

6.Trendausblick Transformations-Hub Leitungssatz
08. Juli 2025

Automatisierte Erstellung und Bewertung von Bordnetztopologien

Mohamed Ayeb, Ludwig Brabetz, Christian Koppe, Universität Kassel

Die Arbeit entstand im Rahmen eines Projekts des:

VDA/FAT AK 30 "Elektrische Energie" im Cluster „Umwelt,
System Straßenverkehr“

Sprecher des Arbeitskreises: Herr Dr. Martin Düsing



- Einführung
- Automatische Generierung von Bordnetztopologien
- Vorabbewertung der Bordnetztopologien
- Fehlererkennung in redundanten Versorgungsstrukturen
- Zusammenfassung

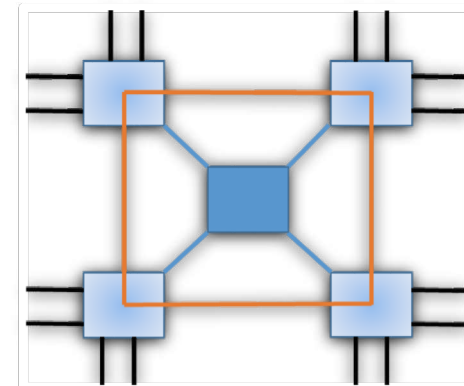
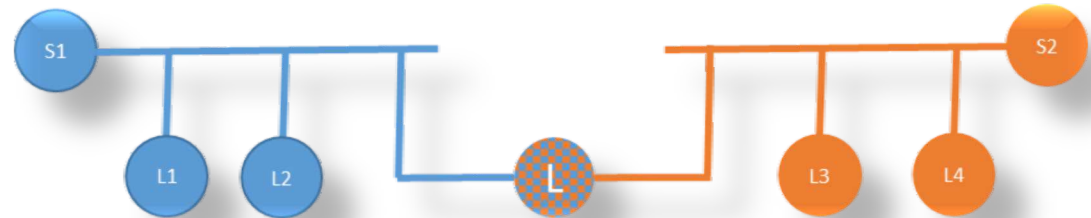


- Tiefgreifender Wandel
 - Digitalisierung
 - Elektrifizierung
 - Automatisierung
- Herausforderungen auf Bordnetzebene
 - Steigende Anzahl elektrischer Verbraucher
 - Mehrspannungsversorgungsarchitekturen
 - Sicherheitskritische Funktionen
 - Zuverlässigkeitsanforderungen
 - Steigende Anzahl möglicher Topologien
- Randbedingungen
 - Kosten
 - Gewicht
 - Bauraum



Einführung - Ansätze

- Auf Komponentenebene
 - Erhöhung der Zuverlässigkeit
 - Verbesserung der Diagnosefähigkeit
 - Redundante Ausführung
- Auf Systemebene
 - Redundante Versorgungspfade
 - Verbesserung der Diagnosefähigkeit
 - Prädiktives Energie- und Leistungsmanagement
- Auf topologischer Ebene
 - Versorgungsbusstrukturen
 - Intelligente Power Distribution Units (PDUs)
 - Rekonfigurierbarkeit mit Hilfe von Leistungsschaltern



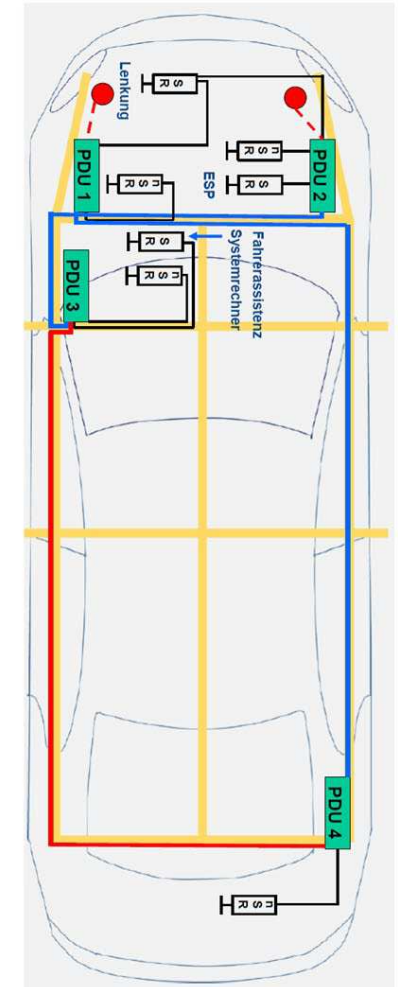
Automatische Generierung von Bordnetztopologien

Ansatz

- Ein zweistufiger Bewertungsansatz
- Erste Stufe: nur die Hauptversorgungspfade und ihre jeweiligen Fehlerfälle berücksichtigen
- Zweite Stufe: eine detaillierte Untersuchung der Topologien, die in der ersten Stufe als vielversprechend identifiziert wurden

Methode

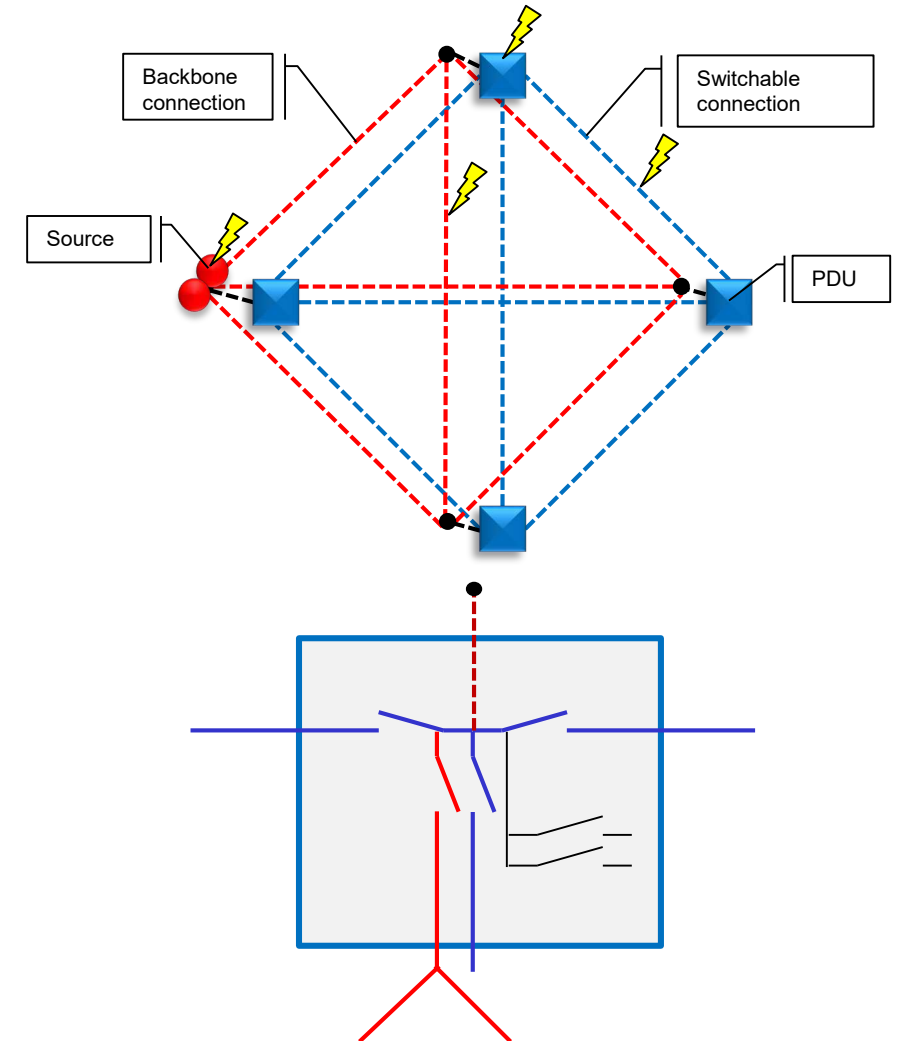
- Generische Beschreibung (Quellen, PDUs und die logischen Verbindungen dazwischen)
- Kurzschlüsse, Leitungsunterbrechungen, PDU- und Quellenausfälle werden berücksichtigt
- Bestimmung der Fehlerfolgen für die Versorgung der PDUs (auf logischer Ebene)
 - Ohne physikalische Berechnungen und Simulationen
 - Fehlerhafte Verbindungen werden selektiv aufgetrennt
 - Algorithmisches Herausfinden ob die PDUs weiterhin über eine intakte logische Verbindung zu den noch verfügbaren Quellen verfügen
- Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeiten der PDUs vs. den relativen Kosten der Topologie



Automatische Generierung von Bordnetztopologien

Use case

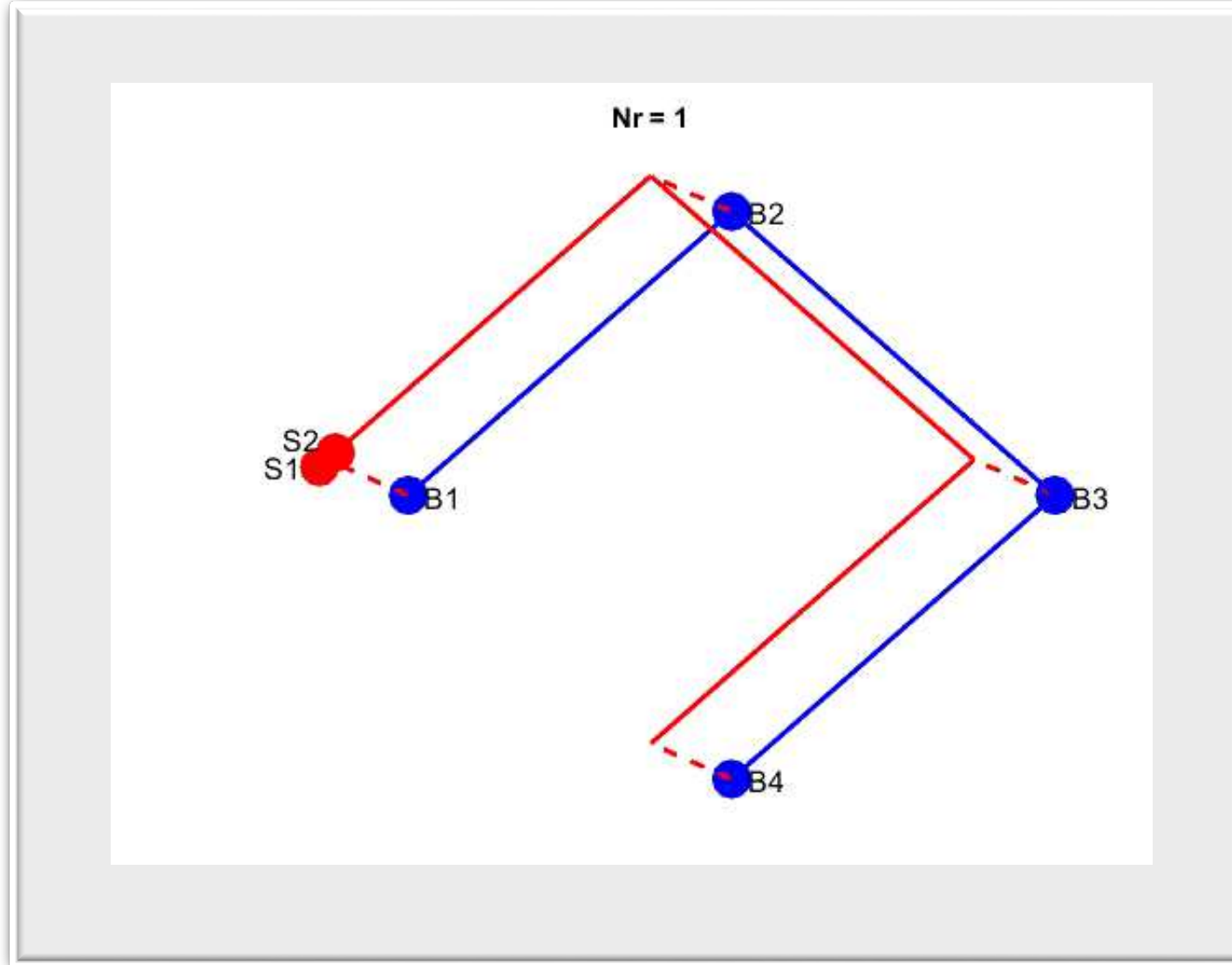
- Zwei Quellen und vier PDUs
- Bis zu 2 Verbindungen jeweils zwischen zwei PDUs
 - Keine Verbindung
 - Eine schaltbare Punkt-zu-Punkt Verbindung
 - Eine Verbindung über ein Backbone
 - beide
- Berücksichtigte Fehler
 - Verbindung kurzgeschlossen
 - Verbindung unterbrochen
 - Ausfall einer PDU
 - Ausfall einer Quelle
- Leistungsschalter
 - Je nach Bedarf ein oder zwei Schalter an beiden Enden einer schaltbaren Verbindung (in blau)
 - Schalter zum Auftrennen einer PDU von einem defekten Backbone (in rot)



Automatische Generierung von Bordnetztopologien

Use case

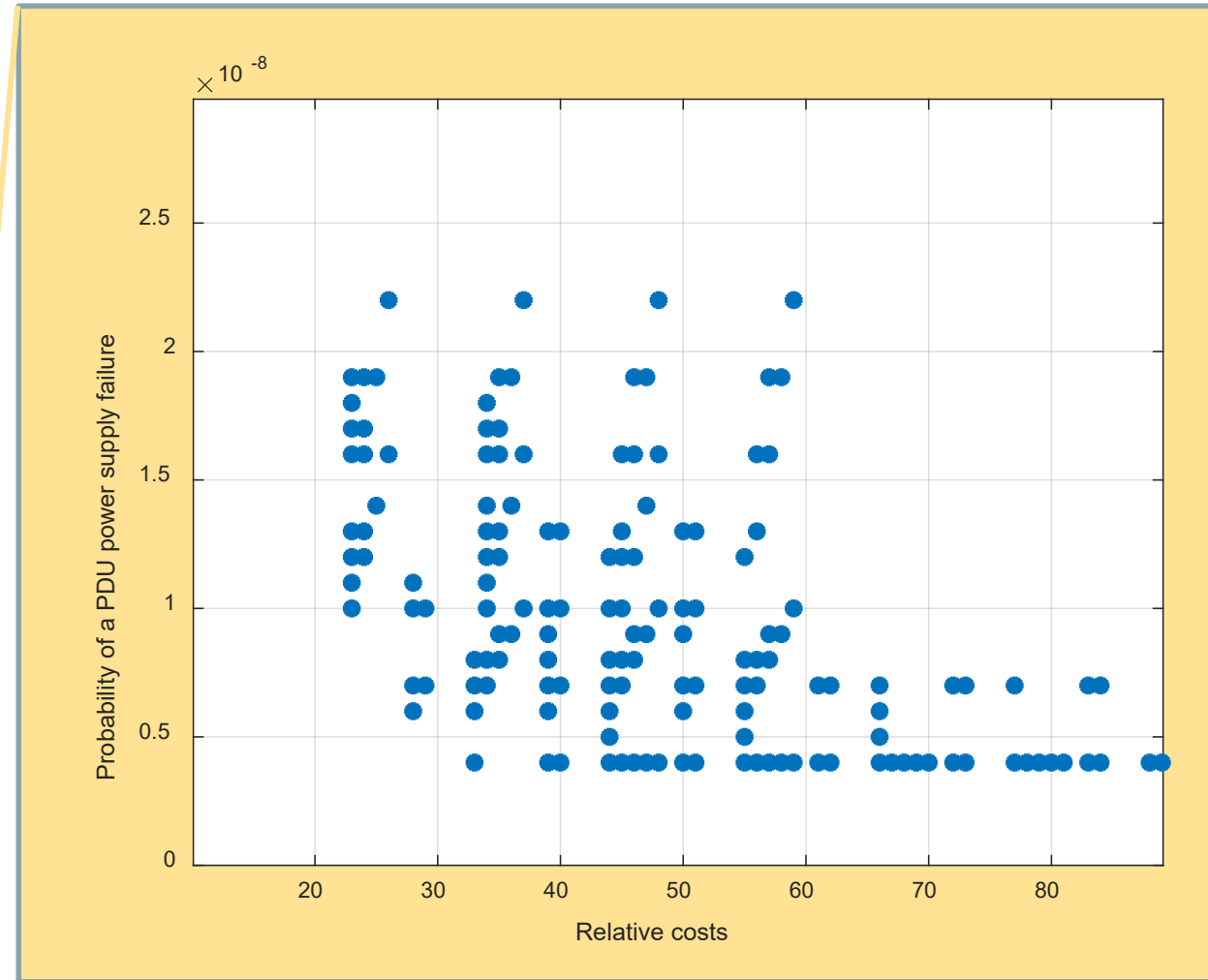
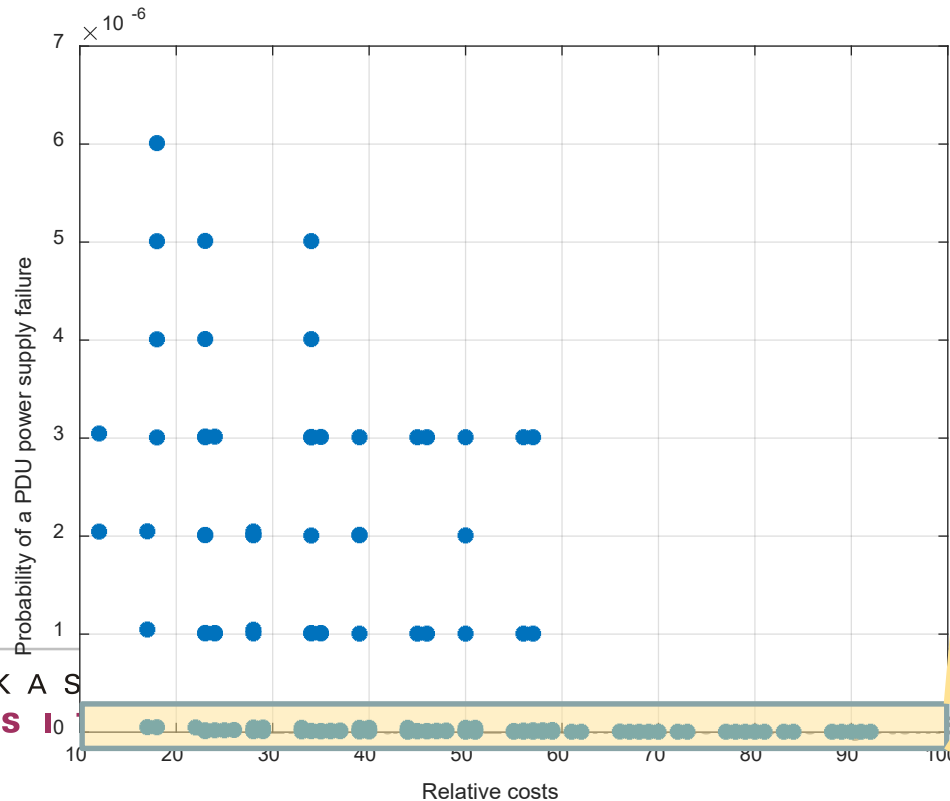
- 8192 Topologien identifiziert
- davon 7794 sinnvolle Topologien (alle PDUs werden im Normalbetrieb versorgt)



Vorabbewertung der Bordnetztopologien

Use case

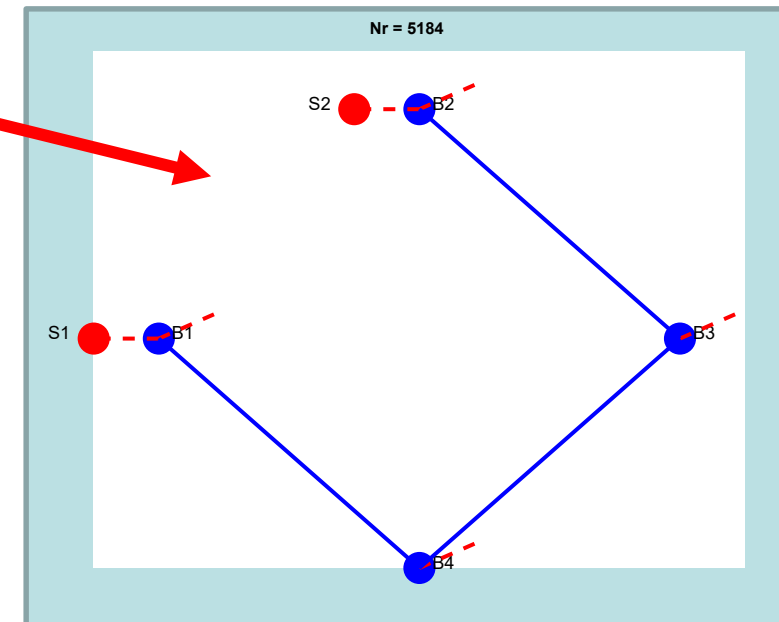
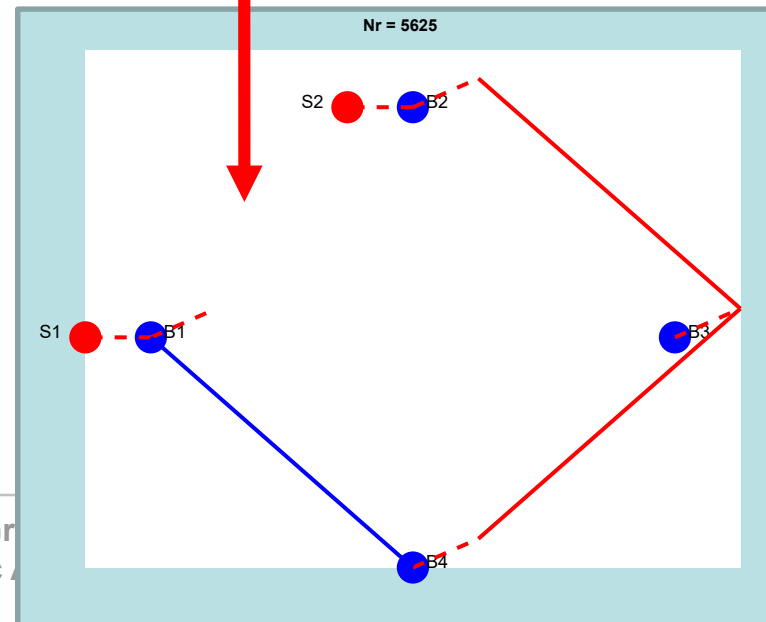
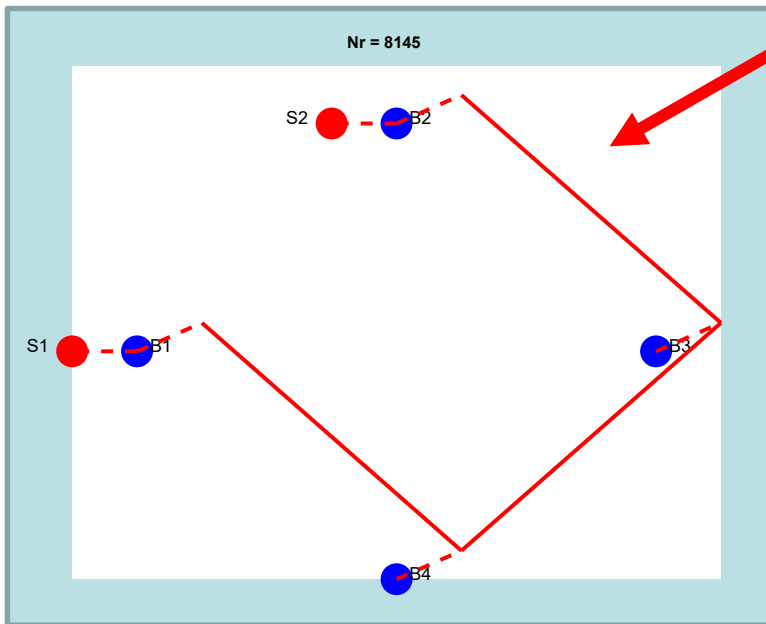
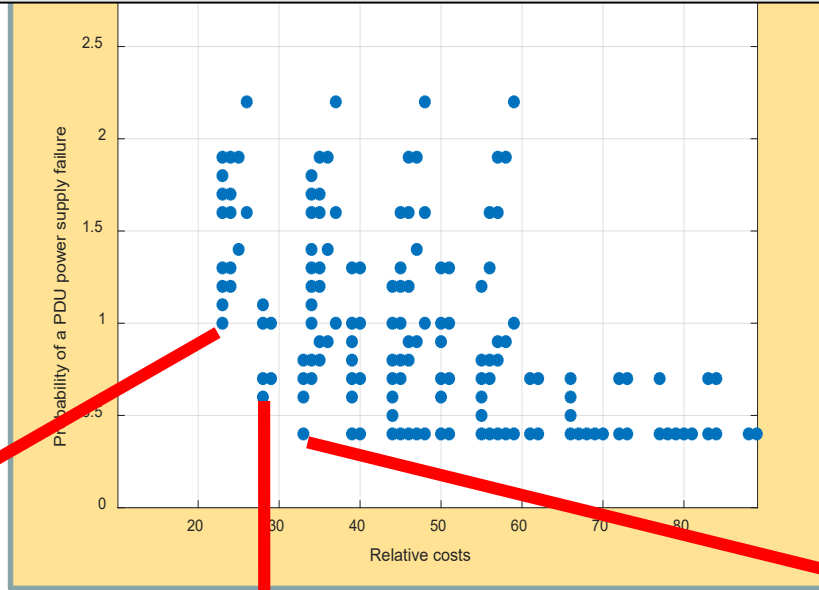
- Jedem Fehler wird eine Wahrscheinlichkeitszahl zugewiesen.
- Jeder Verbindung und jedem Schalter werden relative Kosten zugewiesen.
- Die Bewertung basiert auf dem Ausfall einer PDU vs. den relativen Kosten der Topologie.



Vorabbewertung der Bordnetztopologien

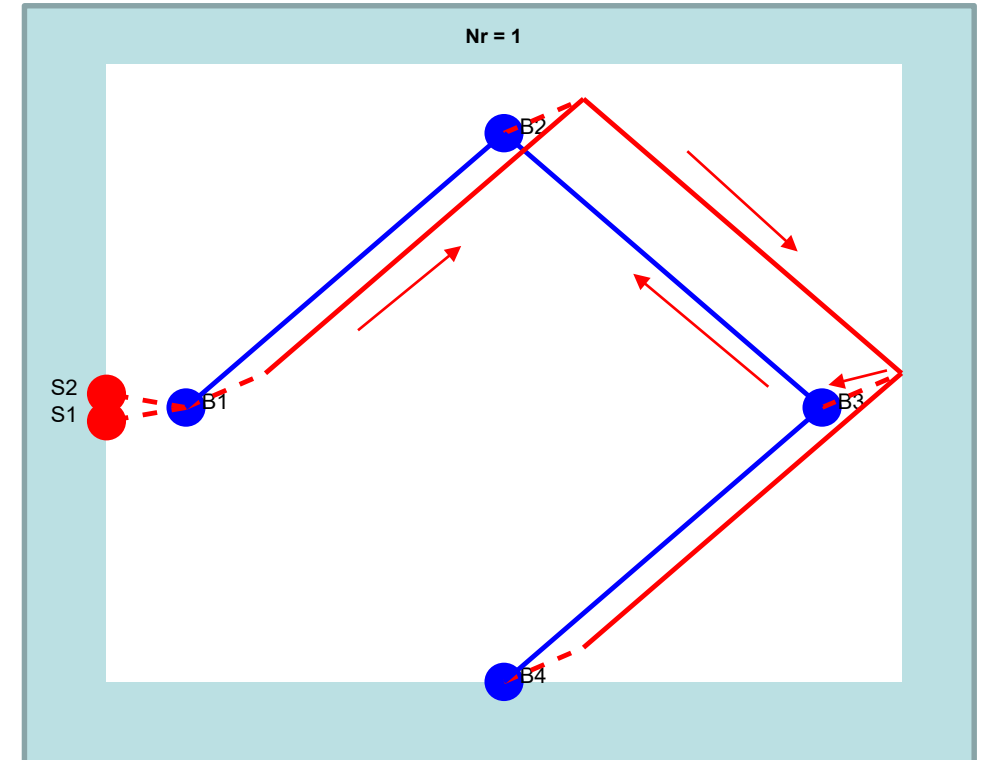
Use case

- Einige Beispieltopologien auf der Pareto front
- Hauptsächlich Linientopologien mit den Quellen an den beiden Enden



Fehlererkennung in redundanten Versorgungsstrukturen – Problemstellung

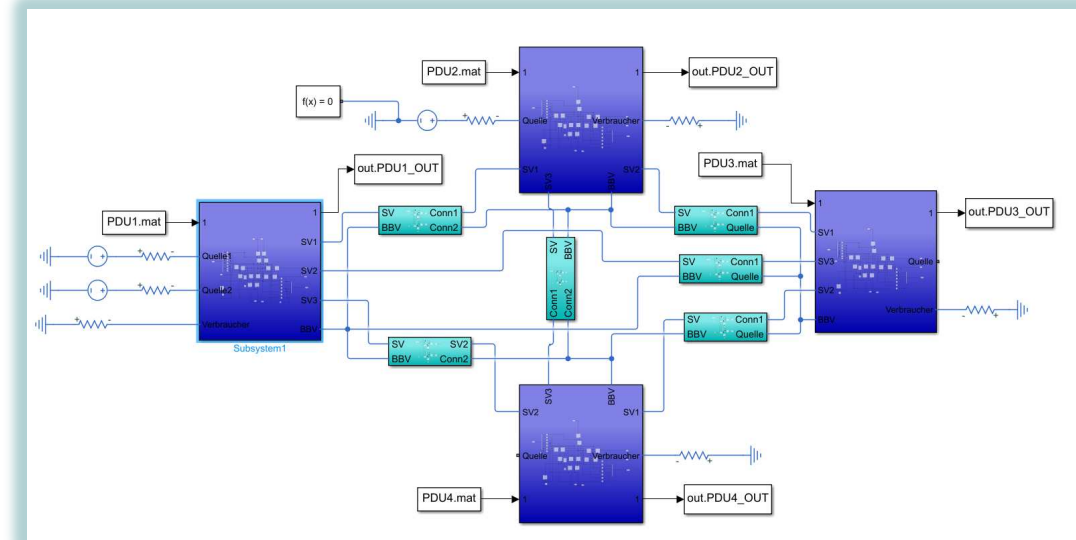
- Bei den bisherigen Ergebnissen ging man davon aus, dass der Fehler und sein Ort bekannt sind.
- In einer konventionellen Versorgungsstruktur (Baumstruktur) sorgt die Sicherung, bei korrekter Auslegung, für eine selektive Auftrennung des Fehlerpfads.
- Bei einer redundanten Versorgung (heiße Redundanz) kann sich die Stromflussrichtung abhängig von Betriebszustand des Netzes laufend ändern. Fehlerfälle lassen sich schwerer identifizieren und lokalisieren.
- Wie viel Sensorik bedarf es, um die Fehler eindeutig zu identifizieren und die richtigen Schalthandlungen zu veranlassen?
- Ist eine lokale Identifikation auf PDU Ebene möglich oder bedarf es dazu eine Kommunikation zwischen den PDUs?



Fehlererkennung in redundanten Versorgungsstrukturen - Ansatz

Ansatz

- Aufbau einer Simscape-Simulation mit allen potentiellen Verbindungen.
- Alle Topologien können mit Hilfe von Schaltern generiert und simuliert werden.
- Simulation im Normalbetrieb und im Fehlerfall bei ausgeschalteten und eingeschalteten Verbrauchern (eine Basislast wird für jede PDU zu deren Versorgung angenommen).
- Alle Ströme durch die Leistungsschalter und alle Spannungen an den Verteilerschienen der PDUs werden aufgenommen und analysiert.
- Globale Detektion: Ist der Fehler, unter Einbeziehung aller verfügbaren Sensoren, überhaupt identifizierbar?
- Lokale Detektion auf PDU Ebene: kann der Fehler mit Hilfe der lokal verfügbaren Sensorsignale identifiziert werden?



Methode

- Aufgrund des linearen Verhaltens des Netzwerks gilt für jedes Sensorsignal $s(t)$:

$$s(t) = \alpha_1 I_1(t) + \alpha_2 I_2(t) + \alpha_3 I_3(t) + \alpha_4 I_4(t) + \alpha_5 U_1(t) + \alpha_6 U_2(t)$$

- Die Sensitivitätsfaktoren α_i können mit Hilfe einer Simulationen im Normalbetrieb und für jeden Fehlerfall bei eingeschalteten und ausgeschalteten Verbrauchern bestimmt werden.
- Anschließend können die Variationsbereiche für alle Sensorsignale abgeleitet werden:

$$s_{min} = \alpha_1 \begin{cases} I_{1,max}, & \text{if } \alpha_1 < 0 \\ 0, & \text{if } \alpha_1 \geq 0 \end{cases} + \alpha_2 \begin{cases} I_{2,max}, & \text{if } \alpha_2 < 0 \\ 0, & \text{if } \alpha_2 \geq 0 \end{cases} + \alpha_3 \begin{cases} I_{3,max}, & \text{if } \alpha_3 < 0 \\ 0, & \text{if } \alpha_3 \geq 0 \end{cases} + \alpha_4 \begin{cases} I_{4,max}, & \text{if } \alpha_4 < 0 \\ 0, & \text{if } \alpha_4 \geq 0 \end{cases}$$

$$s_{max} = \alpha_1 \begin{cases} I_{1,max}, & \text{if } \alpha_1 \geq 0 \\ 0, & \text{if } \alpha_1 < 0 \end{cases} + \alpha_2 \begin{cases} I_{2,max}, & \text{if } \alpha_2 \geq 0 \\ 0, & \text{if } \alpha_2 < 0 \end{cases} + \alpha_3 \begin{cases} I_{3,max}, & \text{if } \alpha_3 \geq 0 \\ 0, & \text{if } \alpha_3 < 0 \end{cases} + \alpha_4 \begin{cases} I_{4,max}, & \text{if } \alpha_4 \geq 0 \\ 0, & \text{if } \alpha_4 < 0 \end{cases}$$

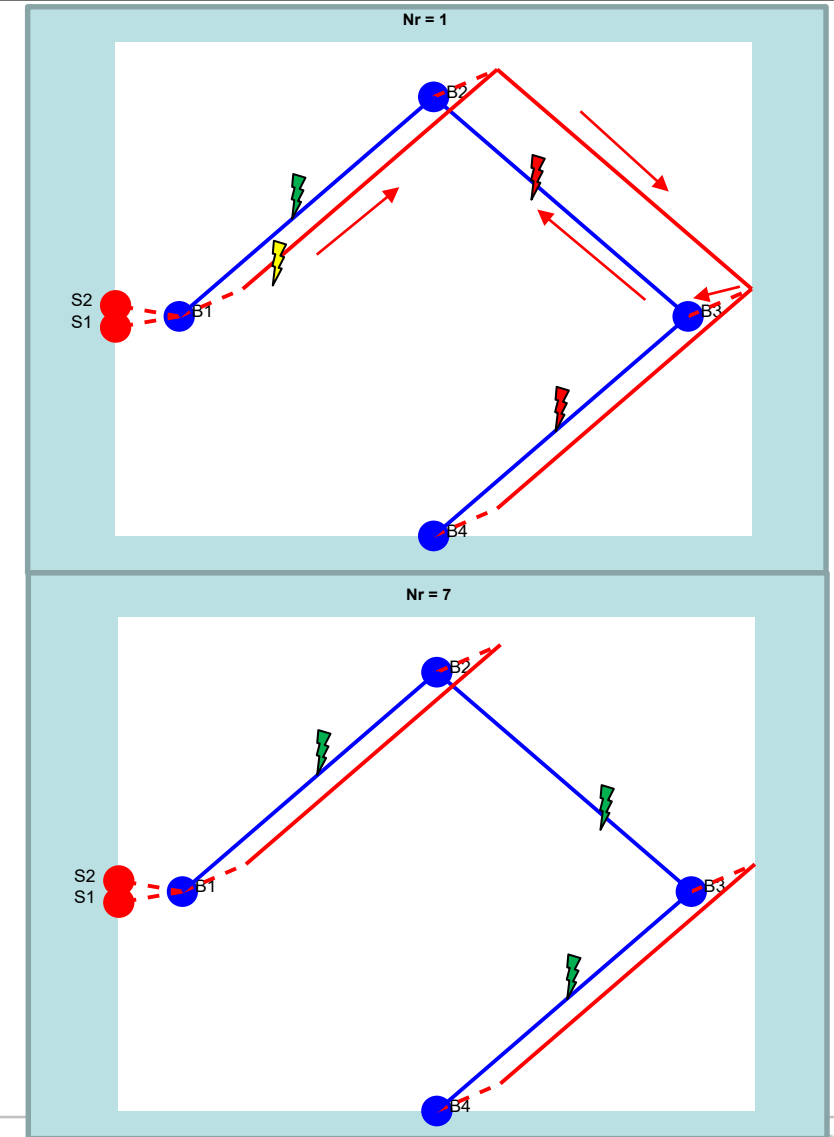
- Ein Fehler kann global detektiert werden, wenn die Variationsbereiche für mindestens eine Kombination der Sensorsignale sich nicht überlappen.
- Ein Fehler kann lokal detektiert werden, wenn die Variationsbereiche für mindestens eine Kombination der Sensorsignale der betroffenen PDU sich nicht überlappen.
- Mit Detektierbarkeit ist hier nur die Fähigkeit gemeint, die nötigen Schalthandlungen durchzuführen (ohne Berücksichtigung der Selektivität).



Fehlererkennung in redundanten Versorgungsstrukturen – Beispielhafte Ergebnisse

Beispielhafte Ergebnisse

- Topologie Nr.1: Eine Unterbrechung der schaltbaren Verbindung zwischen PDU1 und PDU2 kann lokal detektiert werden, während eine Unterbrechung zwischen PDU2 und PDU3 oder PDU3 und PDU4 nicht detektiert werden kann (auch nicht global). Unter bestimmten Lastbedingungen kann der Strom seine Richtung ändern also auch Null werden ohne dass eine Unterbrechung vorliegt. Eine Unterbrechung des Backbones zwischen PDU1 und PDU2 kann lokal in PDU1 detektiert werden, muss aber global für die anderen PDUs erkannt werden, damit sie sich entsprechend vom Backbone trennen.
- Topologie Nr. 7: Alle Fehlermodi können lokal detektiert werden.
- Unterbrechungen sind die am schwierigsten zu detektierenden Fehlerfälle. Deren Detektion ist aber notwendig, um sicher zu sein, dass im Fehlerfall auf sie zurückgegriffen werden kann.



Fehlererkennung in redundanten Versorgungsstrukturen – Ergebnisse

Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

- Anzahl der Topologien bei denen eine globale bzw. eine lokale Detektierbarkeit der Verschiedenen Fehlerfälle möglich ist:

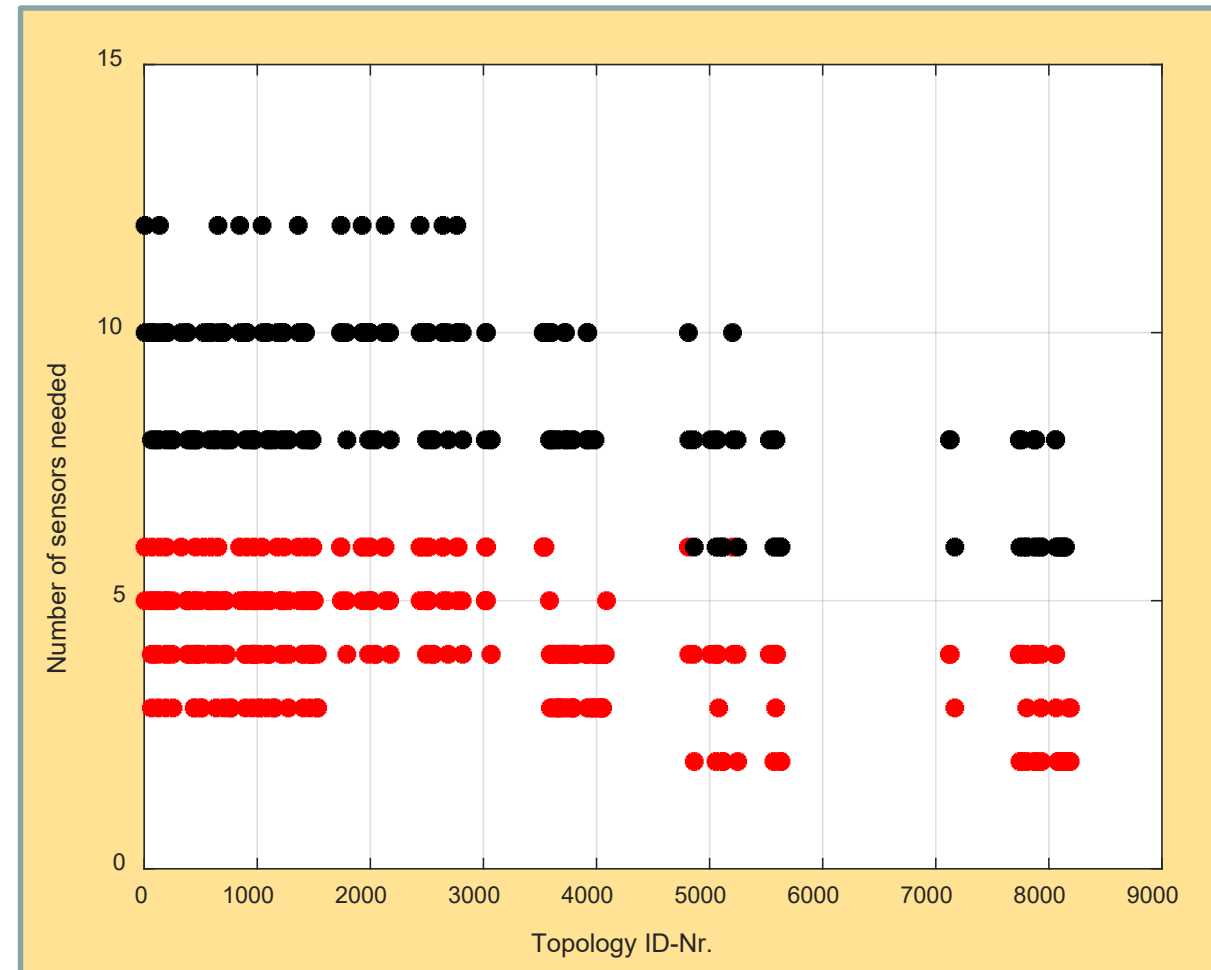
	detektierbar / Anz. Betroffene	lokal detektierbar / Anz. Betroffene
schaltbare Verbindungen (Unterbrechungen)	772 / 7708	772 / 7708
schaltbare Verbindungen (Kurzschlüsse)	7708 / 7708	7708 / 7708
Backbone-Verbindungen (Unterbrechungen)	874 / 7708	408 / 7708
Backbone-Verbindungen (Kurzschlüsse)	7708 / 7708	7708 / 7708
PDU-Fehler	7794 / 7794	7794 / 7794
Quellenfehler	7794 / 7794	7794 / 7794
Alle Fehler	303 / 7794	208 / 7794



Fehlererkennung in redundanten Versorgungsstrukturen – Minimale Sensorik

Minimaler Bedarf an Sensorik

- Ein minimaler Satz an Sensorik wurde bei jeder Topologie für eine lokale bzw. eine globale Detektierbarkeit identifiziert (wenn die jeweilige Detektierbarkeit möglich ist).
- Die roten Punkte zeigen die Anzahl der benötigten Sensoren für eine globale Detektierbarkeit.
- Die schwarzen Punkte zeigen die Anzahl der benötigten Sensoren für eine lokale Detektierbarkeit.
- Zwischen 2 und 6 Sensoren werden für eine globale Detektierbarkeit benötigt.
- Zwischen 6 und 12 Sensoren werden für eine lokale Detektierbarkeit benötigt.
- Eine zuverlässige Kommunikation ist darüber hinaus für eine globale Detektierbarkeit unerlässlich.



Zusammenfassung

- Eine generische Darstellung und eine einfache Modellierung für Bordnetztopologien wurden präsentiert.
- Sie erlauben eine Vorabbewertung einer sehr hohen Anzahl möglicher Topologien hinsichtlich Zuverlässigkeit vs. Kosten in einem früheren Entwicklungsstadium.
- Redundante Versorgungsstrukturen erhöhen die Zuverlässigkeit können aber gleichzeitig zu Schwierigkeiten beim Detektieren und Lokalisieren von Fehlern führen. Vor allem Unterbrechungen sind in vielen redundanten Topologien schwierig zu erkennen.
- Abschätzung des Sensoraufwands für lokale und globale Detektierbarkeit.
- Kalte und heiße Redundanzen können gezielt kombiniert werden, um das Problem der Detektierbarkeit von Unterbrechungen zu entschärfen.
- Es können alternativ weitere Methoden zu Detektion von Unterbrechungen herangezogen werden, wie der Einsatz von abgeschirmten Leitungen oder die Verwendung ausgeklügelter Sensorverfahren wie die Zeitbereichsreflektometrie.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Kontakt:

Mohamed Ayeb

Fahrzeugsysteme und Grundlagen der
Elektrotechnik, Universität Kassel

Adresse: Wilhelmshöher Allee 73
34121 Kassel

Email: ayeb@uni-kassel.de

Tel: 0561/804-6552

Web: <https://www.uni-kassel.de/eecs/fsg>

