

**Inhalt**

	Seite
Vorwort .....	2
Einleitung .....	6
1 Anwendungsbereich .....	6
2 Normative Verweisungen .....	7
3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen .....	7
3.1 Begriffe .....	7
3.2 Symbole und Abkürzungen .....	9
4 Allgemeine Beschreibung von Petrinetzen .....	11
4.1 Zeitlose Low-level-Petrinetze .....	11
4.2 Zeitbehaftete Low-level-Petrinetze .....	11
4.3 High-level-Petrinetze .....	12
4.4 Erweiterungen von Petrinetzen und Modellieren mit Petrinetzen .....	12
5 Zuverlässigkeitsmodellierung und -analyse mit Petrinetzen .....	14
5.1 Die auszuführenden Schritte im Allgemeinen .....	14
5.2 Die durchzuführenden Schritte im Detail .....	15
6 Verhältnis zu anderen Modellen der Zuverlässigkeit .....	20
Anhang A (informativ) Struktur und Dynamik von Petrinetzen .....	21
Anhang B (informativ) Verfügbarkeit einer m-von-n-Redundanz .....	32
Anhang C (informativ) Abstraktes Beispiel .....	37
Anhang D (informativ) Modellierung typischer Zuverlässigkeitskonzepte .....	41
Anhang E (informativ) Beispiel Bahnübergang .....	43
Literaturhinweise .....	61
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen .....	64
<b>Bilder</b>	
Bild 1 – Gewichtete Inhibitorkante .....	12
Bild 2 – Stelle $p$ ist eine multiple Stelle .....	13
Bild 3 – Markierung von $p$ nach Schalten von Transition $t$ .....	13
Bild 4 – Die Aktivierung von $t$ hängt von $V$ ab .....	13
Bild 5 – Die Methode besteht im Wesentlichen aus den Schritten „Modellieren“, „Analysieren“ und „Darstellen“ .....	14
Bild 6 – Prozess der Zuverlässigkeitsmodellierung und -analyse mit Petrinetzen .....	14
Bild 7 – Modellierungsstruktur in Bezug auf die zwei Hauptkomponenten „Strecke“ und „Steuerung“ mit Modellen ihrer Funktionen und Zuverlässigkeiten .....	17
Bild 8 – Angabe der Analysemethode in Abhängigkeit vom PN-Modell .....	19
Bild A.1 – „Zustand-Transitions“-Zyklus der Verfügbarkeit einer Komponente .....	21
Bild A.2 – Transition „Ausfall“ (en: failure) ist aktiviert .....	22
Bild A.3 – Stelle „Fehlzustand“ (en: faulty) wird durch Schalten von „Ausfall“ markiert .....	22
Bild A.4 – Transition „Element <sub>1</sub> Instandhaltung“ ist aktiviert .....	23
Bild A.5 – Das Token auf Stelle „Instandhaltungspersonal verfügbar“ wird nicht abgezogen .....	23

	Seite
Bild A.6 – Transition ist nicht aktiviert .....	23
Bild A.7 – Markierung vor dem Schalten .....	23
Bild A.8 – Markierung nach dem Schalten .....	23
Bild A.9 – Ein Petrinetz mit Anfangsmarkierung .....	24
Bild A.10 – Der zugehörige Erreichbarkeitsgraph .....	24
Bild A.11 – Transitionen „Element <sub>ip</sub> Instandsetzung“ und „Element <sub>hp</sub> Ausfall“ sind aktiviert .....	25
Bild A.12 – Markierung nach Schaltung der Transition „Element <sub>ip</sub> Instandsetzung“ .....	26
Bild A.13 – Ein zeiterweitertes PN mit exponentialverteilten, zeitbehafteten Transitionen .....	27
Bild A.14 – Der zugehörige stochastische Erreichbarkeitsgraph .....	27
Bild A.15 – Petrinetz mit zeitbehafteten Transitionen .....	28
Bild B.1 – Verfügbarkeitsnetze zweier Komponenten mit spezifischen Ausfall- und Instandsetzungsraten ...	32
Bild B.2 – Stochastischer Erreichbarkeitsgraph zu Bild B.1 mit globalen Zuständen ( $\bar{c}_1$ ist Abkürzung für „Element <sub>1</sub> Fehlzustand“)	32
Bild B.3 – Verfügbarkeitsnetze dreier Komponenten mit spezifischen Ausfall- und Instandsetzungsraten ....	32
Bild B.4 – Stochastischer Erreichbarkeitsgraph zu Bild B.3 mit globalen Zuständen ( $\bar{c}_1$ ist Abkürzung für „Element <sub>1</sub> Fehlzustand“)	33
Bild B.5 – Spezifisch verbundenes 1-aus-3-Verfügbarkeitsnetz .....	33
Bild B.6 – Spezifisch verbundenes 2-aus-3-Verfügbarkeitsnetz .....	34
Bild B.7 – Spezifisch verbundenes 2-aus-3-Verfügbarkeitsnetz .....	34
Bild B.8 – Stochastischer Erreichbarkeitsgraph mit System-spezifischen „operating“-Zuständen .....	35
Bild B.9 – Spezifisch verbundenes 1-von-3-Funktionsfähigkeitsnetz .....	35
Bild B.10 – Erreichbarkeitsgraph für das Netz aus Bild B.9 .....	35
Bild B.11 – Spezifisch verbundenes 2-von-3-Funktionsfähigkeitsnetz .....	36
Bild B.12 – Erreichbarkeitsgraph für das Netz aus Bild B.11 .....	36
Bild B.13 – Spezifisch verbundenes 3-von-3-Funktionsfähigkeitsnetz .....	36
Bild B.14 – Erreichbarkeitsgraph für das Netz aus Bild B.13 .....	36
Bild C.1 – Verfügbarkeitsmodellierung einer einzelnen Komponente .....	37
Bild C.2 – Stochastischer Erreichbarkeitsgraph des Netzes aus Bild C.1 mit seinen globalen Zuständen und aggregierten globalen Zuständen in Bezug auf Verfügbarkeit und Sicherheit .....	37
Bild C.3 – Grundlegendes Konzept zur Modellierung von Funktionsfähigkeit und Funktion .....	38
Bild C.4 – Allgemeines hierarchisches Netz mit Supertransition zur Funktionsfähigkeitsmodellierung .....	39
Bild C.5 – Allgemeines hierarchisches Netz mit Supertransition und -stellen zur Funktionsfähigkeitsmodellierung .....	39
Bild C.6 – Allgemeines hierarchisches Netz mit Supertransitionen zur Verfügbarkeitsmodellierung .....	39
Bild C.7 – Allgemeines hierarchisches Netz mit Supertransitionen und -stellen .....	40
Bild E.1 – Anwendungsbeispiel eines Bahnübergangs und seiner Sicherungseinrichtung .....	43
Bild E.2 – Hauptbestandteile des Bahnübergangmodells .....	44
Bild E.3 – Teilmodelle des Bahnübergangmodells .....	45
Bild E.4 – PN-Modell des Straßen- und Schienenverkehrsprozesses .....	46
Bild E.5 – PN-Modell der Verkehrsprozesse und Verkehrsprozesszuverlässigkeit .....	47

	Seite
Bild E.6 – PN-Modell der Verkehrsprozesse mit einer idealen Sicherungsfunktion.....	48
Bild E.7 – PN-Model des Bahnübergangsbeispiels.....	49
Bild E.8 – Zusammengefasste Messergebnisse des Straßenverkehrs an einem bestimmten Bahnübergang: Erhebung der Zwischenankunftszeit von zwei Autos.....	50
Bild E.9 – Angenäherte Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion, basierend auf den Werten aus Bild E.8.....	51
Bild E.10 – Gemessene Aufenthaltsdauern von Straßenfahrzeugen in der Gefahrenzone des Bahnübergangs.....	51
Bild E.11 – Approximierte Wahrscheinlichkeitsfunktion der Aufenthaltsdauern von Straßenfahrzeugen in der Gefahrenzone des Bahnüberganges, basierend auf den Werten aus Bild E.10.....	52
Bild E.12 – Aggregierter Erreichbarkeitsgraph und Informationen über entsprechende Zustände.....	57
Bild E.13 – Ergebnisse der quantitativen Analyse zeigen die durchschnittliche Verfügbarkeit des Bahnübergangs für Straßennutzer in Abhängigkeit von der Rate gefährlicher Ausfälle der Sicherungseinrichtung für verschiedene Annäherungszeiten $T_{AC}$ .....	58
Bild E.14 – Ergebnisse der quantitativen Analyse zeigen das individuelle Risiko der Bahnübergangsnutzer in Abhängigkeit von der Rate gefährlicher Ausfälle der Sicherungseinrichtung für verschiedene Annäherungszeiten $T_{AC}$ .....	59
Bild E.15 – Verfügbarkeits-Sicherheits-Diagramm, beruhend auf den Ergebnissen der Modellanalyse aus Bild E.13 und Bild E.14.....	59
<b>Tabellen</b>	
Tabelle 1 – Symbole in zeitlosen Petrinetzen.....	9
Tabelle 2 – Zusätzliche Symbole in zeitbehafteten Petrinetzen.....	9
Tabelle 3 – Symbole für hierarchische Modellierung.....	10
Tabelle 4 – Sich entsprechende Begriffe in Systemen, Petrinetzen und RAMS.....	14
Tabelle 5 – Verbindliche und empfohlene Bestandteile der Dokumentation.....	20
Tabelle A.1 – Entsprechende Bezeichnungen in Systemen, Petrinetzen und Erreichbarkeitsgraphen.....	25
Tabelle A.2 – Stellen und Transitionen mit Belohnung.....	31
Tabelle D.1 – Zuverlässigkeitskonzepte und ihre PN-Modellierungsstrukturen.....	41
Tabelle D.2 – Modellierung von Kosten mittels Zuständen und Ereignissen.....	42
Tabelle E.1 – Auto-bezogene Stellen im Teilmodell „Verkehrsprozess“.....	50
Tabelle E.2 – Straßenverkehrsbezogene Transitionen im Teilmodell „Verkehrsprozess“ und „Traffic Dependability“.....	53
Tabelle E.3 – Schienenverkehrsbezogene Stellen im Teilmodell „Verkehrsprozess“.....	53
Tabelle E.4 – Schienenverkehrsbezogene Transitionen im Teilmodell „Verkehrsprozess“.....	54
Tabelle E.5 – Stellen im Teilmodell „Verkehrszuverlässigkeit“.....	54
Tabelle E.6 – Transitionen im Teilmodell „Verkehrszuverlässigkeit“.....	55
Tabelle E.7 – Stellen im Teilmodell „Kontrollfunktion“.....	55
Tabelle E.8 – Transitionen im Teilmodell „Kontrollfunktion“.....	55
Tabelle E.9 – Stellen im Teilmodell „Zuverlässigkeit von leittechnischen Einrichtungen“.....	56
Tabelle E.10 – Transitionen im Teilmodell „Zuverlässigkeit von leittechnischen Einrichtungen“.....	56
Tabelle E.11 – Spezifikation von booleschen Bedingungen, um Zustände zu aggregierten Zuständen zusammenzufassen.....	58