,4 %	+0,1 %	−19 %	−5,7 %
I_0 mal 1,5	+2,8 %	+10 %	−17 %	+4,0 %
alle drei zusammen	+13 %	+30 %	−12,5 %	+18 %

Die Kippauslastung von A2 gegen A0 steigt von 0,12 auf 0,17 (Nachfrage −30 %), bleibt bei 0,12 (Stillstand) und steigt auf 0,17 (I_0 mal 1,5) und auf 0,25 (alle drei); bei A3 gegen A0 von 0,40 auf 0,57, 0,40, 0,56 und 0,81. Die Auslastung u ist die nominale Auslastung vor dem Einbruch. Die Kippverfügbarkeit (nachträglich ergänzt): A2 bleibt bei u = 0,5 gegenüber A0 günstiger, solange die Anlage die Menge überhaupt schafft (Zulässigkeitsgrenze der Verfügbarkeit 0,519, für A3 0,509); ein Verfügbarkeitsverlust allein kehrt im Modell die Rangfolge nicht um, er macht die Menge unerreichbar. Der Risikotreiber ist damit im Modell die **Auslastung zusammen mit dem Kapitaleinsatz** und nicht der Ausfall. Ein Nachfrageeinbruch um 30 Prozent und eine Investitionsüberschreitung um 50 Prozent machen A3 teurer als A0; A2 bleibt in allen drei Stressfällen und in ihrer Kombination günstiger; das gilt unter der

gesetzten gebundenen Bedienerzeit, die der entscheidende Auslöser des Vorteils ist (Abschnitt 7).

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

6 Fälle

Nachweis [N-6]. Klasse der Fallzahlen wie je Zeile angegeben; Modellwerte stehen in diesem Abschnitt nicht neben Unternehmensnamen.

6.1 Ergebnis der Kriterienprüfung

Geprüft wurden 16 Fälle und Kandidaten: die acht im Protokoll vorgesehenen Fälle FL-F01 bis FL-F08, sieben Kandidaten für den Mittelstandsfall oder Kontrastfälle (K5 bis K10 und ein Lohnfertiger) und der Ergänzungsfall FL-E01 (acht plus sieben plus eins). Die Kriterien (a) bis (f) und der Äquivalenztest wurden je Fall festgehalten. **Kein Fall erfüllt (a) bis (f), und kein Fall besteht den Äquivalenztest.** Es gibt deshalb in Pfad B **keinen als „gedeckt“ ausgewiesenen Fall**. Fälle, die den Äquivalenztest nicht bestehen, gehen nicht in die Rechnung ein. Für den Mittelstand gilt der Pflichtsatz: **„Für den Mittelstand liegt in diesem Pfad kein Fall vor; Aussagen zum Mittelstand sind nicht möglich.“**

Fall	stärkste Zahlenklasse	nicht erfüllt	gedeckt
FL-F01 Elektronikwerk, KI-gestützte Fertigung	Unternehmensangabe (Q41)	(b); Äquivalenztest nicht bestanden	nein
FL-F02 Montage humanoider Roboter, Neubau	Unternehmensangabe (Q46, über Agentur)	(a), (b), (c), (e)	nein
FL-F03 Aktuatorenfertigung China	Unternehmensangabe (nur Bestandsbeitrag)	(a), (b), (e)	nein
FL-F04 Batteriedemontage Zellebene	Modellannahme (Q48)	(b); Äquivalenztest nicht bestanden	nein, nur beschrieben
FL-F05 Bohrroboter Baustelle (USA)	Modellannahme (Q49)	(b) teilweise; Äquivalenztest nicht bestanden	nein, nur beschrieben
FL-F06 Schuhfertigung Ansbach (Fall mit Produktionseinstellung)	Unternehmensangabe (Q36, Q51, Q53)	(b); keine Kostengröße, kein Fremdbeleg für Gründe	nein
FL-F07 Fahrzeugmontage USA (Kontrastfall)	Unternehmensangabe (Q37)	(b), (c)	nein
FL-F08 CNC-Beschickung Mittelstand	nicht nachweisbar	(a) bis (e)	nein, kein Fall identifiziert
K9 Cobot-Endmontage (Planungsarbeit 2019)	Modellannahme und berechnet (Q56)	(b), (c) teilweise, (d), (f) teilweise	nein
K10 CNC-Beladung (Abschlussarbeit 2022)	Unternehmensangabe und Modellannahme (Q59)	(b), (c), (d), (f) teilweise	nein
K5, K6, K7 (Beispiele des Hessen-Leitfadens)	Unternehmensangabe	(a) bis (d), K5 auch (e)	nein
K8 IGF-Vorhaben FlexARob (kein Fallbetrieb)	Modellannahme Dritter (Komponentenausgaben)	(a) bis (d)	nein
Lohnfertiger	Unternehmensangabe (Herstellerbericht, nicht im Register)	(a) bis (e)	nein
FL-E01 Fahrzeugwerk Grünheide (Ergänzungsfall)	Unternehmensangabe (Jahresabschluss)	(a) bis (c)	nein

6.2 Was zu den acht Fällen belegt ist

Zu den acht Fällen liegen im abgelegten Bestand überwiegend Unternehmensangaben und Modellrechnungen Dritter vor; die Einzelangaben stehen in der Begleitdatei „Nachweise“, und keine geht als Eingabe in das Modell. Kontowerte in der Kontoeinheit gibt es nur in zwei Modellrechnungen (ein US-Baufall [Q49], eine manuelle Demontage ohne Roboteralternative [Q48]). Für die Produktionseinstellung der Schuhfertigung (FL-F06) nennen Unternehmensunterlagen eine Wertminderung von 11.818 TEUR im Konzernabschluss des Unternehmens, das die Fertigung betrieb, und führen die Einstellung darauf zurück, dass die Sohlenfertigung mit Weiterverarbeitung in Asien überlegen gewesen sei [Q36, Q51, Q53; Unternehmensangaben]. Eine unabhängige Kostengröße und ein Fremdbeleg für Gründe fehlen im abgelegten Bestand. Zu FL-F07 äußerte der Unternehmenschef 2018 auf X, übermäßige Automatisierung sei ein Fehler gewesen [Q37; Unternehmensangabe]; Umfang und Kosten sind nicht belegt. Für H5 ist damit weder FL-F06 noch FL-F07 testbar.

6.3 Kandidaten mit Datenlücken

Die beiden Abschlussarbeiten (K9 Q56, K10 Q59) sind **Planungen, keine Betriebsmessungen**; ob K9 umgesetzt wurde, sagt der Text nicht, und K10 hält die Umsetzung für nur schwer realistisch und wirtschaftlich. Beide tragen Planansätze und berechnete Größen, aber keinen gemessenen Wert (W = 0), keinen Output je Stunde, kein Abnahmekriterium und keine Alternative A1 bis A3. Die Nachrechnung der Planungsrechnungen stimmt mit den Quellen überein (Abschnitt 8.4). Die Beispiele des Hessen-Leitfadens (K5 bis K7) enthalten keine Kostenkonten; eines nennt eine Investition ohne Systemgrenze, eines eine Amortisation von sechs auf neun Jahre ohne I_0, die nur als Stresswert in das Modell eingeht (Abschnitt 5.9). K8 ist ein Forschungsvorhaben ohne Fallbetrieb. Der Lohnfertiger steht nur als Kandidat in der Fallbeschreibung und ist nicht im Quellenregister; aus ihm geht keine Zahl in diese Studie ein.

Anker sind keine Deckung. Einzelne Fallzahlen dienen als Anker für Bandbreiten im Annahmensatz und sind dort als Modellannahme Dritter oder Unternehmensangabe gekennzeichnet: Komponenten und Integrationsanteil von A2 (Q56, FlexARob), Verfügbarkeit, Nutzungsdauer, Wartung und Zellenleistung, Ansätze für A3 (Q38) und der Stresszuschlag (Hessen-Leitfaden). Daraus folgt nicht, dass das Modell einen dieser Fälle abbildet oder bestätigt. Keinem Unternehmen werden Modellwerte zugeschrieben.

6.4 Auslastung als Mechanismus

Für den Automobilbereich ist nur ein Mechanismus vergleichbar, kein Kostenniveau und keine Produktivität. Die Tesla Manufacturing Brandenburg SE gibt für 2025 eine Kapazitätsauslastung von 54 Prozent an (2024: 56,3 Prozent) [Q62, Q63; Unternehmensangabe; anderes Produkt, Ergänzungsfall].

Rechenmechanik ohne Firmenbezug (Klasse: Modellergebnis): Bei einem Fixkostenanteil von 30 Prozent an den Stückkosten bei voller Auslastung liegen die Stückkosten bei u = 0,75 um 10 Prozent über denen bei u = 1, bei u = 0,9 um rund 3 Prozent; bei einem Fixkostenanteil von 60 Prozent um 20 beziehungsweise rund 7 Prozent. Der Fixkostenanteil eines realen Werks ist nicht bekannt. Konzernbeschäftigte je Fahrzeug werden nicht verglichen: Es sind Konzern- statt Werkszahlen, die Fertigungstiefen sind verschieden, und Beschäftigte sind keine Arbeitsstunden. Keine dieser Zahlen geht in das Modell ein.

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

7 Sensitivität

Nachweis [N-7]. Klasse: Modellergebnis.

Das Tornado variiert 78 der 81 Modelleingaben; drei haben keine Spanne, weil Hardware der Fortführung und mannlose Stunden der Fortführung und der organisatorischen Alternative festgelegt null sind. Lohn und Strompreis verschieben im Tornado beide Standorte gleichzeitig, weil China und die USA als Verhältnis zu Deutschland gesetzt sind; die Standortkennzahlen messen deshalb die Wirkung auf den Abstand, nicht auf das Niveau. Die Einzelschwellen in Abschnitt 5.7.3 verändern dagegen nur die deutsche Größe. Die Tabelle zeigt die Eingaben, die die Studienfrage und das Protokoll nennen (Materialanteil, Auslastung, Bedienerzeit, Zykluszeit, Maschinenpreis) sowie Lohn, Strom und Anlagenpreis; Kennzahlen: K_gut A2 in Deutschland (EUR je Teil, Basis 11,0), Differenz A2 minus A0

(EUR je Teil, Basis −2,6), u_kipp A2 gegen A0 (Basis 0,12), Abstand zu China (A2, Basis 4,9 Prozent). Angegeben ist jeweils der Wert bei niedrigem bis hohem Eingabewert.

Eingabe (Herkunft)	Bandbreite	K_gut A2	Differenz A2 – A0	u_kipp A2 gegen A0	Abstand zu China (%)
Materialkosten je Teil (gesetzt)	4 bis 20 EUR	6,9 bis 23,3	−2,66 bis −2,58	0,121 bis 0,124	8,0 bis 2,7
Zykluszeit je Teil (gesetzt)	0,05 bis 0,25 h	9,6 bis 15,3	−1,3 bis −6,7	0,124 bis 0,121	3,1 bis 9,1
Nachfrageauslastung (gesetzt)	0,2 bis 0,8	14,5 bis 10,3	−1,2 bis −3,1	0,122 (unverändert)	14,4 bis 5,2
Maschinenpreis (gesetzt)	150.000 bis 500.000 EUR	10,5 bis 12,4	−2,64 (unverändert)	0,122 (unverändert)	5,1 bis 4,5
Bedienerzeit A0 (gesetzt)	0,5 bis 1,0	11,03 (unverändert)	−1,2 bis −3,6	0,217 bis 0,094	7,3 bis 4,9
Bedienerzeit A2 (gesetzt)	0,05 bis 0,25	10,9 bis 11,5	−2,8 bis −2,1	0,113 bis 0,157	3,6 bis 9,8
Hardware A2 (Quelle, Modellannahme Dritter)	32.570 bis 100.000 EUR	10,8 bis 11,7	−2,8 bis −2,0	0,088 bis 0,233	4,9 bis 11,2
Lohn Deutschland (gesetzt)	28,41 bis 49,5 EUR/h	10,9 bis 11,2	−1,7 bis −3,4	0,169 bis 0,100	5,4 bis 5,8
Strompreis Deutschland (beobachtet)	0,127 bis 0,228 EUR/kWh	10,9 bis 11,1	−2,64 (nahezu unverändert)	0,1216 bis 0,1219	4,6 bis 4,9

Materialanteil. Der Materialanteil von 74 Prozent ist keine Messgröße, sondern folgt aus dem gesetzten Materialpreis von 8 EUR je Teil. Innerhalb der Bandbreite von 4 bis 20 EUR liegt er zwischen 59 und 88 Prozent, und K_gut von A2 schwankt zwischen 6,9 und 23,3 EUR je Teil. Die Differenz A2 minus A0 und die Kippauslastung ändern sich dabei kaum, weil Material in allen Alternativen gleich ist und sich aus den Differenzen kürzt; der Standortabstand dagegen halbiert sich fast (8,0 gegen 2,7 Prozent). Material wirkt damit auf Standortaussagen, nicht auf Inlandsaussagen.

Auslastung. Im Modell ist die Auslastung die wichtigste Größe für das Niveau von K_gut und für den Standortabstand (Platz 3 beim Niveau, Platz 1 beim Abstand zu China), aber bei u_kipp ohne Wirkung, weil u_kipp die Auslastung selbst ist. **Bedienerzeit.** Die gebundene Bedienerzeit in A0 ist nach der Hardware von A2 der zweitwichtigste Treiber der Kippauslastung und der zweitwichtigste der Kostendifferenz; die gebundene Bedienerzeit in A2 wirkt gegensinnig und stark auf den Standortabstand. **Zykluszeit.** Die Zykluszeit skaliert den Arbeitsanteil insgesamt; sie ist die größte Einzelgröße für die Kostendifferenz A2 minus A0 (Platz 1) und für den Abstand zu den USA, hat aber auf u_kipp kaum Einfluss, weil sie sich in u kürzt. **Maschinenpreis.** Der Maschinenpreis ist in allen Alternativen gleich und verschiebt nur das Niveau.

Die größten Treiber sind gesetzte Größen (Material, Zykluszeit, Auslastung, Bedienerzeit, Maschinenpreis) oder Größen mit gesetzter Basis. Der deutsche Strompreis steht bei den Kennzahlen des Inlandsvergleichs auf Rang 26 bis 37 von 78 und beim Abstand zu den USA auf Rang 12. Der Lohn steht bei der Kippauslastung auf Rang 3 und bei der Kostendifferenz auf Rang 4; Hardware von A2 steht bei der Kippauslastung auf Rang 1. **Folgerung:** Die Kernaussagen der Studie (Kippauslastung, Schwellen, Standortabstand) hängen an Größen, die nicht aus Quellen stammen und die nur Fertigungsplanung und Betriebsdaten festlegen können. Das ist der Grund, die Ergebnisse als bedingte Aussagen zu führen und die Fachprüfung der gesetzten Eingaben als wichtigste offene Aufgabe auszuweisen (Abschnitt 10).

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

8 Grenzen der Aussagen und Gegenprobe

8.1 Wann die Aussagen nicht tragen

Für jede Hauptaussage steht, unter welcher Bedingung sie nicht trüge und was daraus für das Ergebnis folgt.

Aussage	Sie ist falsch, wenn …	Folge für das Ergebnis
A2 ist ab u ≈ 0,12 günstiger als A0	die gebundene Bedienerzeit in A0 real nur etwa halb gebunden ist (0,5) **und** A2 teuer (Hardware 100.000 EUR) **und** in A2 stark gebunden (0,25) **und** der Lohn niedrig liegt (28,41 EUR je Stunde): dann gibt es keine Kippauslastung (15 von 6.561 Gitterpunkten). Sie ist auch falsch, wenn die reale Auslastung des Prozesses unter dem Kipppunkt liegt; die Nachfrage ist nicht aus Daten gesetzt.	Die erste Aussage der Zusammenfassung entfiele; unter der realen Auslastung des Prozesses bliebe A0 im Modell günstiger.
A3 wird nur dort die günstigste, wo A2 die Menge nicht mehr schafft	A2 real mehr Menge schafft (höhere Verfügbarkeit, kürzere Rüstzeit); dann entfällt der Bereich, in dem A3 übernimmt. Sie ist auch falsch, wenn A3 real deutlich billiger ist als gesetzt (365.400 EUR einschließlich Integration, Anlauf und Konformität): Der Spielraum von A3 gegen A0 beträgt im Rechenpunkt bei u = 0,5 nur das 1,3-Fache des Anlagenpreises.	Der Bereich, in dem A3 im Modell übernimmt, entfiele oder verschöbe sich; die Aussage zur Rangfolge wäre neu zu rechnen.
Der Strompreis entscheidet das Inland nicht	der Prozess energieintensiv ist. Das Modell setzt 10 kW mittlere Last der Maschine und 0,5 bis 3 kW Zusatzlast; bei Lasten über rund 52 kW (A2) wäre der Strombeitrag zum Abstand gegen China größer als der Lohnbeitrag.	Die dritte Aussage gälte nur für Prozesse mit geringer Leistung; energieintensive Prozesse wären gesondert zu rechnen.
Der Abstand zu China beträgt bei gleicher Technik rund 5 Prozent	der Materialanteil klar unter den gesetzten 74 Prozent liegt (bei 59 Prozent 8,0 Prozent, bei 26 Prozent 15,2 Prozent), die Auslastung niedrig ist (u = 0,2: 14,4 Prozent), China bei den Anlagenpreisen 20 Prozent günstiger ist (Faktor 0,8: 6,1 Prozent) oder das Lohnverhältnis höher liegt (6,1 statt 4,0: 7,3 Prozent). Er kann sich auch umkehren, wenn die chinesischen Preise höher liegen als angenommen.	Die Standortaussage der Zusammenfassung gälte nur für den gesetzten Materialanteil und die gesetzte Auslastung.
Gegenüber den USA bleibt ein kleiner Restabstand von rund 2 Prozent	die US-Zinsen anders liegen (Ersatzannahme, nicht nachweisbar), der Strompreisabstand nicht 2,0 beträgt (Spanne 1,0 bis 3,2) oder der Lohnabstand nicht 15 Prozent beträgt.	Der Restabstand zu den USA wäre größer oder kleiner; er ist wegen der Ersatzannahme beim US-Zins besonders unsicher.
Ein Nachfrageeinbruch entwertet A3 und lässt A2 bestehen	A2 real stärker an die Menge gebunden ist (kleinere mannlose Stunden, mehr gebundenes Personal).	Die letzte Aussage der Zusammenfassung entfiele für A2.

Nicht beantwortbar mit diesem Modell: ob irgendein reales Werk diese Kostenstruktur hat, wie oft solche Bedingungen vorliegen, ob Betriebe die Alternativen so wählen und ob die Wirtschaftlichkeit nach Steuern und Förderung gleich ausfällt.

Die vorab festgelegten Gegenhypothesen des Protokolls bleiben ungetestet; das Modell trifft zu ihnen keine Aussage.

8.2 Strukturannahmen ohne Quellendeckung

Nicht durch eine Quelle gedeckt sind: gleiche gute Menge in allen Alternativen; Auslastung u als Nachfrage in Referenzstunden; standortgleiche Materialkosten; Schichtzuschläge als Mittel über bemannte Stunden; ein pauschaler, vorsteuerlicher Rechenrahmen. Nicht im Modell sind Lohn- und Strompreissteigerungen über die Nutzungsdauer, Zölle, Transport, Lieferzeit, Währungsrisiko, Gas und Wärme, Qualitätsunterschiede über den Ausschussanteil hinaus, Kapazitätserweiterungen über 6.000 Anlagenstunden hinaus (dann gilt eine Alternative als „nicht zulässig“), entgangene Deckungsbeiträge sowie Gebäude und Fläche. Der Eigenkapitalkostensatz und der Eigenkapitalanteil sind gesetzt; der Fremdkapitalzins ist beobachtet, aber **kein** Kapitalkostensatz, sondern ein Mischzins-Baustein.

8.3 Die fehlende nachsteuerliche Variante

Das Protokoll verlangt eine nachsteuerliche Variante (Steuern, Abschreibung, Förderung) als Pflichtausgabe je Fall. Pfad B enthält sie **nicht**. Alle Ergebnisse sind vorsteuerliche Kostenvergleiche. Welche Richtung eine nachsteuerliche Rechnung hätte, lässt sich ohne belegte Steuer- und Fördersätze nicht sagen: Abschreibungsregeln und Investitionsförderung können die relative Stellung kapitalintensiver Alternativen gegenüber der Fortführung verändern, Steuern auf Gewinne verändern die Rangfolge nur, wenn sie die Alternativen verschieden treffen. Diese Studie setzt dafür keinen Wert und behauptet keine Richtung. Die Lücke ist ausgewiesen; ein Nachholen setzt belegte Parameter voraus und wäre eine eigene, zu prüfende Ergänzung. Solange sie fehlt, ist jede Aussage der Form „A2 rechnet sich ab …“ als Aussage über Stückkosten vor Steuern und Förderung zu lesen.

8.4 Beobachtung zu einer Bachelorarbeit: Break-even [Q56]

Die Nachrechnung stimmt in den Rechenschritten überein (Hardware plus Programmierung 40.962,56 EUR; Maschinenstundensatz 1,55 EUR je Stunde; Break-even nach 1.525,04 Stunden). Die Formel 5 der Arbeit zieht aber einen Maschinenstundensatz ab, der die Fixkosten schon enthält, und teilt zugleich die Fixkosten, sodass sie doppelt eingehen. Ohne Doppelzählung (variable Kosten 1.431,25 EUR durch 6.220 Stunden) ergeben sich 1.453,61 Stunden, in der Quelle ist der Break-even rund 5 Prozent länger. Das ist kein Fehler dieses Modells, mahnt aber zur Vorsicht bei Ankern aus nicht begutachteten Planungsarbeiten. Die zweite Planungsrechnung [Q59] stimmt: mannlose Tageslaufzeit 3,64 Stunden bei 50 EUR je Stunde und 2,42 Stunden bei 75 EUR je Stunde; die neun Investitionsposten ergeben 200.000 EUR.

8.5 Vergleich mit einem früheren fluxlane-Beitrag (nachträglich ergänzt)

Ein früherer Beitrag zu Standortkosten rechnet ein illustratives Beispiel auf 100 Punkten Stückkosten mit gesetzten Anteilen (Lohn 5 bis 15, Strom 3 bis 20 Prozent am chinesischen Standort). Seine qualitative Aussage, der Lohn bleibe der größere Posten, solange der Stromanteil nicht ein Vielfaches des Lohnanteils erreicht, bestätigt dieses Modell bei u = 0,5: Das Verhältnis von Strom- zu Lohnanteil liegt bei allen Alternativen unter der Schwelle 6,0 (Lohnverhältnis 4,0, Strompreisverhältnis 1,5) und ist bei A3 mit 3,6 am höchsten. Die Anteile selbst ergeben sich hier für A2 nicht (Lohn 1,3, Strom 1,5 Prozent bei u = 0,5): Das ist kein Widerspruch, sondern ein Unterschied der Rechenaufgaben, denn das Modell leitet sie aus einem definierten Prozess mit 74 Prozent Materialanteil und 10 kW Last ab. Ein Vergleich beider Rechnungen wäre irreführend.

8.6 Weitere Grenzen

Erstens stammen beide Rechenprogramme vom selben Verfasser; eine unabhängige Prüfung der Modellstruktur fehlt. Zweitens gehen die Quantile des Gitters von gleichgewichteten Stufen aus und sind keine Wahrscheinlichkeiten; das Gitter wird mit gröberer Schrittweite gescannt als der Basisfall. Drittens betrifft der IPA-Leitfaden [Q38] humanoide Roboter; seine Ansätze sind Anker für Bandbreiten, keine Deckung für Cobot-Zellen. Viertens sind der Eurostat-Preis 2026-S1 und der Bundesbankzins 09/2026 vorläufig, und der EZB-Jahresmittelkurs 2025 trifft auf einen Preismonat 2026. Fünftens sind der chinesische Strompreis je Verbrauchsklasse und die chinesischen Arbeitskosten je Stunde mit Arbeitgeberbeiträgen nicht beschafft; ebenso fehlen Anlagenpreise in China und den USA, US-Kapitalkosten, Zölle, Transport und Fertigungstiefe in Zahlen. Sechstens steht die Prüfung der 63 gesetzten Eingaben durch die Fertigungsplanung eines Betriebs aus.

9 Interpretation

9.1 Was die Rechnung zeigt

Im definierten Modellprozess sind die Schwellen für eine selektive Nachrüstung niedrig: A2 ist im Rechenpunkt ab einer Nachfrageauslastung von rund 0,12 günstiger als die Fortführung, und im Lohnbereich von 28 bis 50 EUR je Stunde bleibt das bei Auslastungen von 0,3 bis 0,7 so. Der Grund liegt in der Mechanik des Modells: Die gesetzte gebundene Bedienerzeit fällt von 0,8 auf 0,1 Stunden je bemannter Maschinenstunde und die Hardware der Zelle kostet rund 48.000 EUR; beide Setzungen sind nicht belegt, und der Tornado zeigt, dass Hardwarepreis und gebundene Bedienerzeit die Kippauslastung am stärksten bewegen. Das kapitalintensive Re-Design (A3) braucht mehr Auslastung (u_kipp rund 0,40) und verträgt kaum höhere Anlagenpreise. Die Rangfolge wechselt mit Auslastung und Variantenzahl; dass A3 in der Karte günstigste Alternative wird, ist ein Kapazitätseffekt.

Standortbezogen bleibt im Modell nach Automatisierung ein kleiner Restabstand (rund 4,9 Prozent zu China, rund 1,8 Prozent zu den USA bei u = 0,5), der gegenüber China überwiegend vom Lohn, gegenüber den USA überwiegend vom Strom getragen wird. Er hängt an einem gesetzten Materialanteil von 74 Prozent und an der Auslastung; mit weniger Materialanteil oder geringerer Auslastung wird er deutlich größer. Ob die automatisierte deutsche Anlage „konkurrenzfähig“ ist, entscheidet eine Setzung, die im abgelegten Bestand nicht belegt ist und Marktdaten über Nähe, Zoll, Qualität und Lieferzeit verlangt: die tolerierte Preislücke δ.

Spannung zur Verbreitung. Das Modell weist für A2 eine Amortisation von rund 0,7 Jahren aus, während nur 1 Prozent der befragten Mittelständler autonome Maschinenbewegung nutzen [Q03] und die deutschen Roboterinstallationen 2025 um 8 Prozent fielen [Q02]. Das ist kein Befund, sondern eine Spannung, und sie lässt sich nicht auflösen. Mögliche Gründe, als Hypothesen: höhere Kapitalkostenansprüche als der Modellmischzins von 5,99 Prozent, fehlendes Know-how und fehlende Fachkräfte, Integrationsrisiko, Förderung und Zölle, oder dass reale Betriebe nicht dem Modellprozess gleichen, vor allem bei der gebundenen Bedienerzeit. Die Quoten beziehen sich zudem auf andere Gegenstände (KI-Technologien im Mittelstand, Roboter insgesamt).

Modellergebnis unter den genannten Annahmen, kein gemessenes Unternehmensergebnis.

9.2 Was daraus nicht folgt

Daraus folgt nicht, dass sich Automatisierung in deutschen Betrieben rechnet, dass der Mittelstand sie sich leisten kann oder dass die von der KfW vermutete Rentabilitätsgrenze zu hoch angesetzt sei: Das Modell ist ein Prozess, keine Stichprobe, und enthält keinen Mittelstandsfall. Es folgt auch nicht, dass der Standortnachteil „klein“ sei: Er ist im Modell klein, weil der gesetzte Materialanteil groß ist. Und es folgt nichts für die Hypothesen H1 bis H5 des Protokolls: Pfad A bleibt nicht testbar. Die Studie ersetzt keine Betriebsdatenerhebung; sie zeigt, welche Größen eine solche Erhebung zuerst erheben müsste, nämlich gebundene Bedienerzeit je Maschinenstunde in der Fortführung, tatsächliche Hardware- und Integrationskosten, Auslastung und Variantenzahl der Maschine sowie die Zykluszeit.

10 Hinweise nach Adressaten, nur bedingt

Die Studie liefert **keine Entscheidungsgrundlage für konkrete Investitionen** und keine Empfehlung für ein bestimmtes Unternehmen. Bedingte Hinweise:

1. **Betriebe und Planende, die Alternativen prüfen:** Ähnelt der eigene Prozess dem Modellprozess strukturell (eine Maschine mit Beschickung, Klein- bis Mittelserie), wäre die Kippauslastung mit eigenen Werten zu rechnen und nicht dem Modellwert zu entnehmen. Zuerst zu erheben wären die Größen, auf die der Modellwert am stärksten reagiert: Hardware- und Integrationskosten der Zelle, gebundene Bedienerzeit der Fortführung und der Automation, Variantenzahl und Rüstzeit, Zykluszeit und tatsächliche Auslastung. Der Modellwert 0,12 trägt keine Entscheidung.
2. **Redaktionen und Öffentlichkeit:** Wer Wirtschaftlichkeit darstellt, sollte Annahmen, Herkunft jeder Eingabe und Bandbreite offenlegen und Rechnungen als Modellergebnis kennzeichnen; eine Spanne ist aussagekräftiger als ein Punkt. Standortaussagen ohne Angabe des Materialanteils und der tolerierten Preislücke sind nicht prüfbar.
3. **Forschung:** Soll die Frage empirisch beantwortet werden, braucht Pfad A einen Mittelstandsfall mit belegten Pflichtfeldern, festgelegten Bandbreiten und beiden Medianen; ohne Betriebsdaten entsteht er nicht. Für Pfad B

wären die nachsteuerliche Variante, belegte Anlagenpreise in China und den USA und die Prüfung der gesetzten Eingaben durch die Fertigungsplanung die nächsten Schritte.

11 Grenzen der Verallgemeinerung

Die Aussagen gelten für den definierten Modellprozess (eine Werkzeugmaschine mit Beschickung, Referenzteil, Klein- bis Mittelserie) und nicht für andere Prozesse, andere Branchen oder Gesamtwerke. Sie sind keine Häufigkeits-, Branchen- oder Mittelstandsaussage und keine Aussage, dass ein bestimmtes Unternehmen eine Kennzahl erreicht hat; es liegt in diesem Pfad kein Fall vor, der den Aufnahmekriterien genügt. Die Gitter-Quantile gehen von gleichgewichteten Stufen aus und sind keine Wahrscheinlichkeiten. Nationale Mittelwerte (Eurostat, NBS, BLS, EZB-Jahresmittel) repräsentieren kein Werk; der chinesische Lohn ist ein Jahresbruttolohn, kein Stundenkostenwert; der Strompreisabstand beruht auf einer IEA-Aussage für Großverbraucher über 150 GWh, die hier auf einen Mittelstandsbetrieb übertragen wird (gesetzt); der Preismonat 2026 trifft auf den EZB-Jahresmittelkurs 2025; der Eurostat-Preis 2026-S1 ist vorläufig. Alle Ergebnisse sind vorsteuerlich.

Die Ergebnisse betreffen weder Beschäftigung, Verteilung noch Region und enthalten keine Konformitätsbewertung einzelner Anlagen nach der Maschinenverordnung.

12 Quellenverzeichnis

Zitiert werden nur Quellen, deren Volltext abgelegt ist. Die Art der Quelle bestimmt, wie ihre Zahlen in der Studie behandelt werden (Abschnitt 4.1). Die Nachweise zu jeder Quelle stehen in der Begleitdatei „Nachweise“.

Kennung	Quelle	Art
Q01	International Federation of Robotics: Robot Density Highest in South Korea, Singapore and Germany. Pressemitteilung, 12.11.2026	Verbandsstatistik (beobachtet)
Q02	International Federation of Robotics: Five Million Robots now Operate in Factories Globally (World Robotics 2026). Pressemitteilung, 24.09.2026	Verbandsstatistik (beobachtet)
Q03	KfW Research: Künstliche Intelligenz im Mittelstand, Fokus Volkswirtschaft Nr. 554, Juli 2026	Befragung (beobachtet), Population: Mittelstand
Q04	Statistisches Bundesamt: GENESIS 81000-0017, Arbeitsproduktivität, Arbeitnehmerentgelt und Lohnstückkosten	amtliche Statistik (beobachtet)
Q06	International Energy Agency: Electricity 2026, Prices	Marktbericht; Aussage nur für Großverbraucher über 150 GWh
Q13	Brynjolfsson, Rock, Syverson: The Productivity J-Curve. NBER Working Paper 25148 (später in einer Fachzeitschrift erschienen)	Arbeitspapier (Theorie mit US-Daten)
Q27	Verordnung (EU) 2023/1230 über Maschinen, Art. 54 Abs. 2 in der Fassung der Berichtigung (Amtsblatt L 169/35)	Rechtstext
Q36	adidas Group: Pressemitteilung vom 11.11.2019 zur Speedfactory-Technologie	Unternehmensangabe
Q37	Beitrag des Unternehmenschefs eines Fahrzeugherstellers auf X, 13.04.2018	Unternehmensangabe
Q38	Fraunhofer IPA: Leitfaden Wirtschaftlichkeit Humanoider Roboter, Revision vom 30.04.2026	Simulation mit gesetzten Kosten, nicht begutachtet
Q41	Siemens AG: Pressemitteilung vom 19.10.2026	Unternehmensangabe (Herstellerangabe, „bis zu“)
Q46	dpa-AFX, 21.08.2026: Sprecherzitat zur Produktion in Bühl	referierte Unternehmensaussage
Q48	Projekt DeMoBat (Fraunhofer IPA u. a.): Abschlussbericht, Stand 12/2023	Projektbericht, Modellrechnung
Q49	Brosque, Fischer (2022): Safety, quality, schedule, and cost impacts of ten construction robots. Construction Robotics 6	Fachzeitschrift, Projektannahmen (USA)
Q51	OECHSLER AG: Konzernabschluss und Konzernlagebericht 2019 (Bundesanzeiger-Ausdruck, Drittspiegel)	Unternehmensangabe
Q53	adidas AG: Geschäftsbericht 2019, Abschnitt Global Operations (Webfassung)	Unternehmensangabe

Kennung	Quelle	Art
Q56	Bachelorarbeit (2019, Staatliche Studienakademie Glauchau) zur Einführung eines kollaborierenden Robotersystems	Bachelorarbeit (Planung), nicht begutachtet
Q59	Bachelorarbeit (2022, Hochschule Mittweida) zum Robotereinsatz an CNC-Drehmaschinen	Bachelorarbeit (Planung), nicht begutachtet
Q60	Hessen Trade & Invest GmbH im Auftrag des Hessischen Wirtschaftsministeriums: Automatisierungspotenziale in der Produktion nutzen. Leitfaden zum Einsatz von Robotik, April 2026	Broschüre mit Praxisbeispielen, nicht begutachtet
Q61	Schlussbericht zum IGF-Vorhaben 19202 N, FlexARob, Berichtszeitraum 2017 bis 2019	Forschungsbericht (Komponentenausgaben)
Q62, Q63	Tesla Manufacturing Brandenburg SE: Jahresabschluss und Lagebericht 2025 und 2024	Unternehmensangabe
Q70 bis Q77	Eurostat (Arbeitskosten je Stunde; Strompreise für Nichthaushaltskunden), Deutsche Bundesbank (Zinsstatistik), Europäische Zentralbank (Referenzkurse), National Bureau of Statistics of China (Löhne 2025), People's Bank of China (Referenzzins), U.S. Bureau of Labor Statistics (Arbeitskosten), U.S. Energy Information Administration (Strompreis Texas)	amtliche Statistik (beobachtet)

Hinweis zu Daten und Lizenzen. Statistische Daten (Statistisches Bundesamt, Eurostat, Bundesbank, EZB, BLS, EIA, NBS, PBoC) werden nur als einzelne Zahlen zitiert; aus Bachelorarbeiten, dem IPA-Leitfaden, der Hessen-Broschüre, dem FlexARob-Bericht und Herstellerberichten werden nur einzelne Angaben genannt und keine Quellenseiten wiedergegeben; maßgeblich sind die Nutzungsbedingungen der jeweiligen Stelle. Nicht zitiert werden Quellen, die nicht im Volltext abgelegt sind (unter anderem Unterlagen zu einem Lohnfertiger, ein Aktionärsbrief von 2018 und Konzernberichte weiterer Hersteller).

Rechtliche Hinweise

Keine Beratung

Diese Veröffentlichung ist ein redaktionelles Erzeugnis. Sie stellt keine Rechtsberatung, keine medizinische, pflegerische, arbeitsrechtliche oder datenschutzrechtliche Beratung und keine Beschaffungs- oder Vergabeberatung dar. Sie ersetzt insbesondere nicht die Prüfung durch Rechtsanwaltschaft, Datenschutzaufsicht, Medizinprodukteberatung, Vergabestelle, Ethikkommission nach Medizinprodukterecht oder Arbeitnehmervertretung. Wer auf Grundlage dieses Dokuments entscheidet, entscheidet auf eigene Verantwortung und hat den Sachverhalt vorher eigenständig fachlich prüfen zu lassen.

Keine Zusicherung, keine Konformitätsaussage

Die beschriebenen Verfahren, Prüfstufen und Checklisten sind redaktionelle Vorschläge. Sie sind keine Zusicherung einer Eigenschaft, kein garantiertes Ergebnis und kein Nachweis der Einhaltung einer Rechtsvorschrift. Wer ein Verfahren aus diesem Dokument anwendet, erfüllt damit keine gesetzliche Anforderung; ob eine Anforderung erfüllt ist, entscheidet die zuständige Stelle am Einzelfall.

Rechtsstand

Rechtsstände, Fristen und Fundstellen beziehen sich auf den im Dokumentkopf genannten Tag. Der KI-Rechtsrahmen wird laufend geändert; ein älterer Fristenplan darf nicht unverändert weiterverwendet werden. Genannte Gesetze und Verordnungen sind in ihrer jeweils geltenden Fassung heranzuziehen.

Haftung

Die Inhalte wurden mit Sorgfalt erstellt und, soweit im Methodenteil beschrieben, gegengeprüft. Für Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität wird gleichwohl keine Gewähr übernommen. Eine Haftung des Herausgebers ist auf Vorsatz und grobe Fahrlässigkeit beschränkt; dies gilt nicht bei der Verletzung des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit sowie bei zwingender gesetzlicher Haftung.

Verweise auf fremde Inhalte

Dieses Dokument verweist auf Inhalte Dritter, insbesondere auf Behörden-, Fachgesellschafts-, Normen- und Fachverlagsseiten. Auf deren Gestaltung und Inhalt hat der Herausgeber keinen Einfluss; für sie ist jeweils der dortige Anbieter verantwortlich. Die Nennung eines Produkts, Herstellers oder Dienstes ist weder eine Empfehlung noch eine Bewertung seiner Eignung.

Marken und Produktbezeichnungen

Genannte Produkt-, Marken- und Unternehmensbezeichnungen sind Kennzeichen ihrer jeweiligen Inhaber und werden ausschließlich zur Beschreibung des Sachverhalts verwendet. Aus der Nennung folgt keine Verbindung zwischen dem Herausgeber und dem jeweiligen Unternehmen und keine Aussage über Zulassungs-, Konformitäts- oder Zertifizierungsstatus.

Urheberrecht und Nutzung

Dieses Dokument, sein Text, seine Tabellen und seine Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Rechteinhaberin ist die WebTrades GmbH. Zulässig sind das Lesen, das Speichern und der Ausdruck für den eigenen Gebrauch sowie das Zitieren einzelner Stellen mit vollständiger Quellenangabe nach der im Impressum genannten Zitierweise. Die Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung, öffentliche Zugänglichmachung oder kommerzielle Verwertung des Dokuments oder wesentlicher Teile daraus bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung der Rechteinhaberin. Das gilt ausdrücklich auch für die Übernahme von Tabellen und Abbildungen.

Keine personenbezogenen Daten

Für dieses Dokument wurden keine personenbezogenen Daten verarbeitet. Es beruht auf veröffentlichten Quellen, Statistiken und Fachliteratur; es wurden keine Unternehmen kontaktiert und keine Betriebsdaten erhoben.

Unabhängigkeit

Dieses Dokument ist ohne Auftrag, ohne Finanzierung und ohne inhaltliche Beteiligung eines Herstellers, Verbands oder Beratungsunternehmens entstanden. Es besteht kein Vergütungs- oder Beteiligungsverhältnis zu einem der genannten Unternehmen oder Institutionen. Genannt werden Systeme, Anbieter und Dokumente, weil sie in den beschriebenen Gegenstand fallen, nicht weil sie beworben werden sollen.

Anwendbares Recht

Es gilt das Recht der Bundesrepublik Deutschland unter Ausschluss des UN-Kaufrechts. Gesetzliche Verbraucherschutzvorschriften bleiben unberührt.