

# Integrationskomplexitätsindex als ein strukturierter Ansatz zur quantitativen Bewertung von Integrationsrisiken

## *Integration complexity index as a structured approach for the quantitative assessment of integration risks*

Chris-Kilian Müller<sup>1,2\*</sup>, David Inkermann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IAV GmbH, Carnotstr.1, 10587 Berlin

<sup>2</sup> Technische Universität Clausthal, Institut für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Integrierte Produktentwicklung

\* Korrespondierender Autor:

Chris-Kilian Müller  
IAV GmbH  
Rockwellstraße 12  
38518 Gifhorn  
☎ 0172/1537703  
✉ [chris-kilian.mueller@iav.de](mailto:chris-kilian.mueller@iav.de)

---

### Abstract

Integration of complex mechatronic systems is challenged by architectural heterogeneity, interdependencies, and emergent behaviors. This paper investigates architectural drivers of integration errors and effort and introduces the Integration Complexity Index (ICI) as a quantitative metric to assess them. Based on a literature review and documented integration failures, recurrent problems were identified, grouped into eight thematic clusters, and mapped to four complexity dimensions: structural, topological, integrative, and functional. The ICI aggregates these dimensions additively, reflecting the number, arrangement, coordination, and behavior of system components without overemphasizing extreme values. The index was applied to a SysML model of a pedelec energy system integrating energy recovery. Results demonstrate that higher ICI values correspond to higher integration difficulty, enabling transparent assessment and prioritization of architectural alternatives. Future work should validate the ICI across diverse contexts, refine dimension weights, and explore its use for planning and optimizing integration strategies.

---

### Keywords

*System Integration, Integration Risk, Integration Complexity Index, Architectural Drivers, Mechatronic Systems*

---

---

## 1. Einleitung und Motivation

Die Systemintegration stellt eine der kritischsten und gleichzeitig häufig vernachlässigten Phasen der Produktentwicklung dar [1]. Sie bezeichnet den Prozess, Systemelemente zu einem kohärenten Gesamtsystem zusammenzuführen, welche die spezifizierten Anforderungen erfüllt und umfasst technische, organisatorische sowie funktionale Aspekte mit jeweils spezifischen Herausforderungen [1-3]. Die Integration erfolgt typischerweise iterativ und umfasst die Komponenten- bis hin zur System-of-Systems-Ebene. Bei der Integration parallel entwickelter Systeme treten häufig unerwartete Fehler auf, die in der isolierten Entwicklung nicht sichtbar waren [2], [4-6]. Diese resultieren zumeist aus unzureichend berücksichtigten strukturellen, funktionalen und organisatorischen Abhängigkeiten und führen zu kosten- sowie zeitintensiven Anpassungen [5-6]. Der steigende Funktionsumfang moderner Produkte mit, zunehmender Vernetzung und neuen Technologien wie Elektromobilität, automatisiertes Fahren und softwarezentrierte Architekturen verstärkt die Integrationsanforderungen und -risiken [7-8]. Bestehende Methoden wie IFMEA [7] oder Schnittstellenanalysen [9] setzen meist spät an und betrachten Aspekte wie Fehlermodi oder Schnittstellen isoliert, ohne strukturelle, funktionale und topologische Faktoren zu berücksichtigen. Es fehlt ein mehrdimensionaler quantitativer Ansatz, der architekturelle Treiber systematisch erfasst und bereits in frühen Entwicklungsphasen eine Bewertung der Integrationsrisiken und -aufwände ermöglicht. Vor diesem Hintergrund ist ein mehrdimensionaler quantitativer Ansatz erforderlich, der relevante architekturelle Treiber von Integrationsrisiken und -aufwänden systematisch erfasst und bereits in frühen Entwicklungsphasen eine fundierte Bewertung ermöglicht. Der vorliegende Beitrag schlägt den Integrationskomplexitätsindex (IKI) als solche Bewertungsgröße vor. Der IKI nutzt vorhandene Entwicklungsartefakte wie Architekturmodelle und Schnittstellenbeschreibungen, um strukturelle Merkmale wie Elemente und Heterogenität, topologische Muster und Rückkopplungen und Schnittstellen sowie funktionale Zustände und Abläufe der Architektur zu erfassen.

## 2. Darstellung des Forschungsansatzes

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines fundierten Bewertungsansatzes, der es ermöglicht, die architekturelle Komplexität von Systemen als Treiber von Integrationsrisiken und -aufwänden transparent zu machen und in frühen Entwicklungsphasen vergleichbar zu bewerten. Hierzu wird folgende Forschungsfrage fokussiert:

**„Was sind die architekturellen Treiber des Integrationsrisikos und -umfangs, und wie lassen sich diese systematisch quantifizieren?“**

Zur Beantwortung dieser Frage wurde ein dreistufiges Vorgehen entwickelt: Zunächst werden relevante Treiber durch eine Linetarturanalyse und dokumentierte Integrationsfehlschläge identifiziert, mit Fokus auf empirisch oder theoretisch belegte architekturelle Merkmale. Architekturelle Merkmale sind beschreibbare Eigenschaften eines Systems, die seine Struktur, Organisation und Interaktion prägen und damit die Komplexität, das Verhalten und die Integrationsfähigkeit maßgeblich beeinflussen. Anschließend werden die Treiber thematisch gruppiert und in acht Cluster überführt, die als abgegrenzte Einflussbereiche die Komplexitätsdimensionen der Architektur strukturieren. Schließlich werden die Cluster in messbare Größen überführt und zum Integrationskomplexitätsindex (IKI) aggregiert. Grundlage der Bewertung sind vorhandene Entwicklungsartefakte wie Architektur- und Schnittstellenmodelle.

### 3. Stand der Technik

Dieses Kapitel definiert Integrationsrisiko sowie -aufwand, beschreibt Verfahren zur Planung und Bewertung der Systemintegration stellt auch ergänzend Ansätze zur Komplexitätsanalyse vor. Integrationsrisiko bezeichnet die Unsicherheit über das erfolgreiche Zusammenwirken der Systemelemente, etwa bei nicht spezifikationskonformen Schnittstellen oder unerwarteten Wechselwirkungen [9-10]. Es entsteht häufig durch mangelhafte Modellierung, unklare Anforderungen oder nicht antizipierte Interdependenzen und lässt sich nach Mueller in Schnittstellenprobleme, Performanceabweichungen, Emergenzverhalten und organisatorische Inkonsistenzen differenzieren [6]. Der Integrationsaufwand beschreibt den Aufwand für die Integration, einschließlich technischer und organisatorischer Faktoren, und ist in frühen Entwicklungsphasen schwer abschätzbar, da er stark von Architektur, Komplexität und Änderungsdynamik abhängt [11] [15]. Systemkomplexität ist ein zentraler Treiber für Integrationsrisiko und -umfang. Je komplexer die Architektur ist, etwa durch stark vernetzte Subsysteme oder geringe Modularität, desto höher sind Integrationsrisiko als auch -umfang. Komplexität bestimmt die potenziellen Wechselwirkungen, Risiko beschreibt die Unsicherheit ihres Funktionierens und Umfang den Aufwand, diese zu beherrschen.

#### 3.1. Verfahren zur Planung und Bewertung von Systemintegration

Die systematische Planung und Bewertung der Integration ist notwendig, um Risiken frühzeitig zu erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen abzuleiten [1], [16-17]. In der Literatur werden hierzu zwei methodische Ansätze unterschieden: heuristische und analytisch-strukturelle Verfahren. Heuristische Ansätze wie Checklisten, Leitfäden oder Lessons Learned basieren auf Erfahrung und typischen Fehlerbildern [1] [12-13]. Beispiele sind Fragenkataloge oder die IFMEA, die die bekannte FMEA-Methode auf Integrationsszenarien überträgt [7]. Sie sind praxisnah, einfach anwendbar und liefern schnelle qualitative Einschätzungen, sind jedoch stark von subjektiven Erfahrungen abhängig. Analytisch-strukturelle Ansätze ermöglichen eine systematische und nachvollziehbare Bewertung auf Basis formaler Methoden und messbarer Kriterien. Das N<sup>2</sup>-Diagramm visualisiert Schnittstellenabhängigkeiten und identifiziert kritische Kopplungen [13]. Die Integration Readiness Levels (IRL) und Integration Maturity Metrics (IMM) übertragen das Reifegradkonzept des Technology Readiness Levels auf Integrationsfragestellungen und liefern systematische Skalen [14-15]. Hybride Ansätze wie SITRAM kombinieren Bayes'sche Netze mit Risiko-Taxonomien, um qualitative und quantitative Informationen zu verbinden und so Entscheidungen in frühen Phasen zu unterstützen [16-17].

#### 3.2. Verfahren zur Komplexitätsbewertung

Komplexität ist ein zentraler Treiber von Integrationsrisiken technischer Systeme. Sie umfasst strukturelle Eigenschaften eines Systems und die Interdependenzen der Komponenten beeinflusst aber maßgeblich die Vorhersagbarkeit und Beherrschbarkeit des Systemverhaltens [18], [19]. Eine frühzeitige Quantifizierung der Komplexität ist hilfreich, um Schwächen in der Architektur zu identifizieren und Integrationsaufwand sowie -risiken abzuschätzen [18], [20], [21]. Strukturelle Verfahren bewerten die Komplexität anhand der Systemarchitektur, ihrer Elemente und deren Abhängigkeiten. Die strukturelle Komplexität beschreibt Größe, Heterogenität und direkte Abhängigkeiten der Systemelemente. Ein etablierter Ansatz ist die Design Structure Matrix (DSM), die diese Interaktionen in einer kompakten, quadratischen Matrix darstellt [8], [19], [22]. Sinha et al. erweitern die DSM um Designrestriktionen wie technische Machbarkeit oder physikalische Grenzen, um zweckmäßigere Modularisierungen zu erzielen. Darauf aufbauend definieren Sinha und de Weck [18], [23] eine Structural Complexity Metric mit drei Dimensionen: Komplexität

---

einzelner Komponenten, paarweiser Interaktionen und deren topologischer Verteilung in der Architektur. Die topologische Komplexität beschreibt dabei die Anordnung der Elemente, insb. Rückkopplungsschleifen, zentrale Knoten und die Vernetzung der Module. Ein weiteres Konzept ist die Integrative Complexity, definiert als Differenz zwischen der Gesamtkomplexität des Systems und der Summe der Komplexitäten seiner isolierten Module. Diese quantifiziert den Mehraufwand, welcher ausschließlich durch Interaktionen der Module bei der Integration entsteht und verdeutlicht so zusätzliche Komplexität der Integration [24], [25].

Aufbauend auf diesen Verfahren zur Komplexitätsanalyse richtet Kapitel 4 den Fokus auf die systematische Identifikation und Kategorisierung architektureller Treiber, die maßgeblich Integrationsrisiken und -aufwände beeinflussen.

## **4. Architekturelle Integrationstreiber**

Die Architektur eines Systems bestimmt maßgeblich die Komplexität und Fehleranfälligkeit des Integrationsprozesses [2], [13]. Ziel dieses Kapitels ist es, auf Basis einer Literaturanalyse typische Treiber für Integrationsrisiken und -aufwand zu identifizieren und deren Ursachen herauszuarbeiten. Dazu werden dokumentierte Integrationsprobleme hinsichtlich ihrer architektonischen Ursachen bewertet und in thematische Cluster überführt. Diese Cluster bilden die Grundlage für die Bestimmung eines Integrationskomplexitätsindex.

### **4.1. Treiber für Integrationsrisiken**

Die erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass Integrationsrisiken insbesondere dort entstehen, wo architektonische Schwächen die Beherrschbarkeit des Gesamtsystems unter realen Betriebsbedingungen einschränken. Diese Risiken lassen sich nicht auf isolierte Fehlerursachen reduzieren, sondern resultieren aus komplexen Zusammenhängen zwischen Architekturmustern, Abhängigkeiten und fehlender Fehlertoleranz. In Tabelle 1 dargestellten Treiber verdeutlichen, dass unerwartete Wechselwirkungen wie emergente Effekte, Rückkopplungen und Timing-Probleme das Systemverhalten schwer vorhersagbar machen und zu Fehlfunktionen führen können. Zudem erhöhen Komplexität, etwa durch heterogene Technologien, tief verschachtelte Hierarchien oder unzureichend standardisierte Schnittstellen, den Integrationsaufwand erheblich, selbst ohne direkte Fehler. Schließlich wird sichtbar, dass Merkmale wie hohe Kopplung, unklare Schnittstellen, fehlende Modularisierung oder mangelnde Verantwortlichkeiten sowohl Risiko als auch Aufwand steigern, da sie Diagnose und Koordination erschweren. Analyse der dokumentierten Integrationsprobleme in Tabelle 1 zeigt, dass diese aus dem Zusammenwirken struktureller, topologischer und organisatorischer Schwächen entstehen, etwa durch Rückkopplungen und Timing-Probleme, heterogene Technologien, unklare Schnittstellen sowie fehlende Verantwortlichkeiten, die die Robustheit der Architektur unter Belastung erheblich beeinträchtigen. In Abschnitt 4.2 werden diese thematisch zu Clustern zusammengefasst, um Redundanzen zu reduzieren.

Tabelle 1: Treiber auf das Integrationsrisiko und -aufwand

| Treiber                                                   | Beschreibung und Beispiel                                                                                                                                  | Wirkung          | Literatur       |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| Unerwartete emergente Effekte                             | Rückkopplungen und komplexe Interaktionen machen das Verhalten unvorhersehbar, z. B. widersprüchliche Brems- und Lenksignale bei Notbremse und Spurhalten. | Risiko           | [3], [8], [13], |
| Engpässe in der Architektur                               | Zentralisierte Ressourcen verursachen unter Lastengpässe, z. B. Überlastung des CAN-Bus.                                                                   | Risiko & Aufwand | [5], [6], [8],  |
| Fehlende Testbarkeit komplexer Abhängigkeiten             | Starke Abhängigkeiten erschweren Tests und Fehlerlokalisierung, z. B. Steuergeräte nur im Gesamtsystem testbar.                                            | Risiko           | [26], [27]      |
| Fehlende Fallback-Strategien                              | Fehlende Notmodi führen zu unsicherem Verhalten, z. B. kein Notbetrieb bei Sensorsignalausfall.                                                            | Risiko           | [2]             |
| Timing- und Synchronisationsprobleme                      | Zeitkritische Abhängigkeiten unzureichend berücksichtigt, z. B. verzögerte Bremsauslösung.                                                                 | Risiko           | [6]             |
| Nicht deterministische Abläufe                            | Asynchrone oder konkurrierende Prozesse erzeugen unvorhersehbares Verhalten, z. B. konkurrierende Befehle.                                                 | Risiko           | [4]             |
| Tiefe von Abhängigkeitsketten                             | Lange Signalketten erschweren Fehlerlokalisierung und erhöhen Risiken, z. B. über mehrere Steuergeräte.                                                    | Risiko           | [23]            |
| Heterogene Technologien und Standards                     | Unterschiedliche Plattformen und Standards erhöhen Abstimmungsaufwand, z. B. inkompatible Bussysteme.                                                      | Aufwand          | [22]            |
| Große Anzahl von Komponenten und Schnittstellen           | Viele Elemente müssen integriert werden, z. B. Sensoren, Kameras, Steuergeräte.                                                                            | Aufwand          | [2], [6]        |
| Unzureichende Standardisierung von Schnittstellen         | Fehlende Normierung erfordert individuelle Anpassungen, z. B. jede Schnittstelle unterschiedlich spezifiziert.                                             | Aufwand          | [2], [6]        |
| Komplexe Hierarchien                                      | Tief verschachtelte Steuergeräteebenen erschweren Integration und Tests.                                                                                   | Aufwand          | [18]            |
| Unklare oder instabile Schnittstellen                     | Instabile oder schlecht definierte Schnittstellen erhöhen Fehler und Aufwand, z. B. unvollständige Spezifikationen.                                        | Risiko & Aufwand | [1], [2], [26]  |
| Hohe Kopplung zwischen Komponenten                        | Änderungen wirken weitreichend und schwer vorhersagbar, z. B. Bremssteuergerät beeinflusst Fahrerassistenz.                                                | Risiko & Aufwand | [8], [18], [28] |
| Fehlende Integrationspunkte für inkrementelle Integration | Zwingt zu Big-Bang-Integration, da keine schrittweise Integration möglich ist.                                                                             | Risiko & Aufwand | [2], [13], [26] |
| Fehlende Modularisierung der Fehlerdomänen                | Fehler breiten sich über mehrere Subsysteme aus, z. B. Geschwindigkeit wirkt auf Abstandswarnung und Spurhaltung.                                          | Risiko & Aufwand | [1], [4], [18]  |
| Hohe Variabilität / Variantenvielfalt                     | Viele Produktvarianten erhöhen Komplexität, Testaufwand und Risiko.                                                                                        | Risiko & Aufwand | [3], [29]       |
| Unklare Verantwortung für Funktionen                      | Verteilte Funktionen ohne klare Zuordnung erschweren Integration, z. B. mehrere Teams bearbeiten Kollisionswarnung.                                        | Risiko & Aufwand | [1], [4], [26]  |

## 4.2. Systematische Gruppierung architektureller Treiber

Die in Abschnitt 4.2 identifizierten Treiber wurden mittels qualitativer Inhaltsanalyse in 8 Cluster zusammengeführt. Treiber mit ähnlichen Ursachen und gleicher Wirkung auf Integrationsrisiko oder -aufwand, wie „Single Points of Failure“ und „fehlende Fallback-Strategien“ als Ausdruck mangelnder Fehlertoleranz, wurden zusammengefasst. Darüber hinaus wurden Treiber zusammengefasst, die im gleichen Systemkontext wirksam sind und ähnliche Folgen für die Integration haben, auch wenn ihre direkten Ursachen unterschiedlich sind. Tabelle 2 zeigt die gebildeten Cluster mit den jeweils zugeordneten Treibern, ihrer hauptsächlichen Wirkung sowie einer kurzen Erläuterung. In Kapitel 5 wird darauf aufbauend erläutert, wie diese Cluster und in den Integrationskomplexitätsindex (IKI) überführt werden.

Tabelle 2: Cluster mit zugeordneten Treibern, Auswirkungen und Erläuterungen

| Cluster                               | Beschreibung und Einordnung der Treiber                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Emergenz & Rückkopplung               | Unerwartete emergente Effekte, nicht deterministische Abläufe und Timing-Probleme führen zu nicht-linearen Interaktionen und Zyklen, die Verhalten unvorhersehbar und Systeme fehleranfällig machen. |
| Redundanz & Fehlertoleranz            | Single Points of Failure und fehlende Fehlertoleranzpfade verursachen Ausfälle einzelner Komponenten.                                                                                                |
| Architektonische Bottlenecks          | Überlastete zentrale Ressourcen, tiefe Abhängigkeitsketten und komplexe Hierarchien führen zu Leistungs- und Stabilitätsproblemen.                                                                   |
| Heterogenität & Komplexität           | Unterschiedliche Technologien, Variantenvielfalt und individuelle Anpassungen erhöhen Integrationsaufwand und Abstimmungsbedarf.                                                                     |
| Inkrementelle Integrations-fähigkeit  | Fehlende Integrationspunkte und unzureichende Standardisierung zwingen zu risikoreichen Big-Bang-Integrationen.                                                                                      |
| Schnittstellen-komplexität            | Fehlende Integrationspunkte und unzureichende Standardisierung zwingen zu risikoreichen Big-Bang-Integrationen.                                                                                      |
| Modularität & Kopplung                | Enge Abhängigkeiten, fehlende Modularisierung und unklare Verantwortlichkeiten erschweren Integration und erhöhen Fehleranfälligkeit.                                                                |
| Intransparenz von Black-Box-Elementen | Nutzung von COTS oder undokumentierten Komponenten behindert Verständnis und Testbarkeit.                                                                                                            |

## 5. Konzept des Integrationskomplexitätsindex

Die im vorherigen Kapitel gebildeten Cluster werden als Integrationskomplexitätsindex (IKI) zusammengeführt, um Integrationsrisiko und -aufwand quantitativ zu bewerten. Der IKI erfasst sowohl die Wahrscheinlichkeit von Integrationsrisiken als auch den erforderlichen Integrationsaufwand und stützt sich auf verfügbare Entwicklungsartefakte wie Architekturmodelle, Schnittstellenbeschreibungen oder Verhaltensmodelle [1]. Die Cluster werden dabei den vier Komplexitätsdimensionen strukturell, topologisch, integrativ und funktional zugeordnet. Diese Einordnung folgt den Arbeiten von Sinha et al. und dient der differenzierten Analyse und gezielten Bewertung der Ursachen von Integrationsaufwand und -risiko [18], [25]. Die Differenzierung ermöglicht es, konkrete Ursachen für Aufwand und Risiko zu lokalisieren. So kann ein System mit vielen heterogenen Komponenten und hoher struktureller Komplexität bspw. gut integrierbar sein, wenn klar definierte und standardisierte Schnittstellen eine niedrige integrative Komplexität gewährleisten. Umgekehrt kann eine geringe Anzahl von Komponenten aufgrund ungünstiger Topologie mit langen Abhängigkeitsketten und zentralisierten Knoten eine hohe topologische Komplexität aufweisen und erhebliche Integrationsrisiken erzeugen. Ergänzend wird die funktionale Komplexität betrachtet, die sich aus Verhaltensmodellen ableitet. Sie beschreibt die Vielfalt und Dynamik von Zustandsübergängen, Kontrollflüssen und Synchronisationen und verdeutlicht die



Komplexität der internen Logik und des Systemverhaltens. Die Zuordnung der Cluster zu den Komplexitätsdimensionen basiert auf einer inhaltlichen Analyse, wie sie in der Literatur beschrieben und in dokumentierten Integrationsfehlschlägen beobachtet wurde. So trägt die „Schnittstellenkomplexität“ sowohl zur integrativen Komplexität bei, weil sie viele und schwer koordinierbare Abhängigkeiten schafft, als auch zur funktionalen Komplexität, da sie zusätzliche Synchronisations- und Ablaufprobleme verursacht.

### 5.1. Herleitung und Nutzen der Berechnung des IKI

Der IKI ist ein quantitatives Maß für die architekturelle Komplexität eines Systems und soll Integrationsrisiken und -aufwände bereits in frühen Entwicklungsphasen sichtbar machen. Der IKI berücksichtigt vier Dimensionen der Komplexität: strukturell, topologisch, integrativ und funktional. Jede Dimension wird anhand von einfach zählbaren Indizes bestimmt, welche direkt aus Entwicklungsartefakten abgelesen werden können. In Tabelle 3 sind die Zuordnung der Indikatorencluster zu den vier Komplexitätsdimensionen sowie die zugehörigen Berechnungsformeln zur Bestimmung der Basiswerte dargestellt. Bei der Entwicklung der Indizes wurde darauf geachtet, dass sie unmittelbar aus den vorhandenen Entwicklungsartefakten abgeleitet werden können.

Tabelle 3: Darstellung der Dimensionen

| Dimension   | Indizes                                                                                                                                                                                                                            | Zugeordnete Cluster                                                             | Formel     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Strukturell | Komponenten (C) — Anzahl der in der Architektur ausgewiesenen physischen oder logischen Elemente;<br>Hierarchie (H) — maximale Tiefe der Verschachtelung;<br>Technologien (T) — Anzahl unterschiedlicher eingesetzter Technologien | Heterogenität & Komplexität, Modularität & Kopplung, Redundanz & Fehlertoleranz | $SC=C+H+T$ |
| Topologisch | Schleifen (L) — Anzahl geschlossener Rückkopplungsschleifen in DSM oder Graph;<br>Zentrale (Z) — Anzahl der direkten Verbindungen eines Konoten                                                                                    | Emergenz & Rückkopplung, Architektonische Bottlenecks                           | $TC=L+Z$   |
| Integrativ  | Schnittstellen (S) — Anzahl der Verbindungen zwischen Subsystemen                                                                                                                                                                  | Schnittstellenkomplexität                                                       | $IC=S$     |
| Funktional  | Zustände (Q) — Anzahl definierter Zustände in Zustandsdiagrammen; Übergänge (U) — Anzahl der definierten Übergänge zwischen Zuständen                                                                                              | Emergenz & Rückkopplung, Schnittstellenkomplexität, Modularität & Kopplung      | $FC=Q+U$   |

Für jede Dimension wird ein Basiswert gebildet, indem die zugehörigen Indizes addiert werden. Die so gebildete Indexsumme wird ohne weitere Umrechnung direkt als dimensionsspezifischer Skalenwert im Bereich von 0 bis 100 Punkten verwendet. Jede zusätzliche Indexausprägung erhöht unmittelbar den Skalenwert der jeweiligen Dimension und stärkt so deren Einfluss auf den Gesamtwert. Dieses Vorgehen folgt einem durchgängig linearen und nachvollziehbaren Bewertungsprinzip, bei dem jede zusätzliche Indexausprägung proportional zur Bewertung beiträgt. Die Einfachheit der Methodik gewährleistet eine einfache Anwendbarkeit in frühen Entwicklungsphasen und bildet gleichzeitig eine strukturierte Grundlage, die sich bei Bedarf systematisch um differenziertere Bewertungsansätze oder domänenspezifische Erweiterungen ergänzen lässt. Der Gesamtwert des Integrationskomplexitätsindex ergibt sich als arithmetisches Mittel der vier Dimensionswerte nach der Formel:

$$IKI = \frac{SC + TC + IC + FC}{4}$$

Da alle vier Werte direkt aus zählbaren Indizes stammen und im Bereich von 0 bis 100 liegen, ist der resultierende Gesamtwert unmittelbar interpretierbar. Zur weiteren Vereinfachung und kommunikativen Unterstützung wird der Gesamtwert einer fünfstufigen Bewertungsskala zugeordnet:

- 0–20 Punkte: sehr niedrige Komplexität
- 21–40 Punkte: niedrige Komplexität
- 41–60 Punkte: mittlere Komplexität
- 61–80 Punkte: hohe Komplexität
- 81–100 Punkte: sehr hohe Komplexität

Das Bewertungsverfahren des IKI erfolgt auf einem klar strukturierten Ablauf. Ausgangspunkt ist die Analyse relevanter Entwicklungsartefakte, wie etwa Systemarchitekturen, Schnittstellenübersichten oder Zustandsdiagramme. Aus diesen Artefakten werden die in Tabelle 3 definierten Indizes je Komplexitätsdimension direkt abgelesen und anschließend zu einer dimensionsspezifischen Indexsumme aggregiert. Diese Summe wird ohne weitere Umrechnung als Skalenwert im Bereich von 0 bis 100 Punkten übernommen. Der Gesamtwert des IKI ergibt sich schließlich als arithmetisches Mittel der vier Skalenwerte. Dieses lineare Vorgehen ermöglicht eine besonders einfach umsetzbare Bewertungssystematik. Gleichzeitig bildet es eine belastbare Grundlage, die bei Bedarf systematisch um differenziertere Bewertungsansätze, wie etwa Schwellenwerte, Gewichtungen oder vergleichende Referenzmodelle, erweitert werden kann.

## 6. Anwendung des IKI auf ein Beispielsystem

Das Energy System des Pedelecs dient als Beispiel für die Anwendung des IKI. Es umfasst eine Lithium-Ionen-Batterie mit Batteriemanagement, Leistungselektronik zur Energieverteilung und ein Wärmemanagement zur Temperaturregelung. Das System versorgt Drive, Control, Sensorik und User Interface mit Energie, empfängt Steuerbefehle vom Control System und ist über einen bidirektionalen Energiefluss mit dem Drive System gekoppelt. Auf Basis der gezählten Indizes und der projektspezifischen Maximalwerte ergeben sich für das Energiesystem die in Tabelle 4 dargestellten normierten Werte und deren Einordnung in die Skala.

Tabelle 4: Darstellung der Berechnung in den Dimensionen.

| Dimension   | Indizes                                                                                                                                                           | Basiswert | Interpretation |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------|
| Strukturell | 3 Komponenten (Batterie, Elektronik, Kühlung), Hierarchietiefe 2 (Energiesystem → Subsysteme), 3 Technologien (elektrochemisch, leistungselektronisch, thermisch) | 8         | Niedrig        |
| Topologisch | 1 Rückkopplung mit Antriebssystem, 1 zentraler Knoten mit hoher Degree Centrality                                                                                 | 2         | Sehr niedrig   |
| Integrativ  | 5 Schnittstellen zu Antrieb, Steuerung, Sensorik, Benutzerinterface, Rahmensystem                                                                                 | 5         | Sehr niedrig   |
| Funktional  | 3 Zustände (Laden, Entladen, Balancieren), 4 Übergänge zwischen Zuständen                                                                                         | 7         | Niedrig        |



---

Der Gesamtwert des Integrationskomplexitätsindex ergibt sich als arithmetisches Mittel der vier Dimensionswerte:

$$IKI = \frac{8 + 2 + 5 + 7}{4} = 5,5$$

Gemäß der Bewertungsskala entspricht dies einer sehr niedrigen Integrationskomplexität. In der beispielhaften Ausprägung dominiert keine einzelne Dimension, alle Werte liegen im unteren Bereich. Die Ergebnisse zeigen somit ein geringes Integrationsrisiko und -aufwand für das betrachtete System.

## 7. Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die Forschungsfrage durch die systematische Herleitung und Quantifizierung architektureller Treiber beantwortet werden konnte. Wiederkehrende Problemstellungen aus der Literatur wurden zu konsistenten Clustern verdichtet, den vier Komplexitätsdimensionen zugeordnet und im IKI methodisch zusammengeführt. Dadurch wird eine quantitative Bewertung von Integrationsrisiken und -aufwänden auf Basis verfügbarer Entwicklungsartefakte ermöglicht. Die Anwendung auf das Pedelec-Energiesystem belegt die prinzipielle Anwendbarkeit des Ansatzes, weist jedoch Einschränkungen aufgrund unvollständiger Systeminformationen auf. Der IKI bildet die maßgeblichen Komplexitätstreiber transparent ab und spiegelt den erwartbaren Integrationsaufwand plausibel wider. In der untersuchten Architektur dominierten strukturelle und integrative Komplexitätstreiber, was mit Erkenntnissen aus der Literatur konsistent ist. Die zugrunde liegende Annahme, dass höhere IKI-Werte mit erhöhtem Integrationsaufwand und -risiko korrelieren, erscheint plausibel, muss jedoch empirisch validiert werden, beispielsweise durch den Vergleich mit realen Integrationsverläufen, Fehlerraten oder nachträglich dokumentierten Aufwänden.

Neben der Bewertung ermöglicht der IKI eine risikoorientierte Integrationsplanung, indem Systeme mit hohen Komplexitätswerten frühzeitig identifiziert und gezielt adressiert werden können. Im Vergleich zu etablierten Verfahren wie der Integration FMEA oder der Design Structure Matrix bietet der IKI eine stärker strukturierte, numerische Bewertung, die bereits in frühen Entwicklungsphasen auf Basis modellierter Artefakte durchführbar ist. Der IKI lässt sich insbesondere in modellbasierten Entwicklungskontexten (MBSE) einsetzen, etwa zur frühzeitigen Risikobewertung in Architektur-Reviews oder zur Entscheidungsunterstützung in der Systemauslegung.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich zunächst auf die empirische Validierung des IKI konzentrieren, etwa durch die Anwendung auf reale Systementwicklungen und den Abgleich mit dokumentierten Integrationsaufwänden, Fehlerraten oder Risikoverläufen. Ebenso ist eine methodische Erweiterung um Mechanismen zur Informationsvervollständigung erforderlich, um fehlende oder unvollständige Entwicklungsartefakte systematisch zu kompensieren und die Anwendbarkeit in frühen Entwicklungsphasen zu verbessern. Darüber hinaus bedarf die Gewichtung der vier Komplexitätsdimensionen einer vertieften Analyse, um deren relativen Einfluss domänenspezifisch zu justieren und die Aussagekraft des Index zu erhöhen. Schließlich sollte geprüft werden, inwieweit sich der IKI in bestehende modellbasierte Toolchains integrieren lässt, um eine automatisierte Bewertung direkt aus Systemmodellen heraus zu ermöglichen.

## Literatur

- [1] INCOSE, *INCOSE Systems Engineering Handbook*, Bd. 5th. John Wiley & Sons, 2023.
- [2] J. O. Grady, *System Integration*. Boca Raton: CRC Press, 2020. doi: 10.1201/9781003068815.
- [3] G. Muller, „Coping With System Integration Challenges in Large Complex Environments“, *INCOSE Int. Symp.*, Bd. 17, Nr. 1, S. 1026–1040, 2007, doi: 10.1002/j.2334-5837.2007.tb02930.x.
- [4] A. M. Madni und M. Sievers, „Systems Integration: Key Perspectives, Experiences, and Challenges“, *Syst. Eng.*, Bd. 17, Nr. 1, S. 37–51, 2014, doi: 10.1002/sys.21249.
- [5] Selma Saidi et. al., „Special Session: Future Automotive Systems Design: Research Challenges and Opportunities“, in *2018 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS)*, Sep. 2018, S. 1–7. doi: 10.1109/CODESISSS.2018.8525873.
- [6] F. Sagstetter u. a., „Schedule integration framework for time-triggered automotive architectures“, in *2014 51st ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC)*, Juni 2014, S. 1–6. doi: 10.1145/2593069.2593211.
- [7] Stefan Punz et al., „IFMEA – INTEGRATION FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS“, *68-9 Proc. 18th Int. Conf. Eng. Des. ICED 11 Impacting Soc. Eng. Des. Vol 9 Des. Methods Tools Pt 1 LyngbyCopenhagen Den. 15-19082011*, S. 122–131, 2011.
- [8] T. U. Pimmler und S. D. Eppinger, „Integration Analysis of Product Decompositions“, gehalten auf der ASME 1994 Design Technical Conferences collocated with the ASME 1994 International Computers in Engineering Conference and Exhibition and the ASME 1994 8th Annual Database Symposium, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Sep. 1994, S. 343–351. doi: 10.1115/DETC1994-0034.
- [9] D. Tramondanis, „Integration Risk Analysis in an MBSE Environment“.
- [10] A. P. Sage und C. L. Lynch, „Systems integration and architecting: An overview of principles, practices, and perspectives“, *Syst. Eng.*, Bd. 1, Nr. 3, S. 176–227, 1998, doi: 10.1002/(SICI)1520-6858(1998)1:3<176::AID-SYS3>3.0.CO;2-L.
- [11] *VDI/VDE 2206 - Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. 2021. Zugriffen: 9. Juli 2025.
- [12] S. A. Hyer, „An Effective Approach to System Integration: A Comprehensive Checklist“, *INCOSE Int. Symp.*, Bd. 7, Nr. 1, S. 371–379, 1997, doi: 10.1002/j.2334-5837.1997.tb02195.x.
- [13] National Aeronautics and Space Administration, *NASA Systems Engineering Handbook*. S.I.: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014.
- [14] B. Sauser, et al., „Integration maturity metrics: Development of an integration readiness level“, *Inf Knowl Syst Manag*, Bd. 9, Nr. 1, S. 17–46, Jan. 2010.
- [15] B. J. Sauser, et al., „Defining an Integration Readiness Level for Defense Acquisition“, *INCOSE Int. Symp.*, Bd. 19, Nr. 1, S. 352–367, Juli 2009, doi: 10.1002/j.2334-5837.2009.tb00953.x.
- [16] I. Loutchkina, et al., „Systems’ Integration Technical Risks’ Assessment Model (SITRAM)“, *IEEE Trans. ...*, 2013,
- [17] I. Loutchkina, et al. „The systems integration technical risk assessment fusing of Bayesian Belief Networks and parametric models“, 2013, doi: 10.3233/IFS-2012-0553.
- [18] Kaushik Sinha und Olivier Ladislav de Weck, „Structural complexity metric for engineered complex systems and its application“, in *Gain competitive advantage by managing complexity*, 2012, S. 181–192.
- [19] T. R. Browning, „Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions“, *IEEE Trans. Eng. Manag.*, Bd. 48, Nr. 3, S. 292–306, Aug. 2001, doi: 10.1109/17.946528.
- [20] M. W. Potts, et al., „Evaluating the complexity of engineered systems: A framework informed by a user case study“, *Syst. Eng.*, Bd. 23, Nr. 6, S. 707–723, 2020, doi: 10.1002/sys.21558.
- [21] Fredrik Borjesson und Katja Hölttä-Otto, „A module generation algorithm for product architecture based on component interactions and strategic drivers“, *Res. Eng. Des.*, Bd. 25, Nr. 1, 2014, doi: DOI:10.1007/s00163-013-0164-2.
- [22] S. D. Eppinger und T. R. Browning, *Design Structure Matrix Methods and Applications*. The MIT Press, 2012. doi: 10.7551/mitpress/8896.001.0001.
- [23] K. Sinha und O. L. de Weck, „Structural Complexity Quantification for Engineered Complex Systems and Implications on System Architecture and Design“, *SPIE*, Aug. 2013,
- [24] K. Sinha et al., „Correlating Integrative Complexity With System Modularity“, in *Volume 2A: 43rd Design Automation Conference*, Cleveland, Ohio, USA: American Society of Mechanical Engineers, Aug. 2017. doi: 10.1115/detc2017-67254.
- [25] K. Sinha, et al., „Integrative Complexity: An Alternative Measure for System Modularity“, *ASME*, Mai 2018,
- [26] J. R. Armstrong, „Famous Failures Revisited: A Focus on System Integration“, *INCOSE Int. Symp.*, Bd. 29, Nr. 1, S. 527–541, 2019, doi: 10.1002/j.2334-5837.2019.00617.x.
- [27] J. L. Grumbach und L. D. Thomas, „Integration principles for complex systems“, *Syst. Eng.*, Bd. 23, Nr. 6, S. 684–706, 2020, doi: 10.1002/sys.21554.
- [28] P. J. Clarkson et al., „Predicting Change Propagation in Complex Design“, *J. Mech. Des.*, Bd. 126, Nr. 5, S. 788–797, Okt. 2004, doi: 10.1115/1.1765117.
- [29] J. Fröberg et al., „Key factors for achieving project success in integration of automotive mechatronics“, *Innov. Syst. Softw. Eng.*, Bd. 3, Nr. 2, S. 141–155, Juni 2007, doi: 10.1007/s11334-007-0023-2.