

Metamodelle in einem cyber-physikalischen System

Ralf Hoffmann

Phoenix Contact Electronics GmbH

Abstract:

The fundamental driver of this solution is the chance to determine the behavior (e.g. the lifetime) of safety relays by combining a simulation model of the whole system with the real data of an operating elementary relay in a cyber-physical system. This combination allows a failure prediction of the whole electromechanical system and appropriate preventive measures based on simulation results. Different physical domains, e.g. electrical/electronic, mechanical, magnetic, thermal and software/firmware, are implemented in this cyber physical model. The parameter of the relay and other elements of sophisticated effects, like magnetic field behavior and electrical contact lifetime, are represented by Metamodels of Optimal Prognosis (MOP) used as Functional Mockup Units (FMUs). The combination of measured values from the operating relay and the analyzed or derived values generated with the model are used as input parameters of different FMUs. In one application, monitored result can be obtained as an indication to initialize predictive maintenance for the prevention of unexpected failure. Additionally, monitored results of the FMU, e.g. electrical lifetime, can be used as result parameters to optimize measured system data and to achieve better results (e.g. electrical lifetime) by the variation of parameters of the model.

Keywords: Cyber physical Model, Relay, Simulation, Electrical Lifetime, Magnetic field, Armature position, Metamodel of Optimized Prognosis

1 Einleitung

Sicherheitsschaltgeräte werden in vielen Bereichen eingesetzt. Im industriellen Umfeld sind dies z.B.:

- Zweihand Bedienung
- Not-Halt
- Überwachung einer Schutztür

Ein wesentlicher Bestandteil vieler Sicherheitsschaltgeräte sind Relais mit zwangsgeführten Kontakten nach EN 50205, bei denen die Eigenschaft der Zwangsführung zur Fehlererkennung genutzt wird. Bedingt durch die Schaltfunktion des Relais und den damit verbundenen Verschleiß des Lastkontaktes kann es zum Ausfall des Relais kommen. Der Ausfall des Relais führt auf Grund der redundanten Anordnung und weiterer interner Sicherheitsfunktionen zu keinem gefährlichen Zustand, das System wird allerdings abgeschaltet und ist damit nicht mehr verfügbar. Wenn der Ausfall unerwartet erfolgt, kann es zu Folgeabschaltungen kommen und damit zu weiteren Funktionsausfällen. In verketteten Automatisierungslinien kann somit z.B. bei Ausfall einer einzelnen Komponente eine ganze Fertigungslinie zum Stillstand kommen. Es ist daher zweckmäßig, einen bevorstehenden Ausfall möglichst genau zu prognostizieren und die Anlage im Rahmen eines normalen Betriebszustandes einer Wartung (z.B. Austausch der verschlissenen Komponente) zu unterziehen. In anderen Anwendungsfällen führt ein Ausfall zu Kosten, die bei Ausfall vertraglich zugesicherter Leistungen (z.B. Windkraftanlagen) anfallen.

Das Verhalten eines Relais in einem Schaltgerät kann mittels Systemsimulation dargestellt werden. Dabei werden die physikalischen Domänen Mechanik, Elektromagnetik und Temperatur mittels FEM berechnet. Die daraus abgeleiteten Modelle reduzierter Ordnung werden in die Systemsimulation übertragen und auf Systemebene gekoppelt.

Das Verhalten der Firmware (Software) des Schaltgerätes wird mittels Functional Mockup Unit (FMU) auf Systemebene abgebildet. Die empirischen Modelle von z.B. Kontaktwiderstand, Lichtbogen Spannung können auf Systemebene mit der Programmiersprache VHDL-AMS in Funktionsblöcken dargestellt werden. Problematisch ist bisher die Einbindung des Verschleißverhaltens der schaltenden elektrischen Kontakte des Relais. Die genaue Kenntnis der Last- und Umgebungsbedingungen ist oftmals nicht gegeben, sodass die Lebensdauer des Systems auf Basis statistischer Versuchsdaten und unter Annahme der kritischsten Last- und Umgebungsbedingungen erfolgt. Ebenfalls problematisch ist die Ermittlung der mechanischen Kennwerte des schaltenden Relais im Gerät, da diese üblicherweise am offenen, frei zugänglichen Relais gemessen werden, im Betrieb das Relais aber gekapselt ist.

In einem cyber-physischen System werden das Schaltgerät und das Simulationsmodell gekoppelt und Daten ausgetauscht. Basierend auf diesen Daten erfolgt im Simulationsmodell eine Analyse des Verhaltens des Gerätes. Das Ergebnis dieser Analyse kann für darauf basierende Maßnahmen genutzt werden.

2 Begriffe, Definitionen

Cyber-physisches System

Ein cyber-physisches System ist ein Verbund informatischer und mechatronischer Teile, die über eine Dateninfrastruktur kommunizieren (VDI 2013). In der Referenzarchitektur Industrie 4.0 (Abk.: RAMI 4.0) sind cyber-physische Systeme wie folgt definiert (BMW 2016; IEC 62890): Implementierung einer (standardisierten) Kommunikations- und Systeminfrastruktur mit erforderlichen Management- und Produktivdiensten und definierten QoS (Quality of Service)-Eigenschaften als Basis für den effizienten Aufbau und die Integration von I4.0-Systemen in einer Anwendungsdomäne. Daher sind cyber-physische Systeme in allen Bereichen der Wertschöpfungskette denkbar, z.B. Marketing, Produktentwicklung, Tests, Produktion, Vertrieb, Kundenbetreuung, Einsatz/Betrieb (Applikation) oder Retourenmanagement. Typische Anwendungen sind „Smart Grids“, d.h. Systeme zur Energieerzeugung werden über IT-Netze gekoppelt, um die Funktion zu optimieren oder die Kommunikation „Car-toX“ – die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander sowie mit zentralen Systemen wie z.B. Hersteller, Verkehrsinfrastruktur (VDI 2013). Das im vorliegenden Anwendungsfall entwickelte cyber-physische System betrifft den Bereich der Kopplung von Produkt- und Produktionssystemen beim Anwender.

3 Ziel, Lösungsansatz

Das Ziel der vorliegenden Anwendung besteht darin, an einem Verhaltensmodell eines Sicherheitsschaltgerätes die Kontaktlebensdauer des Relais NSR01 der Fa. Phoenix Contact Electronics GmbH zu ermitteln und diese Information für den Benutzer bereitzustellen. Dies ermöglicht die Vorhersage von Fehlern.

Die Realisierung erfolgt durch die Verknüpfung eines Simulationsmodells des Schaltgerätes mit dem real schaltenden Relais im Gerät mittels einer Datenschnittstelle. Zu diesem Zweck wird ein Simulationsmodell des gesamten Schaltgerätes erstellt, welches durch eine Datenschnittstelle mit dem real schaltenden Relais in einem Schaltgerät verbunden wird und die gemessenen Kennwerte an das Simulationsmodell überträgt. Das Simulationsmodell wird typischerweise aus im Rahmen der Entwicklung erstellten Simulationsmodellen des Relais abgeleitet. Als Software wird der Simplorer (Electronics) der Fa. ANSYS Inc. verwendet. Da die transiente Kopplung von FEM-Modellen sehr aufwendig ist und zu hohen Rechenzeiten führt, ist eine Nutzung als echtzeitfähiges mit einem Gerät gekoppeltes Systemmodell nicht praktikabel. Im Simulationsmodell sind die verschiedenen physikalischen Domänen durch jeweils abgeleitete Einzelmodelle dargestellt, die auf Systemebene gekoppelt sind. Neben den mittels FEM oder Systemsimulation abbildbaren physikalischen Domänen sind Eigenschaften wie z.B. Kontaktwiderstand oder Lichtbogenspannung durch experimentell ermittelte empirische Zusammenhänge dargestellt.

Die Elektrische Lebensdauer der Relais wird unter Laborbedingungen für verschiedene Lastbereiche in Abhängigkeit von den Relaiskennwerten und weiteren Umgebungsbedingungen (Temperatur, Betriebsspannung, Einbaulage...) ermittelt.

Aus den Testergebnissen und den dabei gemessenen Kennwerten werden Metamodelle erstellt, die im Simulationsmodell die Lebensdauer in den betreffenden Lastbereichen abbilden. Die mechanischen Parameter des Relais im Schaltgerät werden mittels Messung des Magnetfeldes und des Spulenstromes ermittelt und dienen dazu, zusammen mit anderen gemessenen Parametern die verbleibende Lebensdauer des Relais zu prognostizieren. (Abb. 1)



Abbildung 1: Verknüpfung eines Simulationsmodells mit einem real schaltenden Relais NSR

4 Physikdomänen im Relais und Simulationmethoden

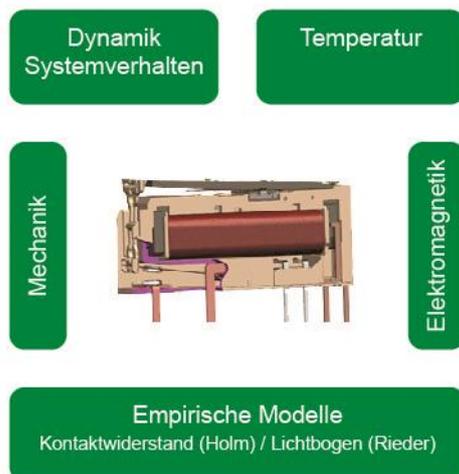


Abbildung 2: Physikdomänen eines Relais

4.1 Mechanik

Die Simulation der mechanischen Parameter erfolgt mittels FEM (ANSYS). Damit können für die verschiedenen mechanischen Komponenten eines Relais (z.B. Kontaktfedern, Ankerlagerfedern, Haltefedern, Rückstellfedern, Übertragungselemente usw.) mittels statischer und transienter (zeitabhängiger) Simulation die Bewegungsabläufe, Kraft- und Belastungsverhältnisse ermittelt werden. Die Übertragung der Bewegungsverhältnisse (Weg - Zeit) in ein Systemmodell erfolgt mittels Transformation der Eigenfrequenzmodi der zu betrachtenden Punkte (Knoten) in einer Matrix (Space State Matrices) und dem anschließenden Export über eine spm-Datei. Dabei können nur lineare Zusammenhänge transformiert und übertragen werden. Zur Abbildung des komplexen mechanischen Systems eines Relais wird es in einzelne lineare Teile zerlegt, die auf Systemebene mit entsprechenden Kopplungselementen verbunden werden.

4.2 Elektromagnetik

Die Simulation der Elektromagnetik erfolgt mittels FEM. Dabei kann auf die Kopplung des komplexen FEM-Modells verzichtet werden, wenn parasitäre Effekte (Wirbelströme, Eisenverluste usw.) nur eine untergeordnete Rolle spielen. Im Fall von elektromechanischen Klein-Relais ist dies der Fall. Anstelle der Kopplung der FEM-Modelle mit Kosimulation werden mittels der FEM-Simulation des Magnetsystems die generalisierten Kräfte aus der Kopplung der magnetischen Koenergie und der verketteten Flüsse berechnet. Dabei wird aus einer Vielzahl von Arbeitspunkten (Drehwinkel / Hub und elektrische Erregung mittels Ableitung der magnetischen Koenergie) über den Winkel / Hub die Drehmomente / Kräfte des Systems in einem Kennfeld dargestellt. In diesem Kennfeld (ECE-Modell) wird das Übertragungsverhalten des Magnetsystems zwischen den Arbeitspunkten interpoliert. Durch die Verkettung der magnetischen Koenergie mit dem mechanischen Teil mittels des verketteten Flusses sind auch mechanische Rückwirkungen auf das magnetisch-elektrische System berücksichtigt.

4.3 Temperatur

Die thermischen Zusammenhänge im Relais lassen sich gut mittels analytischer Formeln in Verbindung mit gemessenen Kennwerten darstellen. Auf Systemebene werden die thermischen Zusammenhänge mit numerischen Blöcken abgebildet.

4.4 Dynamik / Systemverhalten

Die Dynamik des Relais wird in dem Simulationsmodell mit der transienten Kopplung der einzelnen Teilsysteme (mechanisch, magnetisch, thermisch) abgebildet.

4.5 Kontaktwiderstand, Schaltlichtbogen

Für einige charakteristische Kennwerte von Relais, z.B. Kontaktwiderstand des schaltenden Kontaktes, Lichtbogenspannung des öffnenden Kontaktes usw. werden empirisch ermittelte

Formeln (Holm, Rieder) verwendet. Damit können die elektrischen Kennwerte (Strom, Spannung) des Lastkreises in Abhängigkeit von den aktuellen mechanischen Werten abgeleitet werden.

Kontaktwiderstand nach Holm $Rk = 280r\sqrt{E/(Fk - r)}$ (1)

Lichtbogenanzahl nach Rieder $U = s^{1/1.57} * 0.00385^{-1/1.57} * I^{-0.49/1.57} + U_M$ (2)

4.6 Kontaktlebensdauer

Für die Kontaktlebensdauer werden üblicherweise Kennwerte angegeben, die in Dauerversuchen mit Testeinrichtungen ermittelt werden. Dabei wird aus einer Anzahl getesteter Relais, deren Eigenschaften einer Streuung unterliegen, die der zu erwartenden Grundgesamtheit der Relais entspricht, das Ausfallverhalten ermittelt. Üblicherweise wird der Kennwert der Lebensdauer angegeben, bei dem unter diesen Bedingungen 10% der getesteten Relais ausgefallen sind (B₁₀ –Wert).

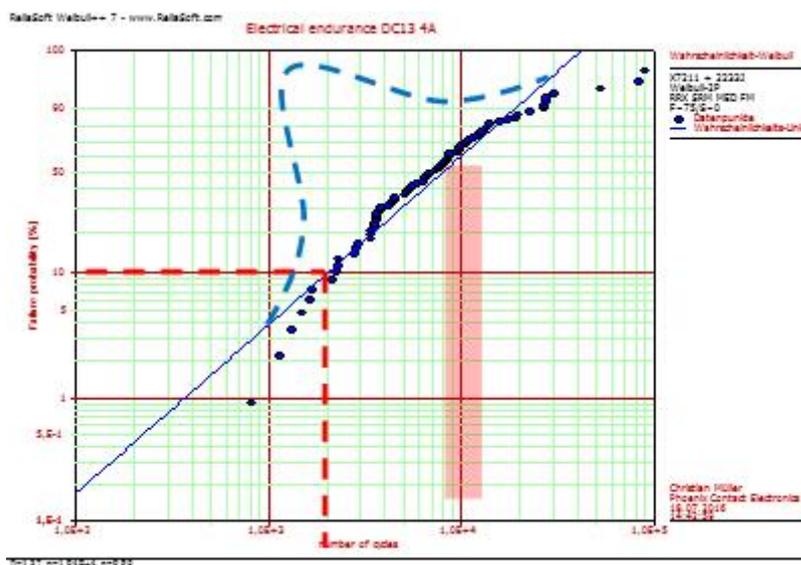


Abbildung 3: Kontaktlebensdauer schaltender Kontakte – Weibull Diagramm

Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass für ein konkretes Relais die Lebensdauer nur mit einer statistischen (Un)sicherheit abgeschätzt werden kann. Basierend aus Ergebnissen von Tests, bei denen die wichtigsten elektrischen und mechanischen Relaiskennwerte unter Laborbedingungen gemessen werden, besteht der Lösungsansatz darin, die Kontaktlebensdauer in Abhängigkeit von den Relaiskennwerten, den Lastbedingungen und den Umgebungsbedingungen in einem Metamodell abzubilden:

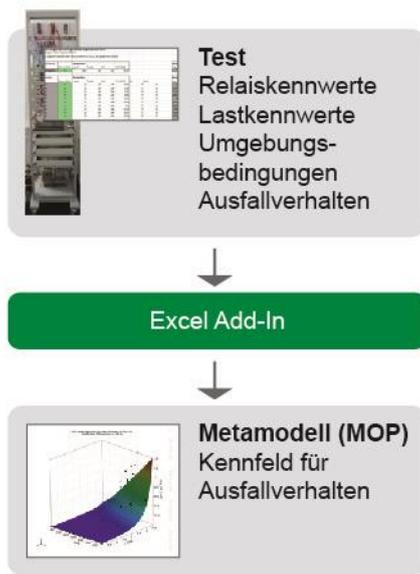


Abbildung 4: Abbildung experimentell ermittelter Kontaktlebensdauerparameter durch Metamodelle (Kennfelder)

Dieses Metamodell kann als FMU in dem Systemsimulationsmodell verwendet werden. Da für die verschiedenen Lastarten (ohmsch, induktiv, kapazitiv, Gleich- und Wechselspannung) und Lastbereiche (Strom / Spannung: klein / groß) die Kontaktlebensdauer unterschiedliches Verhalten und unterschiedliche Abhängigkeiten hat, müssen der aktuell gültige Lastbereich und die Lastart identifiziert werden. Diese Identifikation ist sowohl beim Einschalten als auch beim Ausschalten des Relais erforderlich. Anhand des Lastprofils kann somit das zutreffende Kennfeld ausgewählt bzw. aktiviert werden.

Die Lastidentifikation kann durch Transformation der gemessenen Signale erfolgen. Dabei können kapazitive Lasten (Strompeak beim Einschalten), z.B. über Fouriertransformationen, und induktive Lasten (langsamer Stromanstieg beim Einschalten), z.B. über Laplace-Transformationen, dargestellt werden. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass für die Kennfeldzuordnung keine Signale sondern Transformationskoeffizienten verwendet werden können. Dies bedeutet eine erhebliche Verringerung des Berechnungsaufwandes.

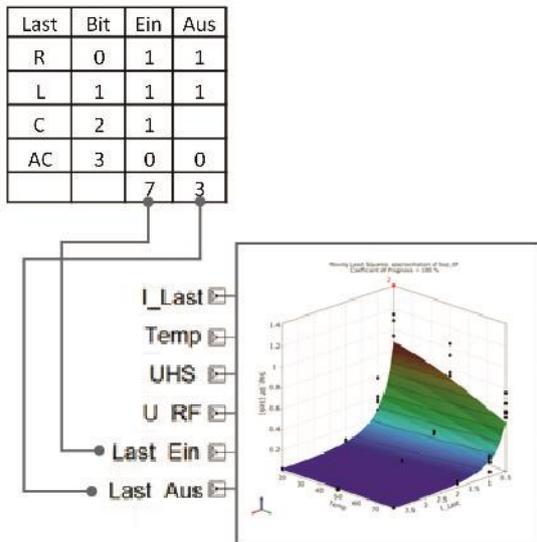


Abbildung 5: Lastarten und Lastbereichszuordnung

4.7 Mechanische Kennwerte

Die mechanischen Kennwerte von Relais werden typischerweise unter Laborbedingungen am offenen Relais gemessen.



Abbildung 6: Messung mechanischer Kennwerte unter Laborbedingungen am offenen Relais

Der Lösungsansatz besteht in der Betrachtung, ob das vom Magnetkreis erzeugte Magnetfeld und die Ankerposition eine Korrelation bilden, die auch umgekehrt zur Ermittlung der Position/Drehwinkel des Ankers eine Abhängigkeit zum gemessenen Magnetfeldes aufweist.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse des Magnetsystems ergab, dass es Positionen in der Nähe des Relais gibt, bei denen eine starke Änderung des Magnetfeldes in Abhängigkeit von der Ankerposition auftritt.

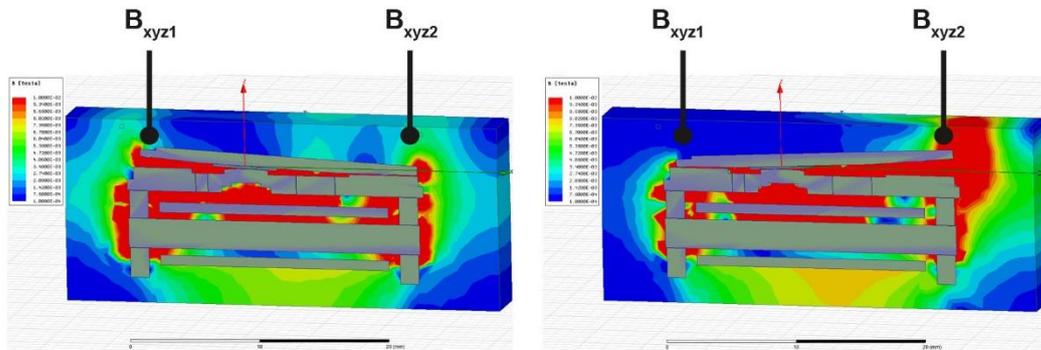


Abbildung 7: Magnetfeld bei verschiedenen Ankerpositionen

Die Simulationsergebnisse der magnetischen Flussdichte $B(x,y,z\text{-Richtung})$ in Abhängigkeit von verschiedenen Ankerpositionen (Drehwinkel) bzw. Spulenerregungen wurden mittels einer Excel-Schnittstelle in einem MOP konvertiert. Dabei zeigten sich starke Eingangskorrelationen zwischen dem Erregungsstrom der Spule und den Flussdichten $Bx1$ und $Bz1$:

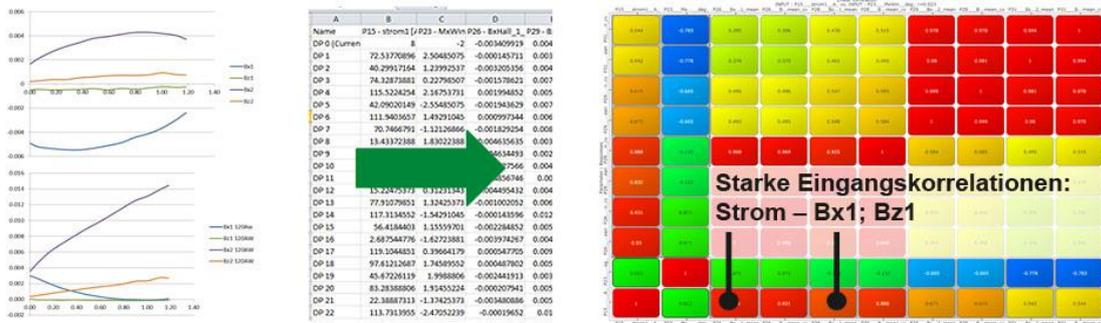


Abbildung 8: Simulation und MOP $B_{xyz(1,2)} = f(Mxwin; \text{Strom})$

Bei Reduzierung der Parameter um die stark korrelierten Eingangsparameter ergibt sich ein MOP, der einen CoP von 99% aufweist. Zur Lösung der Aufgabe ist es erforderlich, dass bei Invertierung die Abbildung eindeutig ist (injektive Abbildung). In Abb. 9 ist der „Eingangs“-MOP und in Abb. 10 der invertierte MOP dargestellt.

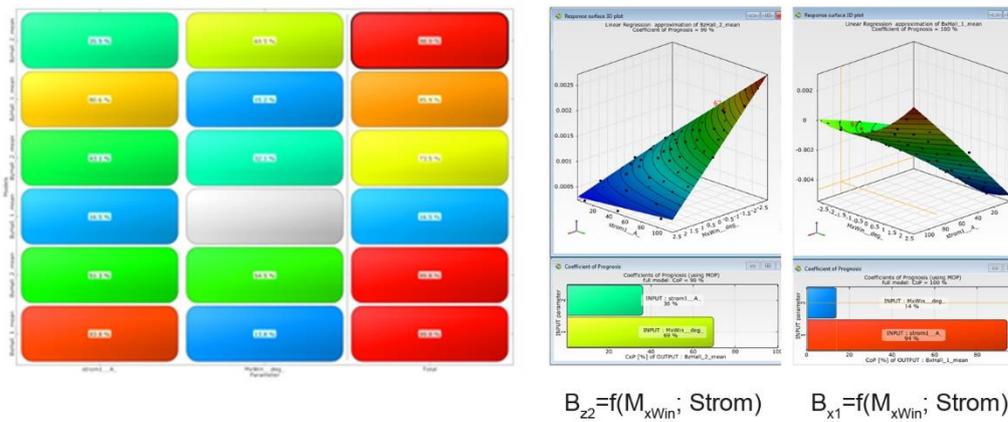


Abbildung 9: CoP Matrix und MoP ohne stark korrelierte Eingangsparameter

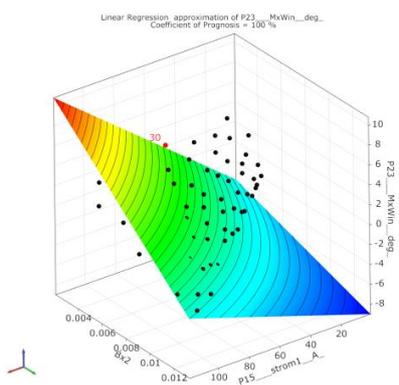


Abbildung 10: Invertierung $M_{xwin} = f(B_{x1z2}); \text{Strom}$

Die in Abbildung 10 dargestellte Invertierung ist eindeutig (injektive Abbildung). Problematisch ist jedoch, dass der MOP über technisch sinnvolle Grenzen des Drehwinkels hinaus extrapoliert.

Mittels Sensitivitätsanalyse mit Grenzbedingungen wurde der MOP beschnitten und ist somit nutzbar zur Darstellung der Ankerposition in Abhängigkeit von der magnetischen Flußdichte und dem Erregungsstrom der Spule (Abb. 11).

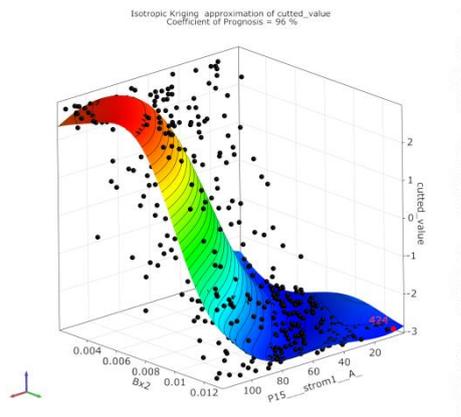


Abbildung 11: MOP mit beschnittenem Wertebereich, MOP: $M_{xwin}=f^c(B_{x12z2})$; Strom), CoP=96%

Die Ableitung verschiedener MOP mit unterschiedlichen Messwerten der Flussdichte und damit unterschiedlichem Aufwand (Anzahl Sensoren) ist in Abb. 12 dargestellt. Demnach ist es möglich, unter den gegebenen Bedingungen mit nur einem Magnetsensor, einen Flussdichtemesswert und den Messwert des Erregungsstromes der Spule mit einem CoP von 93% zu erreichen.

Nr.	Signalparameter	CoP	Extrapol.	Anzahl Signale	Anzahl Sensoren
1	$B_{x1x2z1z2}$ Strom	100	2	5	2
2	B_{x1x2z2} Strom	100	2	4	2
3	B_{x2-x1} Strom	69	1	3	2
4	B_{x2z2} Strom	98	1	3	1
5	B_{z2-x1} Strom	97	1	3	2
6	B_{x2} Strom	96	1	2	1
7	B_{x1x2} Strom	99	(2)	3	2

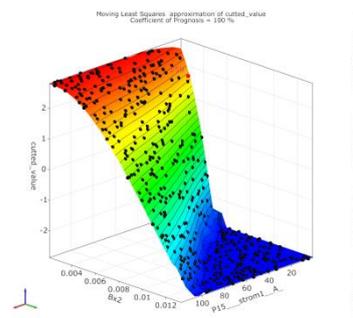


Abbildung 12: Übersicht der Anzahl von Signalparametern und MOP mit einem Flussdichtemesswert

4.8 Elektronik

Die Elektroniksimulation erfolgt in der Systemsimulationsumgebung im Bereich der elektrischen Domäne. Es sind umfangreiche Bibliotheken und Algorithmen verfügbar.

4.9 Firmware

Die im Schaltgerät verwendete Firmware wird in ihrer Funktionalität mittels einer FMU generiert und durch das Programm Modul Scade der Fa. Ansys Inc. in dem Simulationsmodell abgebildet.

5 Simulationsmodell des Schaltgerätes mit Metamodellen, Kontaktlebensdauer und mechanischen Parametern (Ankerposition)

Das Simulationsmodell des Schaltgerätes beinhaltet die verschiedenen Domänen. Für die Abbildung des Relais NSR01 wurden die Elemente der ECE (Elektromagnetik), spm (Mechanik) und Simplorer-Koppelemente verwendet. Das Simplorer Modell ist über eine „QDM“-Schnittstelle mit dem Schaltgerät verbunden. Die Kommunikation erfolgt durch ein PC-Interface, durch das Messwerte des Schaltgerätes on demand an das Simulationsmodell übertragen werden und die Simulation des Relaisverhaltens erfolgt.

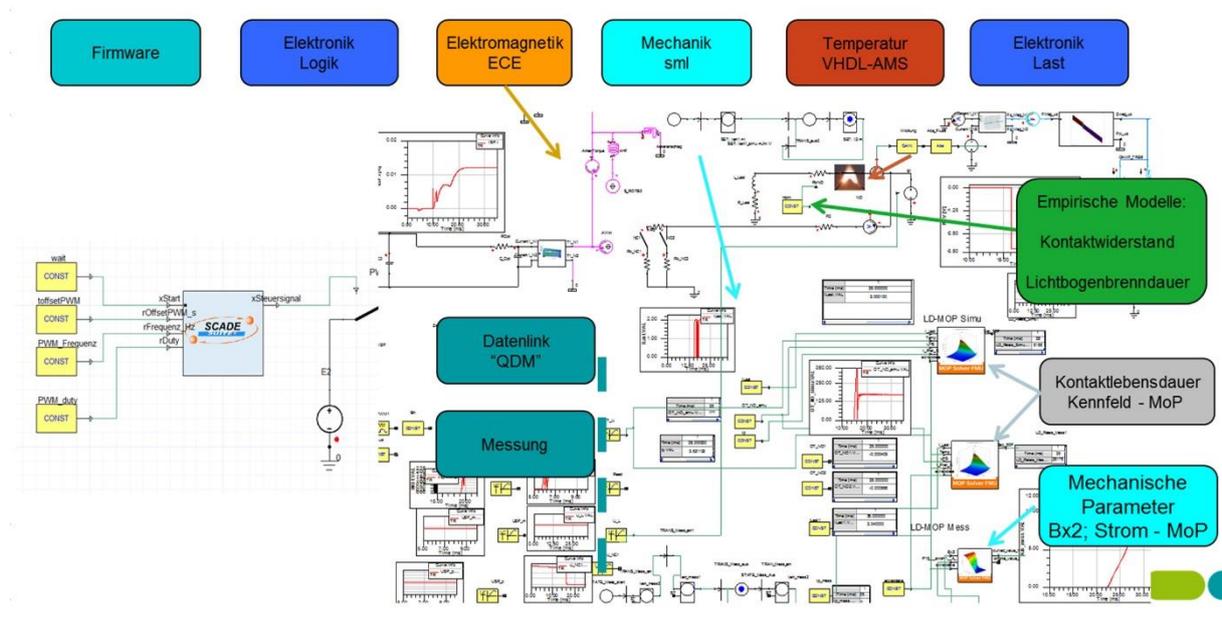


Abbildung 13: Simulationsmodell des Schaltgerätes mit Metamodellen Kontaktlebensdauer und Ankerposition

In Abb. 13 ist das Blockschaltbild des Simulationsmodells mit den Objekten der verschiedenen physikalischen Domänen schematisch dargestellt. Die Übertragung der Parameter des Schaltgerätes erfolgt in Simplorer-Blöcke, die die gemessenen Werte als interne Parameter bereitstellen. Spezielle Relaiskennwerte und Eigenschaften (Lichtbogenverhalten, Kontaktwiderstand oder Spulenerwärmung) werden über VHDL-Funktionsblöcke berechnet. Je nach ermitteltem Lastbereich wird das zutreffende Lebensdauer-Kennfeld aktiviert. Mittels der gemessenen und berechneten Parameter wird die noch verbleibende Kontaktlebensdauer berechnet und über ein PC-Interface ausgegeben bzw. angezeigt. Für die unterschiedlichen Referenzen orientieren Sie sich bitte an den angegebenen Formatierungen.

6 Demonstrator Sicherheitsschaltgerät mit Firmware, Elektronik-Komponenten, Elektromechanischen Komponenten und Last

6.1 Demonstrator

Der Demonstrator des Sicherheitsschaltgerätes wurde auf einer Testplatine mit ARM Cortex M0 CPU aufgebaut. Diese entspricht bezüglich der Hardwarearchitektur den im produktiven Einsatz befindlichen Schaltgeräten, so dass Teile dieser Firmware übernommen werden konnten. Die Funktionalität entspricht „Not Aus“, wobei bei einem bestimmten Sensorsignal die Last sofort ausgeschaltet wird. Das Wiedereinschalten erfolgt durch gesonderte Abläufe, um ein unbeabsichtigtes Wiedereinschalten zu verhindern. Die Datenübernahme erfolgt über eine serielle Schnittstelle zum PC, auf dem auch das Simulationsmodell des Schaltgerätes läuft. Die Messung der analogen Kennwerte des Relais und der Last erfolgt durch die vorhandenen AD-Wandler des Boards.

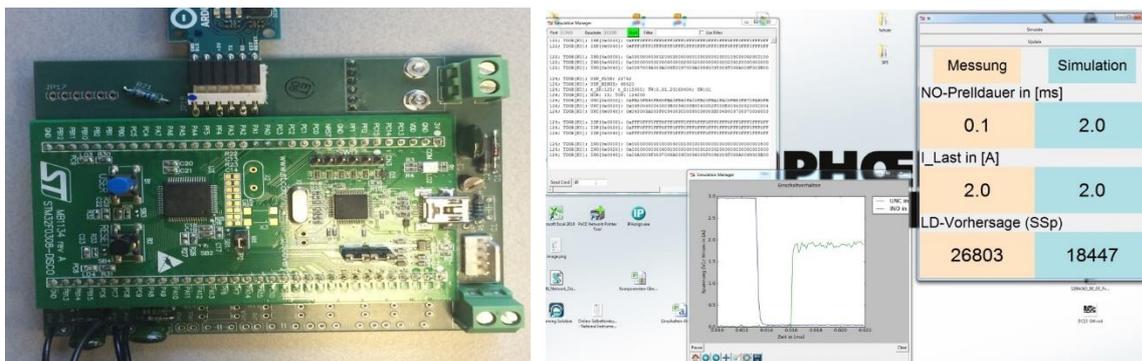


Abbildung 14: Testboard ARM Cortex M0 und Kommunikationsinterface auf dem PC

6.2 Anwendungsfall Relais prellt beim Einschalten: Gefahr von Kontakt - Verschweißung

Für einen Lastfall, bei dem das Einschaltprellen des Kontaktes einen starken Einfluss auf die Lebensdauer hat (Verschweißung des Kontaktes), wurde am Demonstrator der Laststrom beim Einschalten gemessen und das Signal an das Simulationsmodell übertragen. Im Simulationsmodell erfolgt die Analyse des Laststromes und die Berechnung der Zeitdauer während der Kontakt beim Einschalten prellt (Prellzeit t_p). Mit dem Wert der Prellzeit, den weiteren Kennwerten der Last (Strom, Spannung) und den Kennwerten des Relais wird mittels des für diese Lastart zutreffenden Lebensdauer-Kennfeldes (MOP) die zu erwartende Lebensdauer bis zum Ausfall berechnet und durch den PC visuell ausgegeben.

In dem Beispiel sind:

Prellzeit t_p (ms)	Schaltspiele bis Ausfall
1.592	297
0.826	29343

7 Zusammenfassung / Ausblick

Der grundsätzliche Funktionsnachweis eines cyber-physischen Relaismodells mittels eines Demonstrators ist erfolgt. Dabei wurde die Kopplung eines Simulationsmodells mit einem Sicherheitsschaltgerät und die Übertragung von Messwerten des Sicherheitsschaltgerätes an das Simulationsmodell realisiert. Die Analyse des Zustandes und des Verhaltens des Sicherheitsschaltgerätes durch das Simulationsmodell wurden ebenfalls ausgeführt.

In weiteren Entwicklungsschritten soll die Kopplung der Hardware mit dem Simulationsmodell dahingehend verbessert, dass eine Echtzeitanalyse möglich wird. Das Relaismodell kann dabei u.a. durch ein präzisiertes Kontaktmodell und die Berücksichtigung der Lastkreisrückwirkung weiterentwickelt werden.

8 Literatur Quellenangabe

VDI/VDE GESELLSCHAFT: THESEN UND HANDLUNGSFELDER; CYBER-PHYSICAL SYSTEMS; CHANCEN UND NUTZEN AUS SICHT DER AUTOMATION April 2013

CADFEM: SEMINAR SYSTEMSIMULATION

[HTTP://WWW.CADFEM.DE/WISSEN/SEMINARE/ANSYS-SYSTEMSIMULATION/S/13655.HTML](http://www.cadfem.de/wissen/seminare/ansys-systemsimulation/s/13655.html)

CADFEM: SEMINAR FELDBERECHNUNG ADVANCED

HOLM, RAGNAR: *Die technische Physik der elektrischen Kontakte*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1941

RIEDE, W.: *Plasma und Lichtbogen* 1967 Vieweg, Braunschweig

BRAUER, J., R.: *Magnetic Actuators and Sensors*, IEEE Press Wiley 2014

VINARICKY, E.: *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen*, Springer Berlin-Heidelberg GmbH 2002

Thomas Most, Johannes Will (Dynardo GmbH): *News optiSLang Algorithms (MOP, CoP, sensitivity analysis, optimization, reliability evaluation)* WOST 2012