

Berücksichtigung von No Fault Found im Diagnose- und Instandhaltungssystem von Schienenfahrzeugen

Intermittierende und nicht reproduzierbare Fehler, auch als *No Fault Found* bezeichnet, treten in praktisch allen Bereichen auf und sorgen für hohe Kosten.

Diese sind häufig auf unpräzise Fehlerbeschreibungen zurückzuführen.

Im vorliegenden Beitrag werden Anpassungen der Vorgehensweise bei der Entwicklung und Anpassungen des Diagnosesystems vorgeschlagen.



Einführung

Das Phänomen *No Fault Found* (NFF), unter anderem auch als *Cannot Duplicate* (CND), *Fault Not Found* (FNF) oder *No Defect Found* (NDF) bezeichnet, beschreibt intermittierende Fehler, die sich in der nächsthöheren Ebene der Instandhaltung nicht nachstellen und folglich auch nicht beheben lassen [1]. Als NFF diagnostizierte Komponenten oder Subsysteme wurden somit mindestens einmal im Betrieb als fehlerhaft diagnostiziert und der Instandhaltung zugeführt. Dort konnte der Fehler dann nicht reproduziert werden und die Komponente geht in der Regel in den Betrieb zurück. Die betroffene Komponente wird dann häufig unmittelbar nach dem Wiedereinbau (*Dead*

on Arrival (DOA)) oder nach kurzer Zeit erneut fehlerhaft diagnostiziert, wie in Bild 1 dargestellt.

Um dem Problem Herr zu werden existieren pragmatische Ansätze, die insbesondere aus dem Verteidigungssektor bekannt werden. Zu den inoffiziellen Lösungen zählen beim Instandhaltungspersonal geführte Listen von Komponenten, die nach Rücklieferung nicht verbaut werden („Rogue Unit List“), sondern sofort schadhaft gemeldet werden sowie erhöhte Vorratshaltung von Ersatzteilen. Beide Verfahren führen offensichtlich zu erhöhten Kosten für den Betrieb der Systeme.

Zu den offiziellen Ansätzen zur Minderung des NFF-Problems zählen spezifisch angepasste Prüfstände der *Ebene n+1*, so werden zur Diagnose von Leistungselektroniken an Kampfflugzeugen beispielsweise elektrodynamische Shaker in Klimakammern genutzt. Damit sollen Fehler, die nach Aussage des Flugpersonals nur in größerer Höhe bei hoher Beschleunigung auftreten, gefunden werden.

Das NFF-Problem ist seit längerer Zeit Inhalt der Forschung in den Sektoren Luft- und Raumfahrt sowie Elektronik. Im Bereich Luft- und Raumfahrt bestehen Schätzungen, dass bereits vor 20 Jahren ca. 100 000 \$ Instandhaltungskosten pro Flugzeug jährlich auf NFF zurückzuführen sind [2]. Das US Verteidigungsministerium schätzt die jährlichen Kosten durch NFF auf 2 bis 10 Mrd. Dollar. Aus dem Bahnbereich bestehen keine Schätzungen zu Kosten durch NFF an Fahrzeugen, jedoch weisen



Prof. Dr. Raphael Pfaff

Lehrgebiet Schienenfahrzeugtechnik an der FH Aachen, geschäftsführender Gesellschafter der RailCrowd GmbH
pfaff@fh-aachen.de



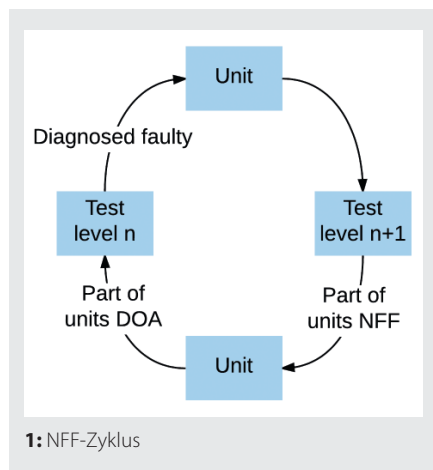
Dipl.-Ing. (FH) Lars Gidaszewski

Leiter Inspektionsstelle bei IGT – Inbetriebnahmegesellschaft Transporttechnik mbH
lars.gidaszewski@igt-bahn.de



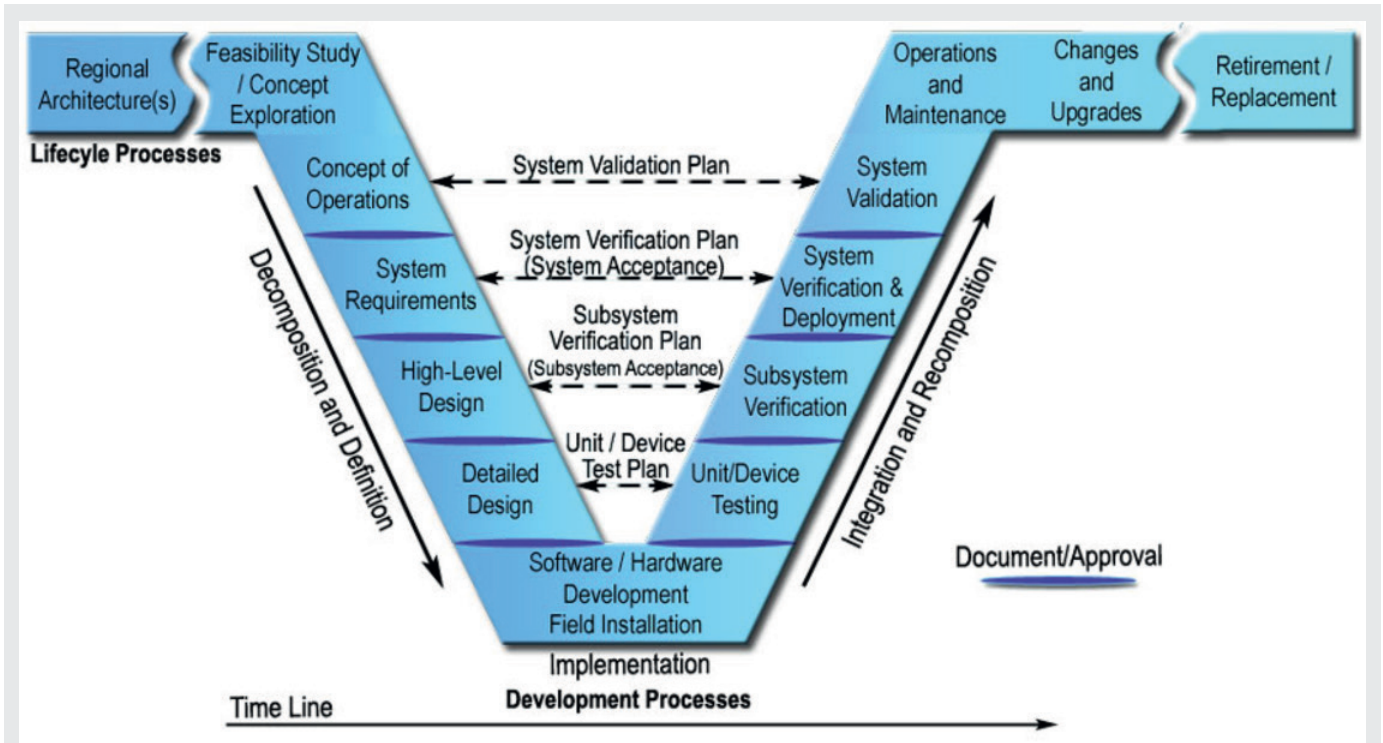
Prof. Dr.-Ing. Bernd Schmidt

Lehrgebiet Bahnantriebe an der FH Aachen, geschäftsführender Gesellschafter der RailCrowd GmbH
b.schmidt@fh-aachen.de



mehr als 10% der Fehler im Signalsystem Großbritanniens auf NFF als Ursache hin [3].

Das NFF-Phänomen betrifft auch Schienenfahrzeuge und deren Subsysteme, jedoch sind den Autoren hierzu keine Veröffentlichungen bekannt. Möglicherweise liegt das an der Konkurrenzsituation der Fahrzeughersteller und Systemlieferanten, denkbar ist jedoch auch eine Zensur der Informationen vor dem Hintergrund der



2: V-Model für intelligente Verkehrssysteme

Quelle: US DoT, Public Domain

Zulassungsbehörden, wie in [4] für die Automobilindustrie in Betracht gezogen.

Das Phänomen NFF reduziert beim derzeitigen Stand der Technik, also Betrieb und Instandhaltung der Fahrzeuge zum größten Teil durch menschliches Personal, die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Es ist zu erwarten, dass ein Betrieb mit reduzierter Einbindung von Personal weniger robust auf NFF reagiert. Der Weiterbetrieb des Fahrzeugs oder die erweiterte Diagnose kann nicht durch menschliche Entscheidung oder Beobachtung unterstützt werden, anderenfalls wäre ein Testsystem der Stufe $n+1$ im Fahrzeug installiert und das Problem würde auf dieser Stufe weiterbestehen.

Im vorliegenden Beitrag wird NFF aus der Perspektive des System Engineering betrachtet sowie ein Vorschlag zur Optimierung der Fehlerdiagnostik durch lernende Fehlermeldungen dargestellt.

NFF aus der Perspektive des System Engineerings

System Engineering im Bahnbereich wird entscheidend durch ein Vorgehen im V-Modell sowie vertraglich zugesicherte Eigenschaften gemäß technischen Spezifikationen bestimmt. Ein V-Modell mit

Erweiterungen zur Abbildung des Lebenszyklus z. B. von Schienenfahrzeugen zeigt Bild 2.

Häufig werden bereits in der Konzeptionsphase die Anforderungen an die Subsysteme definiert und, da sie Bestandteil der Vertragsverhandlungen mit Kunden und Lieferanten sind, nicht oder nur sehr zurückhaltend aktualisiert. Der Lieferant der Subsysteme arbeitet damit an einer der Konzeptionsphase entstammenden Anforderungsdokumentation; es werden nur in seltenen Fällen wirtschaftliche Anreize geschaffen, die Anforderungen im Lebenszyklus anzupassen.

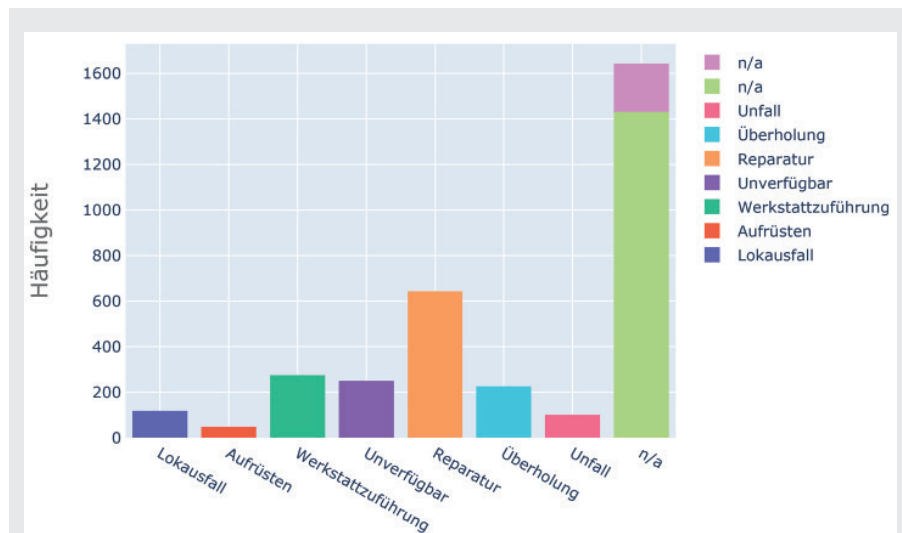
Damit ist die gesamte rückgelagerte Instandhaltungskette, also zum Beispiel Werkstatt-Testeinrichtungen, aber auch die Diagnose-Funktionalität, auf diese abweichenden Anforderungen ausgelegt. Geringe Abweichungen in den Randbedingungen der Funktion, zum Beispiel durch Spannungsschwankungen, können in den Entwicklungsprozessen der Hersteller nicht (oder nur auf eigene Kosten und Risiko) berücksichtigt werden. Diese haben dann aber das Potenzial, zu Fehlermeldungen im Fahrzeug zu führen, die mit den Testeinrichtungen der nächsthöheren Instandhaltungsstufe nicht reproduziert werden können.

Daher sollten bei den Kosten für sogenannte *Change Requests* auf beiden Seiten die Kosten für Prüfeinrichtungen wie auch die Einsparungen durch eine Reduzierung von NFF kalkuliert werden. Ebenfalls sollten auch während der Lebensdauer des Fahrzeugs die Anforderungen aktualisiert werden, obwohl auch dies üblicherweise vertraglich nicht mehr verpflichtend ist.

Entwicklung von Diagnosemeldungen

Eine weiterer Faktor der zu einer erhöhten Zahl an NFF-Fällen führen kann, sind Diagnosemeldungen. Diese Meldungen werden häufig auf der Basis der zur Konzeptphase festgelegten Anforderungen

Intermittierende und nicht reproduzierbare Fehler, auch als No Fault Found bezeichnet, treten in praktisch allen Bereichen auf und sorgen für hohe Kosten.



3: Fehlerklassen aus den Werkstattaufträgen einer Fahrzeugflotte

erstellt und bilden so nur einen Teil der im Betrieb vorgefundenen Randbedingungen ab. Bild 3 zeigt die aufgezeichneten Fehlerdaten aus einem Jahr des Betriebs einer Lokomotivflotte. Es zeigen sich deutlich die vom Instandhaltungspersonal als ungeeignet betrachteten Fehlerklassen, so werden nahezu 50% der Fehler als *not applicable* (n/a) klassifiziert.

Ein Ansatz zur Erzeugung nutzbringender Diagnose-Informationen ist die Erzeugung der Fehlerklassen zur Lebensdauer des Fahrzeugs (oder der Fahrzeugflotte) mittels eines *Decision Tree*-Algorithmus' [5]. *Decisions Trees* (DTrees) sind für diese Aufgabe besonders geeignet, da sie

- einfach zu verstehen und interpretieren sind,

- numerische und kategorische Daten verarbeiten können,
- einen *White Box*-Ansatz nutzen, d.h. ihre Klassifizierungen für den Menschen nachvollziehbar sind und
- in ihrer Vorgehensweise ähnlich wie Menschen operieren.

Eine Herausforderung in der Entwicklung eines DTree-basierten Diagnosesystems ist die Entwicklung eines Ähnlichkeitsmaßes, das im Verlauf des Algorithmus zum Stutzen des Baums benötigt wird. Ein Ähnlichkeitsmaß kann beispielsweise die Distanz der betroffenen Komponente gemäß DIN EN 15380 sein. Darüber hinaus ist aber auch eine Nutzung der natürlichsprachlichen Fehlermeldungen möglich oder eine Kombination aus beiden Informationen.

```

Data: Sammlung von Fehlertexten
Result: Nach Ähnlichkeit geclusterte und reduzierte Liste
for Alle Fehlermeldungen do
  | Vokabular feststellen
end
for Alle Fehlermeldungen do
  | One-Hot-Encoding der Vokabelnutzung bilden
end
for Alle Fehlermeldungen do
  | for Alle anderen Fehlermeldungen do
  | | Distanz der Vokabelnutzungsvektoren bestimmen
  | end
end
while Distanz < minDist do
  | Fehlertexte mergen
end

```

4: Algorithmus zur Gewinnung von Fehlertexten aus Fehlermeldungen

Neben dem Ähnlichkeitsmaß ist ebenfalls die Ausführung der Vereinigungsoperationen der benachbarten Fehlermeldung entscheidend für das Ergebnis und nach Ansicht der Autoren nicht ohne weiteres zu automatisieren.

Es werden idealerweise nicht nur die üblichen Informationen über betroffene Komponenten gesammelt, sondern darüber hinaus auch verfügbare Statusinformationen, wie beispielsweise Betriebszustände und Spannungsniveaus aufgezeichnet. Hiermit lassen sich dann weitere Einblicke in die Fehlerzustände generieren.

Vorgeschlagener Algorithmus

Es werden zu Beginn alle Fehlermeldungen als eigene Klasse betrachtet, d.h. jede Fehlermeldung wird individuell betrachtet. Nach einiger Zeit im Betrieb sammeln sich so die Fehlermeldungen und es bilden sich erste für das Instandhaltungspersonal wahrnehmbare Häufungen. Diese können dann einem *Pruning*-Algorithmus zugeführt werden, der den Entscheidungsbaum durch Zusammenfassen ähnlicher Fehlermeldungen zu Klassen vereinfacht. In der praktischen Umsetzung müssen zur Aufnahme des Betriebs die regulatorisch geforderten Diagnosemeldungen umgesetzt sein. Der Algorithmus ist in Bild 4 dargestellt.

Da üblicherweise im Betrieb mit zunehmendem Alter der Fahrzeugflotte sich ändernde Fehlerbilder auftreten, kann durch Hinzufügen dieser neuen Fehler sowie erneutem Stutzen des erweiterten Baums das Diagnosesystem mitlernen. Durch angepasste Diagnosemeldungen können kostspielige Diagnose- und Reproduktionsprobleme reduziert werden, also insbesondere das Auftreten von NFF.

Darüber hinaus werden durch diesen Algorithmus die Klassen an Fehlermeldungen betriebsnah gewählt, damit werden unpassende Klassifizierungen wie in Bild 3 gezeigt reduziert.

Beispielhafte Ergebnisse

Die Anwendung des Algorithmus wurde an 5000 zufällig ausgewählten Werkstattaufträgen für eine Triebzugflotte getestet. Die Daten verfügen ausschließlich über einen Fehlertext in natürlicher Sprache. Diese wurden im Sinne des Bild 4 auf das verwendete Vokabular untersucht und jede Fehlerbeschreibung durch „One-Hot-Encoding“, also 1 oder 0 setzen als Ausdruck für Term

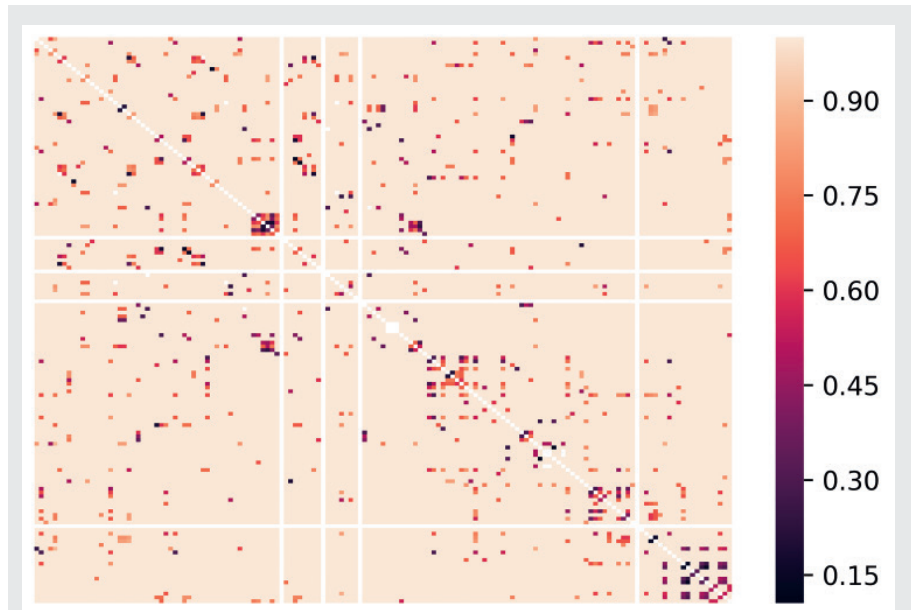
vorhanden bzw. nicht vorhanden, in einen Vektor überführt. Diese Vektoren können wechselseitig auf ihren Abstand geprüft werden. Es entsteht so eine Entfernungsmatrix, wie in Bild 5 für einen kleineren Beispieldatensatz exemplarisch gezeigt. Das Element d_{ij} zeigt dabei den Abstand zwischen Fehlertexten i und j an.

Das Clustering mit Hilfe der Kosinus-Distanz ergibt für ähnliche Texte kleine Werte, für disjunkte Texte den Abstand 1. In Bild 5 wird offensichtlich, dass sich Häufungen und Muster bilden, die dann dem Algorithmus zum Merge zugeführt werden. Drei Beispiele für Merges zeigt Bild 6.

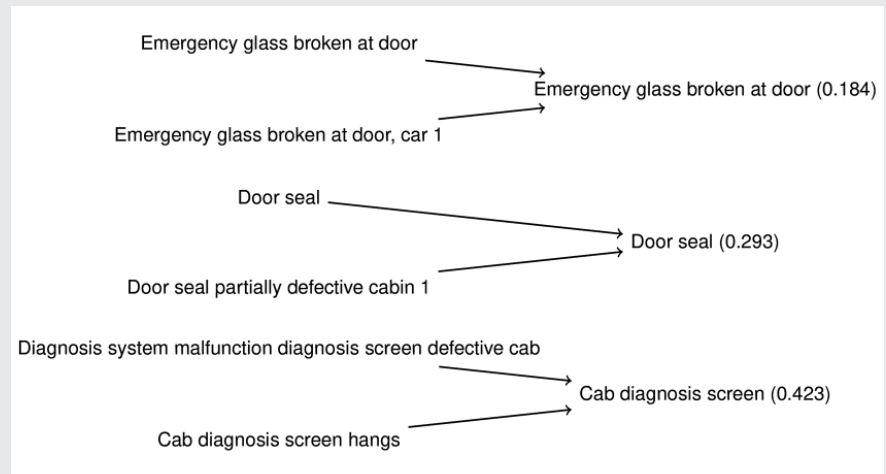
Fazit und Ausblick

Das Phänomen NFF wird im Bereich Schienenfahrzeuge praktisch nicht erforscht, im Bereich der Zugsicherungssysteme liegen wenige Veröffentlichungen vor. Aus der Erfahrung in vergleichbaren Sektoren, die sich mit der Beobachtung der Autoren deckt, ist zu erwarten, dass ein signifikanter Anteil der Instandhaltungsaktivitäten in der Schienenfahrzeugtechnik auf NFF zurückzuführen ist. Eine Ausweitung der Forschungsaktivitäten erscheint schwierig, da die regulatorische wie auch die Wettbewerbssituation dies nicht fördern.

Daher wird ein lernfähiges System der Anforderungsverwaltung und der technischen Diagnose vorgeschlagen, das NFF-Vorfälle reduzieren kann. Zu den weiteren Schritten in der Entwicklung eines solchen lernfähigen Systems gehören die vertragliche Ausgestaltung,



5: Entfernungsmatrix nach Kosinus-Distanz. Weiße Felder zeigen verworfene triviale Maße



6: Drei beispielhafte Merges, in Klammern der gemessene Abstand der beiden Ausgangstexte

Literatur

[1] Roozbeh Bakhshi, Surya Kunche, and Michael Pecht. Intermittent failures in hardware and software. *Journal of Electronic Packaging*, 136(1):11 – 14, 2014
 [2] Robert M. Knotts. Civil aircraft maintenance and support fault diagnosis from a business perspective. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 5(4):335 – 348, 1999.
 [3] FB Zhou, MD Duta, MP Henry, S Baker, and C Burton. Remote condition monitoring for railway point machine. In *ASME/IEEE Joint Railroad Conference*, pages 103 – 108. IEEE, 2002.
 [4] Samir Khan, Paul Phillips, Ian Jennions, and Chris Hockley. No fault found events in maintenance engineering part 1: Current trends, implications and organizational practices. *Reliability Engineering & System Safety*, 123:183 – 195, 2014.
 [5] Breiman, L. *Classification and regression trees*. Routledge, 2017.

die im Rahmen von Betriebs- und Wartungsverträgen erfolgen kann und die Weiterentwicklung eines angemessenen Ähnlichkeitsmaßes sowie die Entwick-

lung von Pruning-Algorithmen, die die Einbeziehung von Heuristiken zulassen und gewisse Verzweigungen des DTrees konstant halten.

Summary

Consideration of No Fault Found in diagnosis and maintenance systems of rail vehicles

Intermittent and non-reproducible failures, also called No Fault Fund, occur in almost all areas and produce high costs. These are often due to imprecise failure description. In the present article, adjustments to the approach in the development and adaptation of the diagnostic system are supposed. An algorithm is presented which determines a structure on the basis of individual error messages by clustering.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für FH Aachen / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DW Media Group GmbH 2020