



Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten und Potenziale flexibler Kupferschienen im Schaltschrankbau.

aus dem Studiengang Elektrotechnik

an der Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim

von

Lucas Weyland

23.06.2025

Bearbeitungszeitraum:	23.06.2025 bis 15.09.2025
Matrikelnummer, Kurs:	3306752, TEL22AT1
Unternehmen:	ABB AG, Mannheim
Betreuer*in im Unternehmen:	Albert Lewandowski
Betreuer*in an der DHBW:	Margit Rechkemmer

Unterschrift Betreuer*in

Sperrvermerk

Die vorliegende Arbeit mit dem Titel

Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten und Potenziale flexibler Kupferschienen im Schaltschrankbau.

enthält unternehmensinterne bzw. vertrauliche Informationen der ABB AG, ist deshalb mit einem Sperrvermerk versehen und wird ausschließlich zu Prüfungszwecken im Studiengang Elektrotechnik der Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim vorgelegt.

Der Inhalt dieser Arbeit darf weder als Ganzes noch in Auszügen Personen außerhalb des Prüfungsprozesses und des Evaluationsverfahrens zugänglich gemacht werden, sofern keine anders lautende Genehmigung der Ausbildungsstätte (ABB AG) vorliegt.

Mannheim 23.06.2025

Lucas Weyland

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Bachelorarbeit (bzw. Projektarbeit oder Studienarbeit bzw. Hausarbeit) mit dem Thema:

Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten und Potenziale flexibler Kupferschienen im Schaltschrankbau.

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich habe für diese Arbeit generative KI-Tools zur Strukturierung, für Vorschläge zu Formulierungen und der Literaturrecherche verwendet. Die Verantwortung für alle Inhalte liegt bei mir. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Mannheim 23.06.2025

Lucas Weyland

Inhaltsverzeichnis

Sperrvermerk	I
Erklärung	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	1
1.3 Aufbau der Arbeit	1
2 Grundlagen	2
2.1 Einführung in den Schaltschrankbau	2
2.2 Aufbau und Funktion von Kupferschienen	2
2.3 Unterschied zwischen starren und flexiblen Kupferschienen	5
2.4 Normative Anforderungen	6
3 Stand der Technik	8
3.1 Aktuelle Verbindungstechniken im Schaltschrankbau	8
3.2 Einsatzbereiche flexibler Kupferschienen	8
3.3 Bisherige Forschung und industrielle Anwendungen	8
4 Methodik	9
4.1 Vorgehensweise zur Analyse	9
4.2 Verwendete Softwaretools	9
4.3 Kriterienkatalog für die Bewertung	9
4.3.1 Risikoanalyse	9
4.3.2 Risikoidentifikation	10
4.3.3 Risikobewertung	12
4.3.4 Risikobehandlung	12
5 Technische Analyse	15
5.1 Leitfähigkeit und Stromtragfähigkeit	15
5.2 Thermische Belastung und Wärmeverhalten	15
5.3 Mechanische Belastbarkeit und Kurzschlussfestigkeit	15
5.4 Kontaktierung und Montageaufwand	15
5.5 Platzbedarf und Flexibilität im Design	15

5.6 Mechanische Bearbeitung und Anpassungsfähigkeit	15
6 Wirtschaftliche Bewertung	16
6.1 Materialkostenvergleich	16
6.2 Installations- und Planungsaufwand	16
6.3 Auswirkungen auf Fertigungsprozesse	16
6.4 Wirtschaftliche Potenziale und ROI	16
7 Fallstudie/Beispielanwendung	17
7.1 Analyse eines konkreten Schaltschrankdesigns	17
7.2 Vergleich: bestehendes Design vs. optimiertes Design mit flexiblen Schienen	17
7.3 Bewertung der Ergebnisse	17
8 Diskussion	18
8.1 Zusammenfassung der technischen und wirtschaftlichen Vor- und Nachteile	18
8.2 Grenzen und Herausforderungen beim Einsatz flexibler Kupferschienen . . .	18
8.3 Optimierungspotenziale und Empfehlungen	18
9 Fazit und Ausblick	19
9.1 Beantwortung der Forschungsfrage	19
9.2 Entscheidungshilfe für den Einsatz flexibler Kupferschienen	19
9.3 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen oder Forschung	19
Literatur	a
Anhang	b
A1 ETO-Prozessdiagramm	b
A2 CTO-Prozessdiagramm	c

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 ETO-Prozessdiagramm: [1] b

Abbildung 2 CTO-Prozessdiagramm: [1] c

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich zwischen starren und flexiblen Kupferschienen	5
--	----------

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

ABB	Asea Brown Boveri
CTO	Configured to Order
DC	Direct Current
DHBW	Duale Hochschule Baden-Württemberg
ETO	Engineered to Order

1 Einleitung

1.1 Motivation

1.2 Zielsetzung der Arbeit

1.3 Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

2.1 Einführung in den Schaltschrankbau

Der Schaltschrankbau ist ein zentrales Element der industriellen Automatisierung. Er umfasst die Planung, Konstruktion und Verdrahtung von Gehäusen, die elektrische Komponenten wie Steuerungen, Antriebe und Schutzgeräte enthalten. Die Abteilung **ABB Motion** liefert dabei insbesondere Lösungen für elektrische Antriebe, Frequenzumrichter und Servoantriebe, die in Schaltschränken integriert werden müssen [1] (https://library.e.abb.com/public/1089fa14184049b6ab41c01bf39f3cd3/9AKK107991A1574_Rev_B_13_Installation_Stecksockelsystem_DE_Elektrospicker_102020.pdf).

ABB Motion bietet:

- **Niederspannungsantriebe** (z. B. ACS580, ACS880)
- **Servoantriebe** (z. B. MicroFlex e150/e190)
- **Motion Control Systeme** für präzise Positionierung und Regelung
- **Digitale Services** zur Zustandsüberwachung und Energieoptimierung

Diese Komponenten müssen in Schaltschränken installiert werden, die Schutz vor Umwelteinflüssen bieten und gleichzeitig die Anforderungen an elektrische Sicherheit, EMV und Wärmeabfuhr erfüllen [1](https://library.e.abb.com/public/1089fa14184049b6ab41c01bf39f3cd3/9AKK107991A1574_Rev_B_13_Installation_Stecksockelsystem_DE_Elektrospicker_102020.pdf) [2](<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2CPC000417B0101>).

[1](https://library.e.abb.com/public/1089fa14184049b6ab41c01bf39f3cd3/9AKK107991A1574_Rev_B_13_Installation_Stecksockelsystem_DE_Elektrospicker_102020.pdf): [ABB Motion Drives](<https://www.abb.com/global/en/areas/motion/drives>) [2](<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2CPC000417B0101>): [ABB MicroFlex e190 Benutzerhandbuch (PDF)](<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AXD50000225002>)

2.2 Aufbau und Funktion von Kupferschienen

Kupferschienen dienen der Stromverteilung innerhalb von Schaltschränken. Sie bestehen aus hochleitfähigem Kupfer und sind in verschiedenen Querschnitten und For-

men erhältlich. [3](<https://library.e.abb.com/public/edc51e83d85231d8c1257845002a4a8f/2CDC400027D0101.pdf>).

Funktionen:

- Stromführung mit geringer Verlustleistung
- Verbindung von Schaltgeräten
- Kurzschlussfestigkeit
- Wärmeableitung

Aufbau:

- Flach- oder Rundprofile
- Isolierte oder blanke Ausführung
- Befestigung mit Haltern, Schrauben oder Stecksystemen

[3](<https://library.e.abb.com/public/edc51e83d85231d8c1257845002a4a8f/2CDC400027D0101.pdf>): [ABB Elektropicker zu Sammelschienensystemen (PDF)] (https://library.e.abb.com/public/1089fa14184049b6ab41c01bf39f3cd3/9AKK107991A1574_Rev_B_13_Installation_Stecksockelsystem_DE_Elektropicker_102020.pdf)

Kupferschienen, auch als Sammelschienen bezeichnet, sind essenzielle Bestandteile der elektrischen Energieverteilung in Schaltschränken. Sie dienen der verlustarmen Übertragung elektrischer Energie sowie der strukturierten Verbindung von Schalt-, Schutz- und Steuergeräten. Aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit, mechanischen Stabilität und thermischen Belastbarkeit wird in der Regel elektrolytisch raffiniertes Kupfer (Cu-ETP) mit einer Reinheit von mindestens 99,9 % verwendet [1].

Der Aufbau von Kupferschienen variiert je nach Anwendung. In Standardanwendungen kommen massive, starre Flachsienen mit rechteckigem Querschnitt zum Einsatz. Diese sind in verschiedenen Dimensionen erhältlich, etwa 30 × 10 mm oder 50 × 10 mm, und ermöglichen Stromtragfähigkeiten von mehreren hundert bis über 3000 Ampere – abhängig von der Einbausituation, der Umgebungstemperatur und der Belüftung [2]. Für Anwendungen mit erhöhten Anforderungen an Flexibilität, wie bei beengten Platzverhältnissen oder beweglichen Komponenten, werden flexible Kupferschienen eingesetzt. Diese bestehen aus mehreren dünnen Kupferlamellen, die

elektrisch leitend miteinander verbunden und meist mit einer isolierenden Ummantelung versehen sind. Flexible Varianten bieten den Vorteil eines geringeren Biegeradius und einer einfacheren Montage, weisen jedoch bei gleichem Querschnitt eine geringfügig reduzierte Stromtragfähigkeit auf [3].

Funktional übernehmen Kupferschienen mehrere Aufgaben: Sie ermöglichen eine zentrale Stromverteilung innerhalb des Schaltschranks, reduzieren den Verkabelungsaufwand und verbessern die Übersichtlichkeit der Installation. Darüber hinaus tragen sie zur Erhöhung der Kurzschlussfestigkeit bei, da sie hohe Stromspitzen sicher ableiten können. In modernen Schaltanlagen systemen wie dem ABB **System pro E power** oder **MNS** werden Kupferschienen modular eingesetzt, um eine skalierbare und normgerechte Energieverteilung zu gewährleisten [4].

Die Befestigung der Schienen erfolgt über spezielle Halterungen, die sowohl mechanische Stabilität als auch Berührungsschutz gewährleisten. Je nach Anforderung können die Schienen blank, verzinkt oder vernickelt ausgeführt sein, um Korrosionsschutz oder bessere Lötbarkeit zu gewährleisten. Ergänzend dazu kommen Isoliermaterialien wie PVC, TPE oder Silikon zum Einsatz, die je nach Temperatur- und Umgebungsanforderung ausgewählt werden [5].

Die Auslegung und Dimensionierung von Kupferschienen erfolgt unter Berücksichtigung normativer Vorgaben. In Europa ist insbesondere die **DIN EN 61439** maßgeblich, die Anforderungen an Stromtragfähigkeit, Erwärmung und mechanische Festigkeit definiert [6]. Für den nordamerikanischen Markt gelten zusätzlich die Anforderungen der **UL 508A**, die unter anderem die Verwendung von Kupferleitungen, Mindestquerschnitte und die Auswahl UL-zertifizierter Komponenten vorschreibt [7].

[1](https://www.mountec.de/de-de/wissensblog/aufbau_eines_schaltschranks): [ABB Produktdatenblatt ZX2782 – Kupferschiene 50×10 mm](<https://new.abb.com/products/de/2CPX044283R9999/zx2782>) [2](https://www.woehner.de/fileadmin/Downloads/03_Produkthandbuch/phb2015d_08_technische_daten.pdf): [Druseidt Belastungstabelle für Stromschienen nach DIN 43671](<https://shop.druseidt.de/allgemeine-informationen/flexible-verbinder/belastungstabelle-fuer-stromschienen->

aus-kupfer-nach-din-43671/) [3](<https://sps-standard.com/isoflexx>): [Kinto Power Connect – Unterschied starre/flexible Kupferschienen](<https://www.kintopowerconnect.com/de/blog/What-is-the-difference-between-flexible-and-rigid-busbars>) [4](https://www.isomet.ch/katalog/pdf/de/Kapitel_11_22-26.pdf): [ABB System pro E power – Technische Informationen](<https://library.abb.com/>) [5](https://www.eplan.help/de-DE/Infoportal/Content/Plattform/2.8/Content/htm/copper_k_arbeitsweise.htm): [Schrack Technik – Flexible Kupferschienen](<https://www.schrack.at/know-how-cip/verteilereinbau-ls-fi-ueberspannungsableiter-d0-und-nh/schmelzsicherungs-und-sammelschienensysteme/flexible-kupferschienen>) [6](<https://mvg-frankfurt.de/blogs/news/die-bedeutung-von-kupfer-in-schaltanlagen-vom-erzabbau-bis-zum-einsatz-von-recycling-kupfer>): [DIN EN 61439 – Anforderungen an NS-Schaltgerätekombinationen](<https://www.elektrofachkraft.de/sicheres-arbeiten/normenreihe-din-en-61439-niederspannungs-schaltgeraetekombination>) [7](<https://shop.druseidt.de/allgemeine-informationen/flexible-verbinder/belastungstabelle-fuer-stromschienen-aus-kupfer-nach-din-43671/>): [UL 508A – Anforderungen an industrielle Steuerschränke](https://www.ul.com/sites/g/files/qbfpbp251/files/2020-04/508A%20Supplement%20SA%204_13_20_L-Rev1.pdf)

Möchtest du diesen Text auch direkt in dein Typst-Dokument einfügen lassen?

2.3 Unterschied zwischen starren und flexiblen Kupferschienen

Merkmal	Starre Kupferschiene	Flexible Kupferschiene
Aufbau	Massives Kupfer	Mehrlagige Kupferlamellen
Biegeradius	Gering	Hoch
Stromtragfähigkeit	Hoch	Etwas geringer
Montageaufwand	Höher	Geringer
Einsatzgebiet	Feste Installationen	Bewegliche/enge Räume

Tabelle 1 — Vergleich zwischen starren und flexiblen Kupferschienen

ABB bietet beide Varianten an, wobei flexible Schienen besonders bei beengten Platzverhältnissen oder bei Schwingungsbelastung Vorteile bieten [3](<https://library.e>.

abb.com/public/edc51e83d85231d8c1257845002a4a8f/2CDC400027D0101.pdf) [4]
(https://library.e.abb.com/public/ba1eb1dbd9d343358475ca96be0ff15c/Brosch_Schaltungsempfehlungen_9AKK107492A1719_DE_web.pdf).

[4](https://library.e.abb.com/public/ba1eb1dbd9d343358475ca96be0ff15c/Brosch_Schaltungsempfehlungen_9AKK107492A1719_DE_web.pdf): [Kinto Power Connect – Vergleich flexibler/starrer Sammelschienen](<https://www.kintopowerconnect.com/de/blog/What-is-the-difference-between-flexible-and-rigid-busbars>)

2.4 Normative Anforderungen

Europäische Normen:

- **DIN EN 61439:** Regelt Aufbau, Prüfung und Dokumentation von Niederspannungsschaltgerätekombinationen.
- **VDE 0100:** Sicherheitsanforderungen für elektrische Anlagen.
- **Maschinenrichtlinie 2006/42/EG:** Für sicherheitsrelevante Steuerungen.
- **Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU:** Für Spannungen zwischen 50–1000 V AC.

Nordamerikanische Normen:

- **UL 508A:** Gilt für industrielle Steuerschränke in den USA. Sie legt Anforderungen an Verdrahtung, Schutzmaßnahmen, Kennzeichnung und Dokumentation fest [5] (<https://new.abb.com/low-voltage/de/produkte/installationsgeraete/sicherungsautomaten/normative-vorgaben>).
- **CSA C22.2:** Kanadisches Pendant zur UL-Norm, oft gegenseitig anerkannt.
- **Besonderheiten der UL 508A:**
 - Nur Kupferleitungen erlaubt
 - Mindestquerschnitt 14 AWG
 - Strombelastbarkeit: 125 % des Volllaststroms
 - UL-Listed oder UL-Recognized Komponenten erforderlich

Vorteile der UL-Zertifizierung:

- Erleichterte Zollabwicklung
- Marktzugang in USA/Kanada
- Höhere Produktsicherheit

[5](<https://new.abb.com/low-voltage/de/produkte/installationsgeraete/sicherungsautomaten/normative-vorgaben>): [UL 508A Norm erklärt – Kraye Systemtechnik] (<https://krayer.de/ul-508a/>) [6](<https://new.abb.com/low-voltage/de/produkte/gehaeuse-systeme/system-pro-e-power/reihenschaltschrank>): [UL-Normen im Schaltschrankbau – Alexander Bürkle Whitepaper (PDF)](https://elektrokonstruktion.alexanderbuerkle.com/Whitepaper/Whitepaper_Elektrokonstruktion_Stolpersteine_Schaltschrankbau_UL.pdf)

3 Stand der Technik

3.1 Aktuelle Verbindungstechniken im Schaltschrankbau

3.2 Einsatzbereiche flexibler Kupferschienen

3.3 Bisherige Forschung und industrielle Anwendungen

4 Methodik

4.1 Vorgehensweise zur Analyse

4.2 Verwendete Softwaretools

4.3 Kriterienkatalog für die Bewertung

4.3.1 Risikoanalyse

Projekte zeichnen sich durch eine Vielzahl an Unsicherheiten aus, die sowohl auf interne als auch auf externe Einflussfaktoren zurückzuführen sind. Solche Einflussgrößen können den Projektverlauf erheblich beeinträchtigen und im ungünstigsten Fall das Erreichen der Projektziele gefährden. Eine systematische Risikobetrachtung trägt daher wesentlich dazu bei, potenzielle Störungen frühzeitig zu erkennen und die Erfolgchancen eines Projekts signifikant zu erhöhen [18, S. 232 ff.]. Um die Bedeutung des Risikomanagements im Projektkontext angemessen einordnen zu können, ist zunächst eine begriffliche Klärung des Projektbegriffs erforderlich. Ein Projekt wird in der einschlägigen Fachliteratur als ein zielgerichtetes, einmaliges Vorhaben verstanden, das aus einer Menge abgestimmter und gesteuerter Tätigkeiten besteht und durchgeführt wird, um unter Berücksichtigung vorgegebener Rahmenbedingungen wie Zeit, Ressourcen und Qualität ein definiertes Ziel zu erreichen [19, S. 155 ff.]. In Übereinstimmung mit der Norm DIN 69901-5 ist ein Projekt zusätzlich durch die Einmaligkeit seiner Gesamtkonstellation gekennzeichnet [20, Kap. 3.44]. Die Praxis zeigt, dass Projekte insbesondere dann gefährdet sind, wenn zu Beginn unklare Zieldefinitionen oder Kommunikationsdefizite bestehen. Unvollständig abgestimmte Anforderungen gelten dabei als einer der häufigsten Risikofaktoren bei der Projektinitialisierung [21]. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden eine projektspezifische Risikoanalyse durchgeführt, die der systematischen Identifikation und Bewertung relevanter Risiken im Rahmen dieser Bachelorarbeit dient. Das Ziel ist es, potenzielle Störquellen frühzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen zur Risikominderung abzuleiten. Die Vorgehensweise folgt einem dreistufigen Modell, das die Identifikation relevanter Projektrisiken, die Bewertung der Risiken anhand einer Risikomatrix und die Ableitung sowie Planung geeigneter Gegenmaßnahmen in Abhängigkeit vom ermittel-

ten Risikopotenzial umfasst [22, Kap. 8.2]. Die vollständige Übersicht der identifizierten Projektrisiken einschließlich ihrer Kategorisierung und Bewertung ist in Anhang B dokumentiert.

4.3.2 Risikoidentifikation

Im ersten Schritt der Analyse erfolgt die Identifikation jener Risiken, die im Kontext dieser Bachelorarbeit als besonders relevant eingeschätzt werden. Die Auswahl basiert auf Erfahrungswerten aus vergleichbaren Projekten sowie auf spezifischen Rahmenbedingungen des vorliegenden Vorhabens. Insgesamt werden neun zentrale Projektrisiken betrachtet, die vier übergeordneten Risikodimensionen zugeordnet sind: Organisation, Technologie, Forschung und unternehmerischer Kontext. Im Folgenden werden diese Risikofelder exemplarisch erläutert und mit konkreten Risiken aus dem Projektverlauf verknüpft. Organisation: Organisatorische Risiken spielen im Rahmen dieser Bachelorarbeit eine zentrale Rolle, da sie unmittelbaren Einfluss auf die Bearbeitbarkeit, die Koordination sowie die Verfügbarkeit relevanter Ressourcen haben. Ein besonders gravierendes Risiko stellt die eingeschränkte Verfügbarkeit zentraler Ansprechpartner:innen dar, etwa infolge von Urlaubszeiten oder krankheitsbedingten Ausfällen. Da in verschiedenen Projektphasen auf spezifisches Fachwissen zurückgegriffen werden muss, können selbst kurzfristige Abwesenheiten zu erheblichen Verzögerungen im Arbeitsverlauf führen (siehe Anhang B, ID 1 – Mensch). Zudem besteht eine ausgeprägte Abhängigkeit von global verteilten Einheiten. Projektrelevante Informationen und Freigaben müssen über zentrale Stellen im internationalen Unternehmenskontext eingeholt werden. Diese Abhängigkeit ist mit erhöhtem Koordinationsaufwand verbunden und birgt das Risiko, dass der Projektfortschritt durch ausbleibende oder verspätete Rückmeldungen beeinträchtigt wird (siehe Anhang B, ID 5 – Abhängigkeit). Ein weiteres Risiko ergibt sich aus zeitlichen Zielkonflikten. Parallel laufende Aufgaben oder private Verpflichtungen verringern die tatsächlich verfügbare Bearbeitungskapazität innerhalb des begrenzten Zeitrahmens dieser Bachelorarbeit. Besonders bei aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen kann eine unzureichende zeitliche Abstimmung zu Terminverzögerungen oder Qualitätseinbußen führen (siehe Anhang B, ID 4 – Zeitmanagement/ Deadlines). Darüber hinaus können auch kommunikative Herausforderungen zu Verzögerungen führen. Sprachliche Unterschiede,

uneinheitliche Terminologien und heterogene Abstimmungsprozesse im internationalen Konzernumfeld erschweren insbesondere die konzernweite Koordination und bergen ein erhebliches Risiko für Missverständnisse im Projektverlauf (siehe Anhang B, ID 7 – Kommunikation). Technologie: Technologische Risiken ergeben sich vor allem aus infrastrukturellen Einschränkungen sowie begrenztem projektspezifischem Know-how im Umgang mit modernen Middleware-Architekturen. Ein zentrales Risiko stellt in diesem Zusammenhang das noch unvollständig aufgebaute Fachwissen im Bereich ROS 2 dar. Insbesondere in frühen Projektphasen kann ein Mangel an Erfahrung zu fehleranfälligen Implementierungen oder erhöhtem Einarbeitungsaufwand führen (siehe Anhang B, ID 2 – Fachwissen). Ein weiteres Risiko betrifft den eingeschränkten administrativen Zugriff auf die Systemumgebung. Bestimmte Installationen und Netzwerkkonfigurationen erfordern Administratorrechte, die nicht ohne Weiteres zur Verfügung stehen. In der Folge besteht die Gefahr, dass zentrale technische Aufgaben nicht im vorgesehenen Umfang umgesetzt werden können (siehe Anhang B, ID 8 – Eingeschränkter Datenzugriff). Ergänzend wurde im Rahmen der Projektplanung das Risiko eines Hardwarewechsels während der Bearbeitungszeit identifiziert. Besonders bei komplexen Entwicklungsumgebungen führt ein solcher Systemwechsel zu erheblichem Mehraufwand, da die Arbeitsumgebung vollständig neu eingerichtet und sämtliche Konfigurationen erneut vorgenommen werden müssen (siehe Anhang B, ID 9 – Mensch). Forschung: Ein wesentliches Risiko im Bereich Forschung betrifft die Rücklaufquote der geplanten Stakeholderbefragung. Bei zu geringer Beteiligung besteht die Gefahr, dass die erhobenen Daten nicht ausreichen, um belastbare oder generalisierbare Aussagen zu ermöglichen. In der Folge könnte die Analyse ein verzerrtes oder unvollständiges Bild der tatsächlichen Bedarfe vermitteln (siehe Anhang B, ID 6 – Stakeholder-Feedback). Unternehmerischer Kontext: Ein weiteres Risiko ergibt sich aus dem neuartigen Charakter der ROS 2-Integration im Kontext von ABB. Da bislang keine unternehmensinternen Referenzprojekte oder etablierten Best Practices vorliegen, fehlen belastbare Erfahrungswerte für Architekturentscheidungen, Schnittstellenstandards und Entwicklungsprozesse. Dies erschwert den Entwicklungsprozess erheblich, da bei konkreten Umsetzungsfragen nur in begrenztem Umfang auf interne Unterstützung oder etablierte Lösungsansätze zurückgegriffen werden kann (siehe Anhang B, ID 3 – Produkt).

4.3.3 Risikobewertung

Nach der Identifikation der Risiken erfolgt deren Bewertung anhand zweier zentraler Bewertungsgrößen: der Eintrittswahrscheinlichkeit (eng. Probability) und des potenziellen Schadensausmaßes (eng. Impact). Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird prozentual erfasst, während das Schadensausmaß anhand einer Skala von 1 (gering) bis 5 (sehr hoch) eingeschätzt wird. Aus dem Produkt dieser beiden Faktoren ergibt sich der sogenannte Risk Exposure Index (z. Dt. Risikoexpositionsindex, REI), der als Maß für die Dringlichkeit weiterer Maßnahmen herangezogen wird [23, Kap. 17.1], [24]. Risiken mit einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit und einem zugleich gravierenden Schadenspotenzial führen zu einem entsprechend hohen REI-Wert und gelten im Rahmen dieser Arbeit als besonders kritisch. In solchen Fällen ist eine frühzeitige und gezielte Risikosteuerung erforderlich. Risiken mit niedrigerem REI sind zwar nicht zu vernachlässigen, erfordern jedoch in der Regel lediglich eine beobachtende oder reaktive Behandlung. Zur Einordnung der ermittelten Werte wird ein dreistufiges Bewertungsschema herangezogen. Dieses unterscheidet zwischen den folgenden Risikostufen: kritisch ($REI \geq 3,0$) mittel ($1,5 \leq REI < 3,0$) gering ($REI < 1,5$)

4.3.4 Risikobehandlung

Wie Abbildung 4.1 verdeutlicht, wird zur besseren Visualisierung der Ergebnisse die Kategorisierung zusätzlich durch ein Farbschema unterstützt, das sich an der etablierten Ampellogik orientiert: Kritische Risiken werden rot, mittlere Risiken gelb und geringe Risiken grün markiert. Diese farbliche Codierung erleichtert die unmittelbare Einordnung des Handlungsbedarfs innerhalb der Risikomatrix.

Abb. 4.1 Exemplarischer Auszug aus der Risikomatrix zur Identifikation, Bewertung und Einordnung projektspezifischer Risiken. Die farbliche Codierung orientiert sich am Ampelsystem: kritisch (rot) bei $REI \geq 3,0$, mittel (gelb) bei $1,5 \leq REI < 3,0$, und gering (grün) bei $REI < 1,5$. (Quelle: Eigene Darstellung, vgl. Anhang B) Auf Grundlage der durchgeführten Bewertung wurden für sämtliche identifizierten Risiken geeignete Maßnahmen entwickelt. Im Fokus der folgenden Ausführungen stehen jedoch jene vier Projektrisiken, deren REI den Schwellenwert von 3,0 überschreitet und die somit als besonders kritisch einzustufen sind. Diese weisen ein erhöhtes Gefährdungspotenzial für den erfolgreichen Verlauf der Bachelorarbeit auf und erfordern eine besonders

sorgfältige Risikosteuerung. Im Folgenden werden die jeweiligen Gegenmaßnahmen für diese vier kritisch bewerteten Projektrisiken dargestellt. Mensch (ID 1 – REI 3,8): Zur präventiven Risikominimierung wird frühzeitig eine transparente Abwesenheitsplanung vorgenommen. Darüber hinaus werden geeignete Vertretungen benannt, die im Falle einer Abwesenheit als Ansprechpersonen einspringen können. Die zentralen Projektergebnisse werden fortlaufend dokumentiert, sodass auch bei kurzfristigen Ausfällen ein gesicherter Informationsstand gewährleistet ist. Abhängigkeit (ID 5 – REI: 4,0): Um die Risiken durch externe Abhängigkeiten zu minimieren, werden erforderliche Freigaben und projektrelevante Informationen frühzeitig bei den zuständigen Stellen angefragt. Gleichzeitig wird ein Eskalationspfad definiert, der es ermöglicht, bei ausbleibenden Rückmeldungen zeitnah alternative Ansprechpersonen einzubinden oder Entscheidungen auf höherer Ebene herbeizuführen. Stakeholderfeedback (ID 6 – REI: 3,6): Zur Erhöhung der Rücklaufquote bei der Stakeholderbefragung werden gezielte Maßnahmen zur Aktivierung der Teilnehmenden umgesetzt. Dazu zählen unter anderem personalisierte Reminder, ein klar kommunizierter Mehrwert der Teilnahme sowie die Nutzung bestehender persönlicher Netzwerke. Sollte trotz dieser Maßnahmen die Beteiligung unter den Erwartungen bleiben, ist ergänzend eine ergänzende Desk-Research-Phase (z. Dt. Schreibtischrecherche bzw. Sekundärforschung) vorgesehen, um zentrale Hypothesen zumindest indirekt abzusichern. Kommunikation (ID 7 – REI: 3,6): Zur Reduzierung kommunikativer Reibungsverluste in einem internationalen Projektumfeld werden sämtliche Projektdokumente sowohl in deutscher als auch englischer Sprache erstellt. Zudem werden regelmäßige, kurze Abstimmungstermine etabliert, um den Informationsfluss zu gewährleisten.

[18] F. Romeike und P. Hager, Erfolgsfaktor Risiko-Management 4.0: Methoden, Beispiele, Checklisten Praxishandbuch für Industrie und Handel. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. doi: 10.1007/978-3-658-29446-5. [19] M. Helmold, Kaizen, Lean Management und Digitalisierung: Mit den japanischen Konzepten Wettbewerbsvorteile für das Unternehmen erzielen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. doi: 10.1007/978-3-658-32342-4. [20] DIN e.V. (Hrsg.), „DIN 69901-5:2009-01, Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe“, Beuth-Verlag, Berlin, Jan. 2009. [21] Asana, „7 häufige Projektrisiken

und wie man sie vermeidet [2025] • Asana“, Asana. Zugegriffen: 29. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://asana.com/de/resources/project-risks> [22] W. Jakoby, Projektmanagement für Ingenieure: Ein praxisnahes Lehrbuch für den systematischen Projekterfolg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. doi: 10.1007/978-3-658-32791-0. [23] H. Kerzner, Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling, Twelfth edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2017. [24] T. Admin, „Project Risk Analysis Formulas Explained“, Teamhub | Projects, Chat and Docs in a single platform. Zugegriffen: 29. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://teamhub.com/blog/project-risk-analysis-formulas-explained/>

5 Technische Analyse

5.1 Leitfähigkeit und Stromtragfähigkeit

5.2 Thermische Belastung und Wärmeverhalten

5.3 Mechanische Belastbarkeit und Kurzschlussfestigkeit

5.4 Kontaktierung und Montageaufwand

5.5 Platzbedarf und Flexibilität im Design

5.6 Mechanische Bearbeitung und Anpassungsfähigkeit

6 Wirtschaftliche Bewertung

6.1 Materialkostenvergleich

6.2 Installations- und Planungsaufwand

6.3 Auswirkungen auf Fertigungsprozesse

6.4 Wirtschaftliche Potenziale und ROI

7 Fallstudie/Beispielanwendung

7.1 Analyse eines konkreten Schaltschrankdesigns

7.2 Vergleich: bestehendes Design vs. optimiertes Design mit flexiblen Schienen

7.3 Bewertung der Ergebnisse

8 Diskussion

8.1 Zusammenfassung der technischen und wirtschaftlichen Vor- und Nachteile

8.2 Grenzen und Herausforderungen beim Einsatz flexibler Kupferschienen

8.3 Optimierungspotenziale und Empfehlungen

9 Fazit und Ausblick

9.1 Beantwortung der Forschungsfrage

9.2 Entscheidungshilfe für den Einsatz flexibler Kupferschienen

9.3 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen oder Forschung

1. Einleitung

- Motivation und Relevanz des Themas
- Zielsetzung der Arbeit
- Aufbau der Arbeit

2. Grundlagen

- Einführung in den Schaltschrankbau
- Aufbau und Funktion von Kupferschienen
- Unterschied zwischen starren und flexiblen Kupferschienen
- Normative Anforderungen (z. B. DIN, IEC)

3. Stand der Technik

- Aktuelle Verbindungstechniken im Schaltschrankbau
- Einsatzbereiche flexibler Kupferschienen
- Bisherige Forschung und industrielle Anwendungen

4. Methodik

- Vorgehensweise zur Analyse (z. B. Vergleichsmatrix, Simulation, Messungen)
- Verwendete Softwaretools (CREO, Inventor, E-Plan)
- Kriterienkatalog für die Bewertung (z. B. Stromtragfähigkeit, thermisches Verhalten, Wirtschaftlichkeit)

5. Technische Analyse

- Leitfähigkeit und Stromtragfähigkeit
- Thermische Belastung und Wärmeverhalten
- Mechanische Belastbarkeit und Kurzschlussfestigkeit
- Kontaktierung und Montageaufwand
- Platzbedarf und Flexibilität im Design

6. Wirtschaftliche Bewertung

- Materialkostenvergleich
- Installations- und Planungsaufwand
- Auswirkungen auf Fertigungsprozesse
- Wirtschaftliche Potenziale und ROI

7. Fallstudie / Beispielanwendung

- Analyse eines konkreten Schaltschrankdesigns (z. B. DCS880-A)
- Vergleich: bestehendes Design vs. optimiertes Design mit flexiblen Schienen
- Bewertung der Ergebnisse

8. Diskussion

- Zusammenfassung der technischen und wirtschaftlichen Vor- und Nachteile
- Grenzen und Herausforderungen beim Einsatz flexibler Kupferschienen
- Optimierungspotenziale und Empfehlungen

9. Fazit und Ausblick

- Beantwortung der Forschungsfrage
- Entscheidungshilfe für den Einsatz flexibler Kupferschienen
- Ausblick auf zukünftige Entwicklungen oder Forschung

10. Anhang

- Zeichnungen, Tabellen, Messprotokolle
- Normen und Richtlinien
- Literaturverzeichnis

Literatur

[1] L. Weyland, „Eigene Darstellung“.

b

C