

Ansätze zur Komplexitätsbeherrschung in der digitalen Leit- und Sicherungstechnik

Approaches to complexity management in the digital control-command and signalling system

Matthias Barz | Julia Kalkreiber | Daria Menzel

Das deutsche Streckennetz ist geprägt von einer Vielzahl alter und heterogener Anlagen der Leit- und Sicherungstechnik (LST), die dringend erneuert werden müssen. Parallel dazu hat die Digitalisierung in der LST längst Einzug gehalten. Neben der Technologieentwicklung kam damit auch der Wunsch eines flächendeckenden Rollouts der digitalen Leit- und Sicherungstechnik (dLST) auf. Genau an diesem Punkt zeigt sich jedoch eine wesentliche Herausforderung: Der Rollout kommt langsamer voran als geplant. Zwar bestehen abgestimmte Ansätze und Strategien zur Umsetzung der dLST, doch die Prozesse, Schnittstellen und Regelwerke werden dabei zunehmend komplexer. Um die dLST erfolgreich und im vorgesehenen Tempo zu realisieren, ist es die Aufgabe der gesamten Branche, diese Komplexität durch gezielte Reduktion und systematische Strukturierung nachhaltig zu beherrschen. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über mögliche Lösungsansätze zur Komplexitätsbeherrschung im Kontext der dLST.

1 Aktuelle Situation

Die fortschreitende Weiterentwicklung der dLST bei gleichzeitiger Existenz etablierter, technischer und betrieblicher Regeln führt zu einer steigenden Vielfalt an Anforderungen und damit zu einer kontinuierlichen Zunahme der Systemkomplexität. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer zukünftig engeren Verzahnung von Anforderungsmanagement, Rolloutplanung, Produktentwicklung, Realisierung und Forschung. Es braucht sowohl eine systematische Analyse der systemischen Anforderungen bestehender Regelwerke, Planungsabläufe und technischen Schnittstellen als auch wissenschaftliche Modelle und Methoden zur Komplexitätsbeherrschung, die sich direkt in der Praxis anwenden lassen und spürbar entlasten. Besonders herausfordernd ist der parallele Verlauf von Produktentwicklung, Zulassungsprozessen und der Umsetzung in Projekten. Die daraus entstehenden Abhängigkeiten wirken sich direkt auf Planungsaufwand, Risikobewertungen und Zeitpläne aus. Um diese Abhängigkeiten beherrschbar zu machen und die Gesamtkomplexität nachhaltig zu reduzieren, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschung, Industrie, Infrastrukturbetreibern, Eisenbahnverkehrsunternehmen und Behörden unerlässlich.

Die Ergebnisse der „Beschleunigungskommission Schiene“ [1], „Neuausrichtung der Gesamtstrategie zur Digitalisierung der Schiene“ [2] und der „Agenda für zufriedene Kunden auf der Schiene“ [3] weisen als wesentlichen Hebel für die Erneuerung der LST das Thema Vereinfachung und Beherrschung der Komplexität aus. Derzeit laufen bereits erste Forschungsaktivitäten an der Technischen Universität Dresden (TUD) zu dem Thema Komplexitätsbeherrschung.

The German rail network is characterised by a large number of old and heterogeneous installations of Control-Command and Signalling (CCS) systems that urgently need to be renewed. At the same time, digitalisation has also long since found its way into CCS. In addition to the technical development, this has also led to the desire for a nationwide rollout of digital CCS. However, this is precisely the area where a major challenge has arisen: the rollout is progressing more slowly than planned. Although there are coordinated approaches and strategies for implementing digital CCS, the processes, interfaces and regulations are becoming increasingly complex. In order to implement digital CCS successfully and at the intended pace, the entire industry must manage this complexity in a sustainable manner through the use of targeted reduction and systematic structuring. This article provides an overview of possible approaches to managing complexity within the context of digital CCS.

1 The current situation

The ongoing development of the digital CCS, coupled with the existence of established technical and operating rules, is leading to an increasing variety of requirements and thus to a continuous increase in system complexity. This highlights the need for the closer integration of requirements management, rollout planning, product development, implementation and research in the future. There is a need for both a systematic analysis of the systemic requirements of the existing regulations, design processes and technical interfaces, as well as for scientific models and methods that can be directly applied to complexity management in practice and provide noticeable relief.

One particular challenge involves the parallel progression of product development, the approval processes and implementation in projects. The resulting dependencies have a direct impact on the design efforts, risk assessments and timelines. Close cooperation between research institutions, industry, infrastructure operators, railway companies and authorities is essential in order to make these dependencies manageable and to reduce the overall complexity in the long term.

The results of the „Beschleunigungskommission Schiene“ [1], „Neuausrichtung der Gesamtstrategie zur Digitalisierung der Schiene“ [2] and the „Agenda für zufriedene Kunden auf der Schiene“ [3] have identified simplification and the mastery of complexity as the key levers for the renewal of CCS.

Initial research activities on the topic of complexity management are already underway at the Technical University of Dresden (TUD).

2 Komplexität im systemtheoretischen Kontext

Für die Einordnung des Begriffs Komplexität ist zunächst eine Definition des damit verbundenen Begriffs System erforderlich. Ropohl [4] beschreibt ein System als Gesamtheit von Elementen, die durch Wechselwirkungen miteinander verknüpft und gegenüber ihrer Umwelt abgrenzbar sind. Darüber hinaus können Systeme hierarchisch strukturiert sein und aus mehreren Teilsystemen bestehen [4]. In Abhängigkeit von ihren Eigenschaften lassen sich technische Systeme in die Typen einfach, kompliziert, komplex und chaotisch klassifizieren [5].

Einfache Systeme bestehen aus wenigen Elementen mit vorhersehbaren, linearen Wechselwirkungen. Das Systemverhalten ist im Vorfeld bekannt, sodass keine unerwarteten Systemreaktionen auftreten. Bei komplizierten Systemen liegt eine hohe Anzahl an Elementen mit teilweise heterogenen Eigenschaften vor, die ebenfalls auf lineare Art und Weise interagieren. Demzufolge ist auch bei komplizierten Systemen das Verhalten der Elemente grundsätzlich vorhersehbar. Die Wechselwirkungen sind jedoch vielfältig und erfordern für das Systemverständnis entsprechende Fachexpertise [5].

Eine Einordnung als komplexes System erfolgt, wenn dynamische Interaktionen zwischen den Elementen auftreten. Die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge sind in diesem Fall auch mit Fachkompetenz nicht vollumfänglich bekannt, sodass unerwartete Ereignisse auftreten können. Mit zunehmender Komplexität kann ein System in einen chaotischen Zustand übergehen, sodass es instabil wird und sich nicht mehr beherrschen lässt [5].

3 Systemeigenschaften der dLST

Die dLST ist ein elementarer Bestandteil des digitalen Bahnsystems und umfasst mehrere Teilsysteme, darunter moderne, digi-

2 Complexity within a systems-theoretical context

In order to classify the term complexity, it is first necessary to define the related term system. Ropohl [4] describes a system as a set of elements that are linked to each other through interactions and can be distinguished from their environment. Furthermore, systems can be hierarchically structured and consist of several subsystems [4]. Technical systems can be classified as simple, complicated, complex or chaotic depending on their properties [5].

Simple systems consist of a few elements with predictable, linear interactions. The system behaviour is known in advance, so that no unexpected system reactions occur. Complicated systems have a large number of elements with partially heterogeneous properties that also interact in a linear manner. Consequently, even in complicated systems, the behaviour of the elements is fundamentally predictable. However, the interactions are diverse and require the appropriate technical expertise to understand the system [5].

A system is classified as complex when dynamic interactions occur between its elements. In this case, even experts cannot fully understand the cause-and-effect relationships, which means that unexpected events can occur. As complexity increases, a system can descend into chaos, thus becoming unstable and uncontrollable [5].

3 The system properties of the digital CCS

The digital CCS is a fundamental component of the digital railway system and comprises several subsystems, including modern digital interlocking platforms, the integrated control

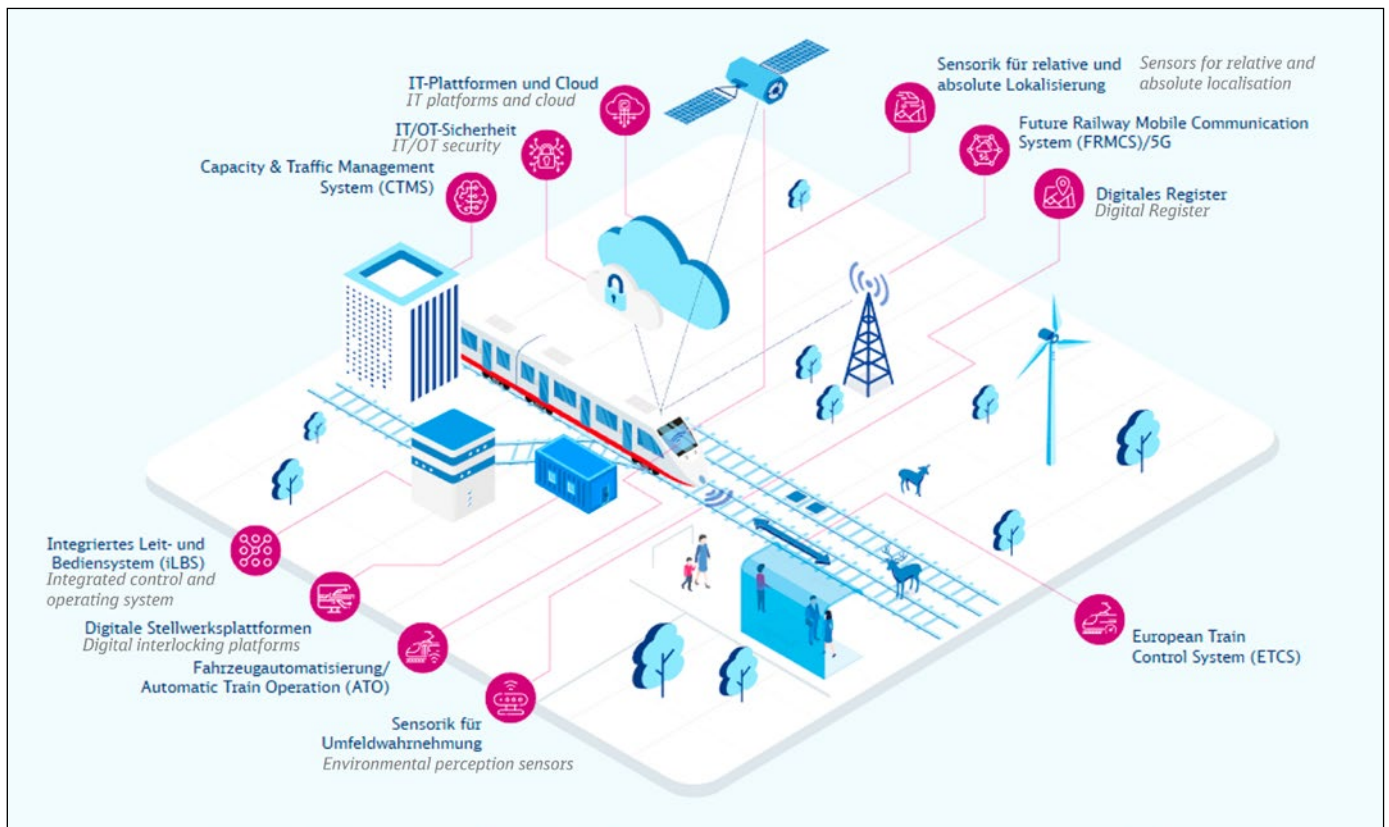


Bild 1: dLST als Teil des digitalen Bahnsystems [4]

Fig. 1: Digital CCS as part of the digital railway system [4]

Quelle / Source: DB InfraGO AG

tale Stellwerksplattformen, das integrierte Leit- und Bediensystem sowie das Zugbeeinflussungssystem ETCS Level 2 (Bild 1). Dabei stellt die dLST kein isoliert technisches System dar, sondern ist als betrieblich-technisches System einzuordnen. Zwischen den betrieblichen und technischen Aspekten bestehen dynamische Wechselwirkungen, sodass diese nicht als getrennte Teilsysteme betrachtet werden können.

Vor einem Flächenrollout müssen zunächst die dafür nötigen Teilsysteme zugelassen werden, was aufgrund der Sicherheitsrelevanz des Systems langwierig und aufwendig ist. Begrenzte personelle und finanzielle Ressourcen erfordern eine Priorisierung in der Entwicklung und Umsetzung. Veränderte Rahmenbedingungen können dabei eine dynamische Anpassung dieser Priorisierung erforderlich machen, wodurch nicht vorhersehbare Rückwirkungen auf den Entwicklungsfortschritt sowie auf die angestrebten Zeitpläne entstehen.

Zahlreiche dLST-Projekte befinden sich bereits in der Planungsphase, obwohl noch nicht alle Produkte verfügbar sind und sich Regelwerke in einer kontinuierlichen Weiterentwicklung befinden. Planungen basieren daher häufig auf Annahmen, die nachträgliche Anpassungen erfordern können. Für Projektaufträge müssen die Systemdefinitionen des Entwicklungsprojektes mit der Aufgabenstellung des Rollout-Projektes abgeglichen werden. Beginnend mit Einführung des Basis Release Plus (BR+) wird künftig ein fest definierter Funktionsumfang für einen möglichen dLST-Serienrollout zur Verfügung stehen. Gleichzeitig erfordern die heutigen störanfälligen Alttechnik-Stellwerke einen zeitnahen Ersatz, sodass in diesen Fällen heute verfügbare, zukunftsfähige Produkte eingesetzt werden, die dem angestrebten dLST-Zielbild noch nicht vollständig entsprechen. Somit erfolgt die Umsetzung der dLST in mehreren Migrationschritten, was ebenfalls zur Komplexität beiträgt.

Insgesamt ist die dLST ein innovatives System mit einer Vielzahl an Teilsystemen, beteiligten Akteuren sowie dynamischen Wechselwirkungen. Daraus kann eine Einordnung als komplexes System abgeleitet werden. Komplexität ist dabei nicht grundsätzlich negativ, da sie eine Grundvoraussetzung für Innovation und Weiterentwicklung ist. Sie muss jedoch beherrschbar bleiben.

and operating system and the ETCS Level 2 train control system (fig. 1). The digital CCS is not an isolated technical system, but rather an operational-technical system. There are dynamic interactions between the operational and technical aspects, meaning that they cannot be considered separate subsystems.

Before a nationwide rollout can take place, the necessary subsystems must first be approved, which is a lengthy and costly process due to the safety relevance of the system. The limited human and financial resources must be prioritised in the development and implementation. Changing conditions may necessitate dynamic adjustments to this prioritisation, resulting in unforeseeable repercussions for development progress and target timelines.

Numerous digital CCS projects are already in the design phase, even though not all the products are yet available and the regulations are still undergoing continuous development. The design is therefore often based on assumptions that may require subsequent adjustments. In the case of project orders, the system definitions of the development project must also be aligned with the project requirement specification for the rollout project.

In the future, a fixed range of functions will be available for a possible digital CCS series rollout starting with the introduction of Basis Release Plus (BR+). At the same time, today's fault-prone older-generation interlocking systems also need to be replaced in the near future. Therefore, currently available, future-proof products that do not yet fully meet the desired digital CCS target architecture are being used in these cases. Consequently, the implementation of digital CCS is taking place in several migration steps, which also contributes to its complexity.

Overall, digital CCS is an innovative system with a large number of subsystems, stakeholders and dynamic interactions. This leads to its classification as a complex system. Complexity is not inherently negative, as it is a fundamental prerequisite for innovation and further development. However, it must remain manageable.

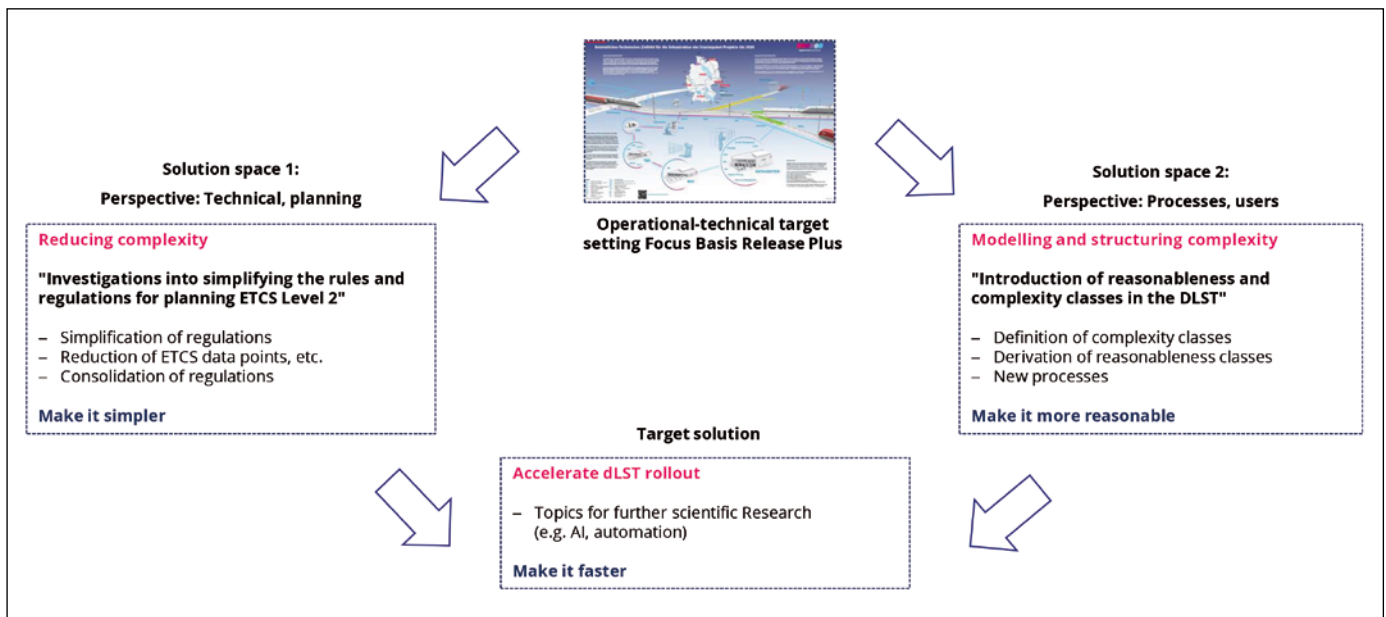


Bild 2: Ausgewählte Lösungsräume zur Beherrschung der Komplexität und Beschleunigung im Bereich der dLST

Fig. 2: Selected solution spaces for managing complexity and acceleration in the area of digital CCS

Quelle / Source: DB InfraGO AG, Matthias Barz

4 Ausgewählte Lösungsräume zur Komplexitätsreduktion und Komplexitätsbeherrschung

Um die zunehmende Komplexität zu reduzieren und zu beherrschen, werden die genannten Themen im Rahmen von zwei aktuell laufenden Forschungsarbeiten an der TUD auf Basis detaillierter Analysen und wissenschaftlicher Methoden umfassend untersucht. Ziel ist es, ein Wirkungsmodell zu erstellen, das verschiedene Handlungsfelder und Lösungsräume zur Komplexitätsbeherrschung und Komplexitätsreduktion im Umfeld des „Betrieblich-technischen Zielbildes“ inkl. der LST-Bestandsmigration beschreibt. Das Modell besteht aus zwei zentralen Handlungsfeldern, die gemeinsam zur Erreichung der Ziellösung beitragen (Bild 2). Der Lösungsraum 1 befasst sich mit dem Thema „Komplexität reduzieren“. Der Lösungsraum 2 befasst sich mit dem Thema „Komplexität modellieren und strukturieren“. Die Ergebnisse der beiden wissenschaftlichen Untersuchungen dienen als Grundlage für die Umsetzungen der Ziellösung „dLST-Rollout beschleunigen“.

4.1 Lösungsraum 1 – Komplexität reduzieren

Um die Komplexität der dLST zu reduzieren, ist die differenzierte Betrachtung der einzelnen Teilsysteme erforderlich. Am Beispiel des Teilsystems ETCS lassen sich die folgenden Bestandteile unterscheiden:

- technische Bestandteile (sämtliche Komponenten z. B. Balisen, ETCS-Zentrale, ETCS-Fahrzeugausrüstung)
- regulatorische Bestandteile (z. B. Lastenhefte, Regelwerke, Technische Spezifikationen für die Interoperabilität)
- prozessuale Bestandteile (z. B. Entwicklungs- und Zertifizierungsprozesse, Zulassungsprozesse, Planungs- und Projektrealisierungsprozesse)

Bild 3: ETCS-Ausrüstung im Bahnhof Biblis

Fig. 3: ETCS equipment at the Biblis station

Quelle / Source:
DB InfraGO AG



4 Selected solution spaces for complexity reduction and complexity management

The aforementioned topics are being comprehensively investigated as part of two ongoing research projects at the TUD based on detailed analyses and scientific methods in order to reduce and manage the increasing complexity. The aim is to create an impact model that describes various fields of action and solution areas for complexity management and complexity reduction within the context of the “betrieblich-technisches Zielbild”, including CCS inventory migration. The model consists of two central fields of action that together support the realisation of the target solution (fig. 2).

Solution space 1 deals with the topic of “reducing complexity”, while solution space 2 deals with the topic of “modelling and structuring complexity”. The results of the two scientific studies serve as the basis for the implementation of the “accelerated digital CCS rollout” target solution.

4.1 Solution space 1 – reducing complexity

In order to reduce the complexity of the digital CCS, it is necessary to take a differentiated view of the individual subsystems. The following elements can be distinguished using the ETCS subsystem as an example:

- technical elements (all the components, e.g. balises, the Radio Block Centre, ETCS vehicle equipment)
- regulatory elements (e.g. the specifications, regulations, technical specifications for interoperability)
- procedural elements (e.g. the development and certification processes, approval processes, design and project implementation processes)

- organisatorische Bestandteile (beteiligte Akteure, z.B. Eisenbahninfrastruktur- und -verkehrsunternehmen, Herstellerfirmen, Eisenbahn-Bundesamt, Akteure der Konformitätsbewertungs- und Zertifizierungsstellen).

Im Rahmen einer Forschungsarbeit an der TUD wird in diesem Zusammenhang die Richtlinie 819.1344 für die Planung von ETCS Level 2 analysiert [7]. Trotz des fortgeschrittenen Reifegrades des Regelwerkes haben Erfahrungen gezeigt, dass die umfangreichen Planungsvorgaben sowie die hohe Anzahl an erforderlichen Balisen zu einem enormen Aufwand in der Projektrealisierung führen. Bild 3 zeigt exemplarisch die Vielzahl an Balisen im Bahnhof Biblis. Zentrale These der Forschungsarbeit ist, dass für einen ETCS-Serienrollout in Deutschland zwingend eine Optimierung der Planungsvorgaben sowie eine Beschleunigung des gesamten Projektrealisierungsprozesses erforderlich ist. Zur Festlegung geeigneter Optimierungsmethoden ist eine entsprechende Bestimmung des Systemtyps (siehe Abschnitt 2) erforderlich. Die Analyse ergab, dass das Anwenden der ETCS-Planungsrichtlinie im systemtheoretischen Kontext als „kompliziert“ und nicht als „komplex“ einzustufen ist, da sie zahlreiche Elemente enthält, deren Wechselwirkungen jedoch linear und für erfahrene Anwender vorhersehbar sind.

Es wird zudem deutlich, dass ein komplexes Gesamtsystem wie die dLST durchaus aus Teilsystemen unterschiedlicher Systemtypen bestehen kann. Die Vereinfachung der komplizierten Planungsvorgaben kann folglich einen Beitrag zur Komplexitätsreduktion des Gesamtsystems leisten.

Hieraus lassen sich die folgenden Ansätze zur Vereinfachung ableiten:

- organisational elements (the involved stakeholders, e.g. the rail infrastructure companies, rail transport companies, manufacturing companies, the Federal Railway Authority, conformity assessment and certification bodies).

Guideline 819.1344 for the design of ETCS Level 2 is currently being analysed within this context as part of a research project at TUD [7]. Despite the advanced maturity of the regulations, experience has shown that the extensive design requirements and the high number of required balises lead to enormous effort in project implementation. Fig. 3 shows an example of the large number of balises at the Biblis station.

The central thesis of the research work lies in the fact that the optimisation of the design specifications and the acceleration of the entire project implementation process are essential for an ETCS series rollout in Germany. In order to determine suitable optimisation methods, it is necessary to first define the system type (see section 2). The analysis has showed that the application of the ETCS design guideline within a systems theory context can be classified as “complicated” rather than “complex”, as it contains numerous elements whose interactions are linear and predictable for experienced users.

It has also become clear that a complex overall system such as the digital CCS can certainly consist of subsystems of different system types. Simplifying the complicated design specifications can therefore contribute to reducing the complexity of the overall system.

The following approaches to simplification can be derived from this:

- reducing the number of elements, e.g. by streamlining the specifications and reducing the number of balises to be planned;

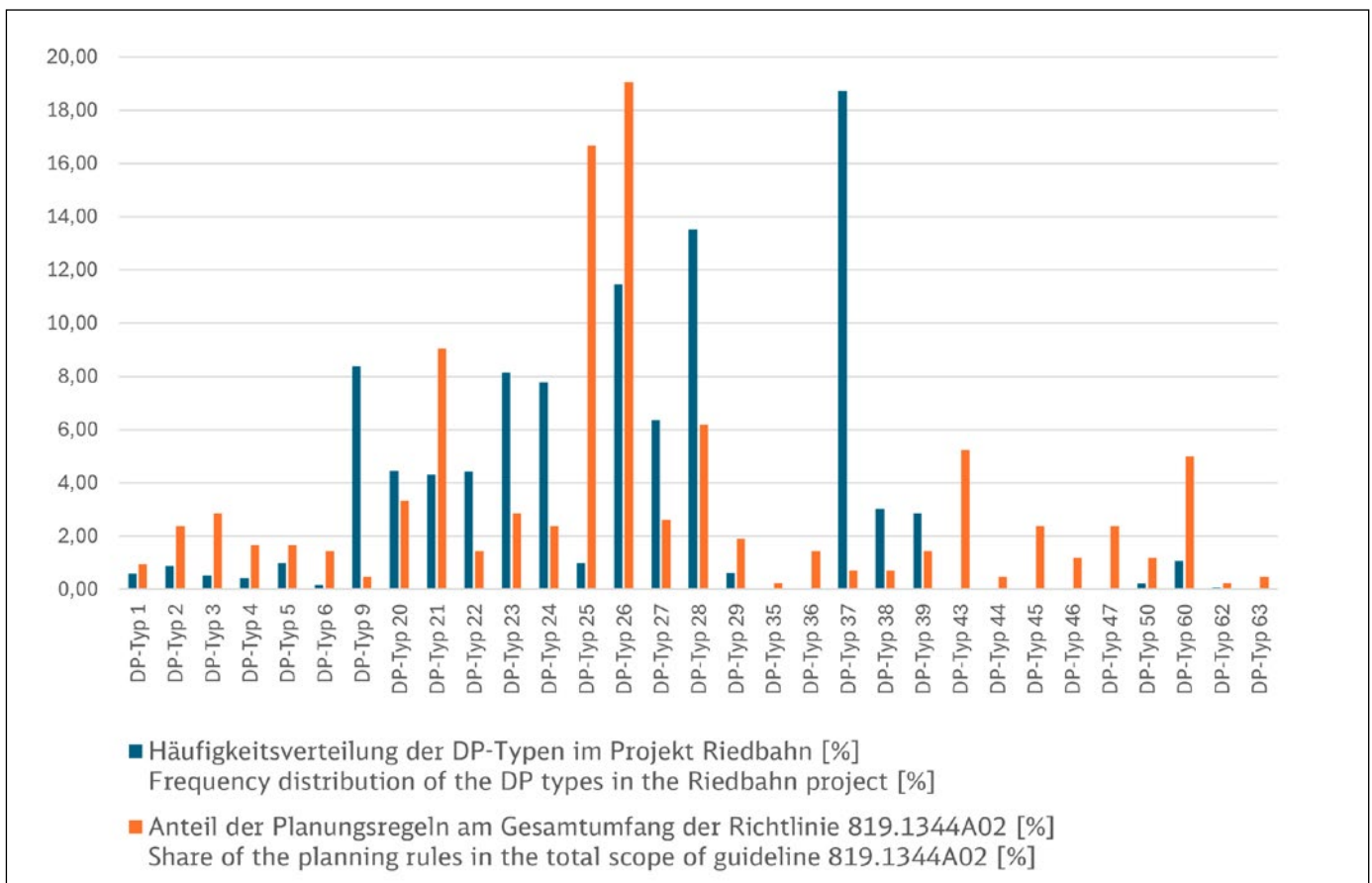


Bild 4: Häufigkeitsverteilung der DP-Typen und Umfang der Planungsvorgaben

Fig. 4: The frequency distribution of DP-types and the scope of planning specifications

Quelle / Source: DB InfraGO AG, Julia Kalkreiber

- Verringerung der Anzahl der Elemente, z.B. durch Verschlan-
kung der Vorgaben und weniger zu planende Balisen;
- Reduzierung der heterogenen Eigenschaften der Elemente
durch Standardisierung und Verzicht auf Balisen für in der Pra-
xis nur selten auftretende betriebliche Sonderfälle.

Da sämtliche Planungsregeln auf den Anforderungen des Lasten-
hefts „Betrieblich-technische Systemfunktionen für ETCS SRS Base-
line 3“ (BTSF3) basieren, werden die Untersuchungen auf diese An-
forderungen ausgerichtet, bevor Optimierungsansätze für das Pla-
nungsregelwerk daraus abgeleitet werden können. Zentrale Prä-
missen sind dabei, die geltenden Sicherheitsziele einzuhalten so-
wie technische und betriebliche Einschränkungen auszuschließen.
In Deutschland wurden zur Standardisierung der Balisenplanung
Datenpunkt (DP)-Typen mit festgelegten Funktionen definiert.
Zur Identifizierung von Optimierungspotenzialen wurde die Häu-
figkeit der einzelnen DP-Typen sowie der Umfang der jeweiligen
Planungsvorgaben untersucht (Bild 4). Da DP unterschiedlicher
Typen zum Teil in einem DP zusammengefasst werden können, er-
fordert nicht jeder DP-Typ zwangsläufig zusätzliche Balisen. Den-
noch wird unter anderem ersichtlich, dass

- der DP zur Absicherung beginnender Zugfahrten (Typ 28) signi-
fikant zur hohen Anzahl der erforderlichen Balisen beiträgt und
- für den allgemeine Ortungs-DP (Typ 25) und den DP zur Über-
tragung einer Langsamfahrstelle (Typ 26) besonders umfang-
reiche Planungsvorgaben zu beachten sind.

Im Fokus stehen zudem Planungsvorgaben anderer europäischer
Länder. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass das Sicher-
heitsniveau des deutschen Eisenbahnsystems im europäischen
Vergleich sehr hoch ist. Insbesondere für die Absicherung und die
betriebliche Optimierung der Rückfallebene werden in Deutsch-
land deutlich mehr Balisen vorgesehen als in anderen Ländern [8].
Im Rahmen weiterer Betrachtungen soll analysiert werden, inwie-
weit für bestimmte Planungsfälle die Vorgaben anderer Länder
auch in Deutschland anwendbar sind und zur Vereinfachung bei-
tragen können.

- reducing the heterogeneous properties of the elements through
standardisation and dispensing with balises for special operating
cases that rarely occur in practice.

Since all the design rules are based on the requirements of the “Be-
trieblich-technische Systemfunktionen für ETCS SRS Baseline 3”
(BTSF3) specifications, the investigations have focused on these re-
quirements before the design rule optimisation approaches can be
derived from them. The central premise here is to comply with the
applicable safety objectives and to exclude the technical and operat-
ing restrictions.

Data point (DP) types with defined functions have been defined in
Germany so as to standardise balise design. The frequency of the in-
dividual DP types and the scope of the respective design specifica-
tions has been examined so as to identify any potential for optimisa-
tion (fig. 4). Since different types of DP can sometimes be combined
into a single DP, not every DP type necessarily requires additional
balises. Nevertheless, it is clear, amongst other things, that

- the “Start of Mission” DP (type 28) contributes significantly to the
high number of required balises and
- particularly extensive design specifications must be observed for
the general placement DP (type 25) and the DP for transmitting a
speed restriction (type 26).

The focus is also on the design requirements in other European
countries. Initial studies have shown that the German railway sys-
tem has a very high level of safety compared to other European
countries. In particular, significantly more balises are designed in
Germany than in other countries for the safety and operating op-
timisation of the fallback level [8]. Further considerations should
analyse the extent to which the requirements of other countries are
also applicable in Germany for certain design cases and can con-
tribute to simplification.

4.2 Solution space 2 – modelling and structuring complexity

The aim of the “modelling and structuring complexity” solution
space is to develop generic criteria and an evaluation model that

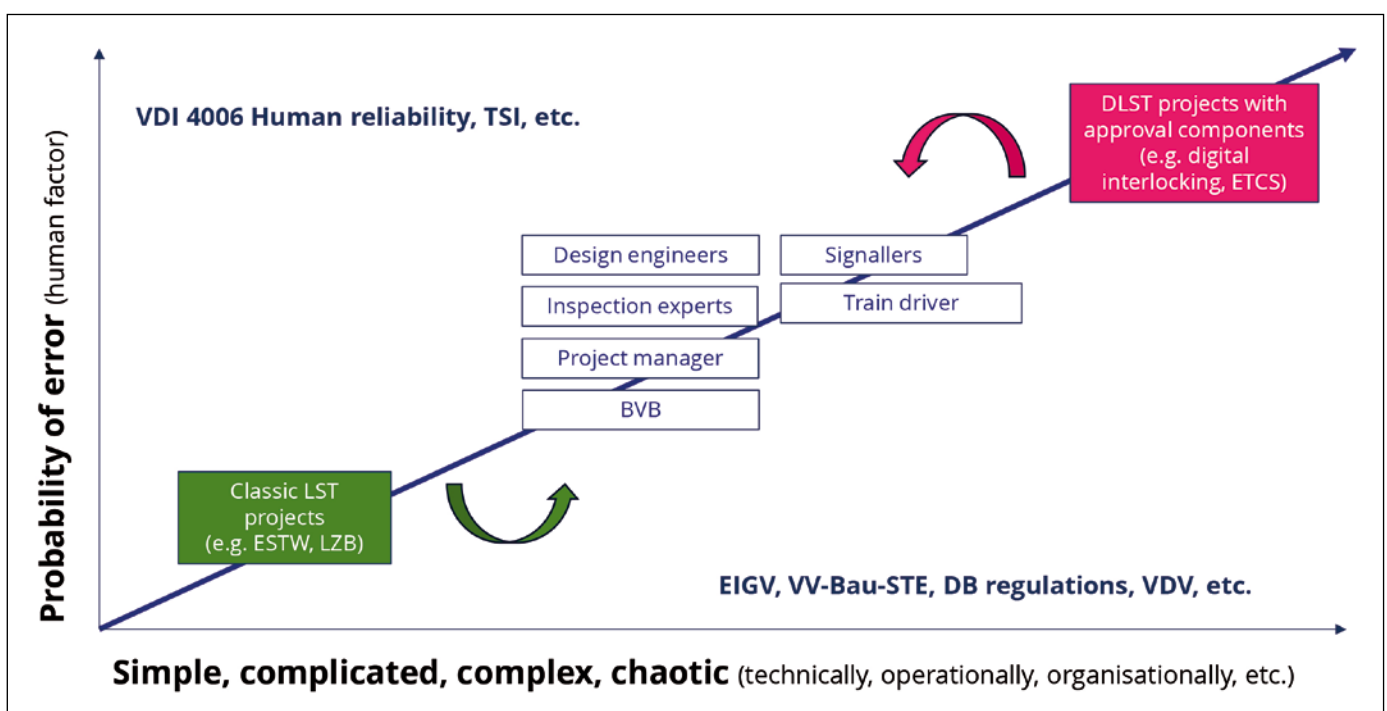


Bild 5: Wechselwirkung Komplexität, menschlicher Faktor und Wirkung auf Berufsgruppen

Fig. 5: The interaction between complexity, human factors and the impact on occupational groups

Quelle / Source: DB InfraGO AG, Matthias Barz

4.2 Lösungsraum 2 – Komplexität modellieren und strukturieren

Das Ziel des Lösungsraumes „Komplexität modellieren und strukturieren“ besteht darin, ein generisches Kriterien- und Bewertungsmodell zu entwickeln, das bei der Umsetzung von Projekten mit hohen Innovations- und Zulassungsanteilen deren Gesamtwirkung zwischen Komplexität, menschlicher Fehlerwahrscheinlichkeit und Wirkung auf Berufsgruppen im Bereich der dLST berücksichtigt (Bild 5). Diese Zusammenhänge werden in einer Forschungsarbeit an der TUD [9] vertiefend untersucht.

Hieraus ergeben sich folgende Forschungsfragen: Die Forschungsfrage 1 beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen Einfachheit, Kompliziertheit, Komplexität, chaotischen Systemen auf der einen und der Wirkung auf menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit auf der anderen Seite. Die Auswirkung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit in ihrer Wechselwirkung mit Sicherheitsanforderungen auf die Komplexität ist ein weiterer möglicher Untersuchungsgegenstand, der aber hier nicht betrachtet wird.

Die Forschungsfrage 2 beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit dieser Zusammenhang auf verschiedene Berufsgruppen anwendbar ist. Um diese bewerten zu können, ist ein Modell zu entwickeln, das je nach Aufgabe und Berufsgruppe folgende Bewertungskriterien mit wissenschaftlichen Methoden ableitet.

Grundlagen für die Ermittlung des menschlichen Faktors bildet die VDI-Schrift 4006, Menschliche Zuverlässigkeit Methoden zur Ereignisanalyse (Bild 5). Eine Übersetzung dieser VDI-Schrift im Sektor der LST hat bisher nicht stattgefunden. Es gibt nur wenige geeignete Studien und Regularien in diesem Bereich. Die wissenschaftlichen Arbeiten von Dr.-Ing. Hintzen [10] und Dr.-Ing. Hammerl [11] können jedoch als Grundlagen für die Übersetzung und vertiefende Forschung herangezogen werden. Folgende Rahmenbedingungen bilden die Grundlage der Untersuchungen:

- Etablierung eines Bewertungsmodells „dLST-Technik/Zumutbarkeit“
- Modell mit hoher Nutzerakzeptanz und unabhängig ermittelbar
- Handlungssicherheit durch Anwendung etablierter Prozesse

takes into account the overall impact of projects with a high degree of innovation and approval requirements in terms of their complexity, human error probability and impact on occupational groups in the field of digital CCS (fig. 5). These relationships are the subject of an in-depth investigation that constitutes part of a research project at the TUD [9].

This gives rise to the following research questions: research question 1 deals with the relationship between simplicity, complexity and chaotic systems on the one hand and the effect on the human error probability on complexity in its interaction with the safety requirements is another possible subject of investigation, but it has not been considered here.

Research question 2 deals with the extent to which this correlation applies to different occupational groups. A model that uses scientific methods to derive the following evaluation criteria depending on the task and occupational group must be developed in order to evaluate this.

VDI publication 4006, Human Reliability Methods for Event Analysis constitutes the basis for determining the human factor (fig. 5). This VDI publication has not yet been translated for the LST sector. There are only a few suitable studies and regulations in this area. However, the scientific work of Dr.-Ing. Hintzen [10] and Dr.-Ing. Hammerl [11] can be used as a basis for translation and in-depth research. The following framework conditions form the basis of the investigations:

- establishing a “digital CCS technology / reasonableness” evaluation model
- an independently verifiable model with a high user acceptance
- certainty of action through the application of established processes
- establish a binding model in the sector
- the use of existing knowledge through the application of the general rules of technology

A five-step process model has been developed against this background:

1. the introduction of an integrated Complexity and Probability of Human Error assessment model

Classification model according to VDI 4006 Complexity in terms of the nature of the tasks	Probability of human error	New: Classification in planning processes dLST* (selection, incomplete)
Simple and frequently performed tasks with low stress and sufficient time available...	~ 1 · 10 ⁻³	State of research – not final Simple planning with established rules and available LST products (ZN, INA, BÜ)
Complex and frequently performed tasks without conflicting objectives in familiar situations with low stress and sufficient time available...	~ 1 · 10 ⁻²	Complex planning with established rules and available LST products (ESTW, LZB, LBS)
More complex and regularly performed tasks in unfamiliar situations with high stress levels and limited time available...	~ 1 · 10 ⁻¹	More complex planning with rules/LST products under development and time pressure (ETCS, digital interlocking, ILBS, etc.)
More complex and rarely performed tasks in unfamiliar situations with high stress or limited time available or an existing conflict of objectives (contradiction between two or more options for action)...	~ 3 · 10 ⁻¹	More complex planning with multiple system components, regulatory frameworks/LST products under development and high time constraints
Highly complex or very rarely performed tasks in unfamiliar situations with very high stress or limited time available, or conflicting objectives where the non-safety-related objective appears to be clearly more plausible in the situation...	~ 1 · 10 ⁰	Excluded: Not part of the assessment in the planning process Ad hoc and emergency situations (e.g. accidents, fire, etc.)

Bild 6: Menschliche Fehlhandlungswahrscheinlichkeit in Planungsprozessen der dLST

Fig. 6: The probability of human error in the digital CCS design processes

Quelle / Source: DB InfraGO AG, Matthias Barz

Evaluation criterion	LST system	signal box	Train control system	Operation	TK Radio system	TK Transmission system	Level crossing	ATO/CTMS	Total
Design									
Number Planning specifications									
Implemented / Drafts									
Number of interfaces									
Route length / Technical sections / Number of control units									
Degree of innovation of the change									
Complexity of the change									
Description of the consequences of failure									
Monitorability of the change									
Reversibility of the change									
Safety-relevant / Not safety-related									
...									
Reasonableness factor									

Classification:

1: simple (e.g. block adjustments)
2: complex (e.g. ESTW line, LST legacy technology)
3: very complex (e.g. ESTW node, digital interlocking)
4: highly complex (e.g. digital interlocking nodes)

Design types:

Examples:
digital interlocking (node, line)
Elektronic interlocking (node, line)
Block adaptation
LST legacy technology (e.g. mechanical)
....

Total value:

To be completed by the team of experts for each project

Bild 7: Projektbezogene Bewertung anhand einer standardisierten Bewertungsmatrix

Fig. 7: Project-related evaluation using a standardised evaluation matrix

Quelle / Source: DB InfraGO AG, Matthias Barz

- Verbindliches Modell im Sektor etablieren
- Nutzung vorhandenen Wissens durch Anwendung allgemeiner Regeln der Technik

Vor diesem Hintergrund wurde ein fünfstufiges Vorgehensmodell entwickelt:

1. Einführung eines integrierten Bewertungsmodells Komplexität und menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit
2. Einführung von Komplexitätsklassen
3. Projektbezogene Bewertung anhand einer standardisierten Bewertungsmatrix
4. Faktoren zur Verbesserung des Zumutbarkeitsfaktors
5. Prozessuale Hinterlegung und Validierung.

Am Beispiel Schritt 1 „Einführung eines integrierten Bewertungsmodells Komplexität und menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit“ hat sich folgende Klassifizierung als praktikabel herausgestellt:

- Komplexitätslevel (einfach bis hochkomplex)
- Stresslevel, Häufigkeit der Aufgabe
- Situation, Zeitfaktor
- Zuordnung der Planungsaufgabe im Bereich der dLST.

Die zugrunde liegende VDI-Schrift 4006 als anerkannte Regel der Technik hat sich branchenübergreifend mit dem Thema „Menschliche Fehlhandlungswahrscheinlichkeit“ auseinandergesetzt.

Der Schritt 2 beschäftigt sich mit der „Einführung von Komplexitätsklassen“ und der zugehörigen Klassifizierung. Folgende Klassifizierung der Planungskomplexität im Infrastrukturprojekt hat sich als praktikabel herausgestellt.

Jedes Kriterium wird in vier Stufen bewertet:

1 = einfach, 2 = komplex, 3 = sehr komplex, 4 = hoch komplex.

Zu bewertende Kriterien:

- Bauform: von einfachen bis zu hochkomplexen LST-Anpassungen
- Planungsvorgaben: Anzahl und Umfang der Vorgaben bzw. Entwürfe
- Schnittstellen: Anzahl beteiligter technischer oder organisatorischer Schnittstellen
- Streckenlänge / technische Abschnitte / Stelleinheiten

2. the introduction of complexity classes
3. a project-related assessment using a standardised assessment matrix
4. factors for improving the reasonableness factor
5. procedural storage and validation.

The following classification has proven to be practical using Step 1, “the introduction of an integrated complexity and human error probability assessment model”, as an example:

- the complexity level (simple to highly complex)
- the stress level, task frequency
- the situation, time factor
- the assignment of the design task in the area of digital CCS.

The underlying VDI publication 4006 deals with the topic of human error probability across all industries as an acknowledged rule of technology.

Step 2 deals with the “introduction of complexity classes” and the associated classification. The following classification of the design complexity in infrastructure projects has proven to be practical.

Each criterion is assessed in four stages:

1 = simple, 2 = complex, 3 = very complex, 4 = highly complex.

The criteria to be evaluated:

- Design: from simple to highly complex LST adaptations
- Design specifications: the number and scope of specifications or designs
- Interfaces: the number of technical or organisational interfaces involved
- Route length / technical sections / control units
- Degree of innovation: from standard changes to technologies with extensive approval
- Border crossings: different technical systems
- Design phases: from simple project requirement specifications to extensive multi-phase planning as implementation planning

Fig. 6 shows the transfer and application of Steps 1 and 2 in the area of the digital CCS. The necessary investigations using scientific methods have not yet been completed.

- Innovationsgrad: von Standardänderungen bis Technologien mit umfangreicher Zulassung
- Grenzübergänge: unterschiedliche technische Systeme
- Planungsphasen: von einfachen Aufgabenstellungen bis zu umfangreichen Mehrphasenplanungen als Ausführungsplanung.

Bild 6 zeigt eine Überführung und Anwendung von Schritt 1 und 2 im Bereich der dLST. Die notwendigen Untersuchungen mit wissenschaftlichen Methoden sind hierzu noch nicht abgeschlossen. Der Schritt 3 beschäftigt sich mit der „Projektbezogenen Bewertung anhand einer standardisierten Bewertungsmatrix“ (Bild 7). Diese Bewertungsmatrix hat sich dabei als praktikabel für die projektbezogene Bewertung des Zumutbarkeitsfaktors herausgestellt. Die Vorlage ist von einem unabhängigen Expertenteam zu befüllen und zu bewerten.

Es bietet sich an, das Expertenteam mit folgenden Teilnehmern zu besetzen:

- Planungsingenieur (unabhängig)
- Leiter Planungsbereich
- Betreiber der Anlage (Infrastrukturplaner)
- Anlagenverantwortlicher in der Region bzw. Vertreter Eisenbahnbetriebsleiter.

Im Schritt 4 werden nach der „Projektbezogenen Bewertung“ je nach Entscheidung „Faktoren zur Verbesserung des Zumutbarkeitsfaktors“ projektbezogen bewertet.

Folgende Bewertungskriterien werden dabei herangezogen:

- Kompetenz und Erfahrungslevel des Planungsingenieurs
- Anzahl der Planungsingenieure
- fachliche Zuordnung der Planung
- Zeitfaktor
- Planungskoordinator vorhanden
- Art der Qualitätssicherung.

Im Schritt 5 wird die prozessuale Hinterlegung im Planungsprozess und Validierung fixiert (Bild 8). Nach Untersuchungen haben sich dabei folgende Schritte als zielführend herausgestellt. Es hat sich herausgestellt, dass etablierte Prozesse genutzt werden können, um die Praktikabilität zu erhöhen.

- Ermittlung des Zumutbarkeitsfaktors ab Leistungsphase 1 nach HOAI über den erweiterten CSM-Prozess nach Richtlinie 809 der DB InfraGO AG
- Hinterlegung der Ergebnisse im etablierten Prozess der „Technischen Aufgabenstellung, Teil a“ gemäß Prozessvorhaben der DB InfraGO AG
- Fortschreibung und Validierung der Ergebnisse der „Technischen Aufgabenstellung, Teil b-c“.

Step 3 deals with the “Project-related assessment using a standardised assessment matrix” (fig. 7). This assessment matrix has proven to be practical for the project-related assessment of the reasonableness factor. The template is to be completed and evaluated by an independent team of experts.

It is advisable to appoint the following participants to the team of experts:

- a design engineer (independent)
- the head of design
- the facility operator (infrastructure planner)
- the plant manager in the region or a representative of the rail safety manager.

Step 4 assesses the “factors for improving the reasonableness factor” following the “project-related assessment” on a project-specific basis, depending on the decision.

The following assessment criteria are used:

- the competence and experience level of the design engineer
- the number of design engineers
- the technical classification of the design
- the time factor
- the available design coordinator
- the type of quality assurance.

Step 5 fixes the procedural filing in the design process and validation (fig. 8). Studies have shown that the following steps are effective. It has been found that established processes can be used to increase practicability.

- determining the reasonableness factor from a basic evaluation (HOAI phase 1) using the extended CSM process in accordance with DB InfraGO AG guideline 809
- depositing the results in the established “Technical Project Requirements Specification, Part a” process in accordance with the DB InfraGO AG process project
- updating and validating the results of the “Technical Project Requirements Specification, Part b-c”.

5 Conclusion and outlook

Ongoing investigations have made it clear that the digital CCS is a complex transformation project whose challenges can only be solved through systematic analysis, standardisation, simplification and a cultural change in cooperation across the entire digital CCS sector. Mastering and reducing complexity is a necessary key to accelerating the rollout and thus fundamentally modernising the rail infrastructure and increasing overall performance and reliability.

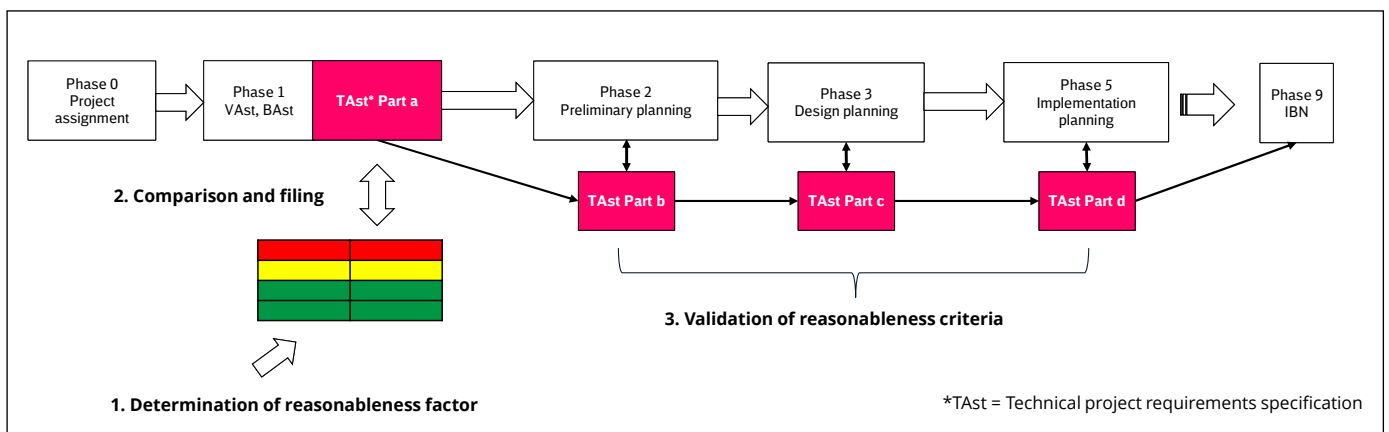


Bild 8: Prozessuale Hinterlegung und Validierung

Fig. 8: Procedural storage and validation

Quelle/ Source: DB InfraGO AG, Matthias Barz

5 Fazit und Ausblick

Die laufenden Untersuchungen verdeutlichen, dass die dLST ein komplexes Transformationsprojekt ist, dessen Herausforderungen nur durch systematische Analyse, Standardisierung, Vereinfachung und einen Kulturwandel in der Zusammenarbeit im gesamten Sektor der dLST gelöst werden können. Die Beherrschung und Reduktion der Komplexität ist ein notwendiger Schlüssel, um den Rollout zu beschleunigen und damit die Eisenbahninfrastruktur grundlegend zu modernisieren sowie die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit insgesamt zu erhöhen.

Im Zuge weiterführender Forschungsarbeiten, beispielsweise zur automatisierten Bewertung von Komplexitätsklassen oder zum Einsatz von Künstlicher Intelligenz im Planungsprozess, können zusätzliche Lösungsräume erschlossen und analysiert werden. Eine Validierung der Untersuchungsergebnisse über geeignete Pilotanwendungen wird zeigen, ob sich die neuen Ansätze in der Projektarbeit bewähren. ■

AUTOREN | AUTHORS

Dipl.-Ing. Matthias Barz

Technical Lead LST/dLST-Realisierung /
Technical Lead LST/dLST Implementation and Projects
 DB InfraGO AG
 Anschrift / Address: Schweizer Straße 3b, D-01069 Dresden
 E-Mail: matthias.barz@deutschebahn.com

Dipl.-Ing. Julia Kalkreiber

Technical Lead Digitale Planung / *Technical Lead Digital Design*
 DB InfraGO AG
 Anschrift / Address: Schweizer Straße 3b, D-01069 Dresden
 E-Mail: julia.kalkreiber@deutschebahn.com

Dr.-Ing. Daria Menzel

Prokuristin / *General Manager*
 CERSS Kompetenzzentrum Bahnsicherungstechnik GmbH
 Anschrift / Address: Bernhardstraße 77, D-01187 Dresden
 E-Mail: daria.menzel@cerss.com

Additional solution spaces can be developed and analysed in the course of further research, for example on the automated evaluation of complexity classes or the use of Artificial Intelligence in the design process. The validation of the research results by means of suitable pilot applications will show whether the new approaches have proven themselves in project work. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Beschleunigungskommission Schiene
- [2] Neuausrichtung der Gesamtstrategie zur Digitalisierung der Schiene
- [3] Eckpunktepapieren des BMV (z. B. Agenda für zufriedene Kunden auf der Schiene)
- [4] Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. 3., überarbeitete Auflage, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe
- [5] Dittes, F.-M.: Komplexität. Warum die Bahn nie pünktlich ist. 2. Auflage, Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2021
- [6] Digitale Schiene Deutschland: www.digitale-schiene-deutschland.de, zuletzt abgerufen am 25.02.2026
- [7] Kalkreiber, J.: Untersuchungen zur Vereinfachung des Regelwerkes für die Planung von ETCS Level 2, laufende Dissertation, Technische Universität Dresden, 2025
- [8] Simón-Muzás, J.: Deployment of ETCS Positioning Balises in different Countries. Masterarbeit Technische Universität Dresden, 2025
- [9] Barz, M.: Untersuchungen zum erforderlichen Sicherheits- und Akzeptanzniveau bei der Migration von Zugbeeinflussungssystemen am Beispiel Rollout dLST, laufende Dissertation, Technische Universität Dresden
- [10] Hinzen, A.: Der Einfluss des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit der Eisenbahn, Dissertation, RWTH Aachen, 1993
- [11] Hammerl, M.: Analyse der menschlichen Einflussfaktoren und Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr, Technische Universität Braunschweig, 2011



Hybridveranstaltung
26. Signal+Draht-Kongress

12. – 13. November 2026,
 Maritim Hotel, Fulda

SAVE THE DATE

Weitere Informationen finden Sie unter:
www.eurailpress.de/sdk2026