

# Abschlussbericht Basys4Brenner

Entwicklung einer zertifizierbaren und Industrie 4.0 tauglichen innovativen Brennersteuerung auf Grundlage der BaSys-Konzepte

**Förderkennzeichen:** 01IS21016

**Laufzeit:** 01.04.2021 - 31.07.2023

**Datum:** 18.12.2023

- 1) Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme für die Prozess- und Werkstofftechnik (IAT der RWTH)
- 2) Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB der RWTH)
- 3) Hermann ZANDER GmbH & Co. KG (Zander)
- 4) HANS HENNIG GmbH (Hennig)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS21016 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Autoren: Ramy Hana, Shagufta, Dr.-Ing. Torben Miny, Lukas Sankowski, Benedikt Schmetz, Thorsten Günther

## Inhaltsverzeichnis

1. Einführung .....	3
2. Technische Spezifikationen .....	4
2.1. Basys Grundkonzepte .....	4
2.2. BaSys-Grundkonzepte und Anforderungen an die Brennersteuerung nach Normen .....	6
3. Durchgeführte Arbeit und Ergebnisse .....	6
3.1. AP1: Analyse von Anforderungen und Normen .....	6
3.2. AP2: Minimum Working Example.....	7
3.3. AP3: Konzeptentwurf und Spezifikation.....	10
3.4. AP4: Hardwareentwicklung.....	11
3.5. AP5: Softwareentwicklung .....	12
3.6. AP6: Prototyp-Entwicklung.....	13
3.7. AP7: Evaluation and Generalisierung .....	13
4. Zusätzliche Informationen.....	14
4.1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweis / Finanzierungsübersicht .....	14
4.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit.....	14
4.3. Verwertbarkeit und Nutzen.....	14
4.4. Bekannt gewordener Fortschritt .....	15
4.5. Erfolgte Veröffentlichungen .....	15
5. Referenzen .....	15

## 1. Einführung

In Anbetracht eines der Hauptziele von Industrie 4.0 (I4.0), die heutigen starren Produktionsprozesse durch flexible, hochdynamische und global vernetzte Wertschöpfungsketten zu ersetzen [1], ist die Digitalisierung von Produktionssystemen der Enabler für eine beschleunigte und flexible Umsetzung von Automatisierungslösungen [2]. In diesem Zusammenhang ist der Einsatz von Brennern zur Temperaturregelung ein Bestandteil für viele industrielle Produktionsprozesse, sowohl in der Prozess- als auch in der Fertigungstechnik. Das deutsche Forschungsprojekt BaSys 4.0 hat daher zum Ziel, hochgradig anpassungsfähige Produktionssysteme zu schaffen. Es besteht aus einer komponentenbasierten Architektur, die eine Modularität in die Produktionssysteme einführt. Zu den Schlüsselkomponenten dieses Paradigmas gehören die Verwaltungsschalen (VWS) und die Prozessführungskomponenten (PFK), die als Enabler für I4.0 dienen [3].

Industrielle Brenner verfügen über Burner Control Units (BCU), die derzeit über proprietäre Software gesteuert werden. Sie beschränken durch den schwierigen Zugriff auf Prozessdaten und hersteller- und technologiespezifische Darstellungen der Steuerungsschnittstelle die Digitalisierung und serviceorientierte Produktion. Eine wichtige Herausforderung und Grund für die Entwicklung einer neuen I4.0-fähigen Brennersteuerung ist die sicherheitsgetriebene Zertifizierung der Brenner mit der Steuerung. Die Integration des Basissystems Industrie 4.0 (BaSys) ermöglicht die Anbindung einer Brennersteuerung an das Konzept von I4.0. Für den Brenneranwender wird mit dem Einsatz der BaSys-Brennersteuerung eine infrastrukturelle Grundlage für die Digitalisierung geschaffen. So können zukünftige Dienste und Funktionalitäten wie Überwachung, Diagnose, Verfügbarkeitsanalyse, Wartungsvorhersage oder fortschrittliche Optimierungswerzeuge (KI, maschinelles Lernen) auf die standardisierten oder semantisch annotierten Daten von BaSys zugreifen.

Ausgehend von der aktuellen Anforderung entwickelten das IOB der RWTH, Zander Aachen, Hans Hennig und das IAT der RWTH im Rahmen des Projektes "BaSys4brenner" (BMBF, Förderkennzeichen 01IS21016A) als gemeinsames Entwicklungsprojekt ein Prototyp einer I4.0-fähigen Brennersteuerung aufbauend auf den BaSys-Konzepten sowie der geltenden Normen und Anforderungen in der Brennerindustrie. Im Rahmen des Projekts wurde die standardisierte Verwaltung von Anlageninformationen und die Nutzung einer flexiblen Prozesssteuerung für eine industrielle Brennersteuerung als Prototyp für ein I4.0-kompatibles Brennersystem aufgezeigt. Die Konzepte des semantischen digitalen Zwillings der I4.0, die VWS und das Konzept der standardisierten PFK wurden modelliert und auf einer industriellen Brennersteuerung am IOB der RWTH implementiert. Damit wurde ein Proof-of-Concept für die Digitalisierung des Brennerbetriebs realisiert, der die vollständige Integration der Brennersteuerung in ein orchestrierendes Leitsystem ermöglicht. Darüber hinaus wurde ein Hardwareprototyp mit zugehöriger Software entwickelt, welcher die im Rahmen einer Marktanalyse spezifizierten Funktionen einer Brennersteuerung umsetzt sowie die notwendigen Schnittstellen für BaSys-Konzepte bietet. Der Prototyp wurde auch an einer von Hans Henning zur Verfügung gestellten Industrieanlage getestet. Darüber hinaus hat Zander Aachen eine Brennersteuerung entwickelt, die unter Einhaltung wesentlicher Voraussetzungen und etablierter Standards in einem BaSys-Ökosystem integriert werden kann.

## Ziele

Ziel des Forschungsprojekts ist die Entwicklung einer zertifizierbaren und I4.0-fähigen innovativen Brennersteuerung auf Basis der BaSys-Konzepte. Diese "Basys4Brenner -Steuerung" stellt die erste industrielle BaSys-Steuerungskomponente außerhalb eines Demonstrator-Kontextes dar.

Mit den Möglichkeiten neuer interoperabler Protokolle, vor allem dem OPC UA-Standard, können die Vorteile von I4.0 nun auch in Prozessleitsysteme integriert werden. Das bedeutet, dass ein prozessrelevanter Parameter, wie z. B. die Brennerleistung oder der Durchfluss, herstellerunabhängig von der dezentralen Steuerung am Brenner an das zentrale Prozessleitsystem oder sogar in die Cloud übertragen und von dort aus bei Bedarf verändert werden kann. Im Projektplan wurde ein "Minimum Working Example (MWE)" vorgestellt, dass zunächst mit einem Low-Cost-Entwicklungsboard

umgesetzt und auf einem normgerechten Prüfstand getestet wurde. Später wurden die Konzepte auf einen Prototyp einer Brennersteuerung angewandt und für weitere Verbesserungen ausgewertet.

#### ***Nebenziele und Teilziele:***

Einige der sekundären Ziele des Projekts sind die folgenden:

- Bewertung von BaSys-PFK in sicherheitskritischen Anwendungen und Prüfung ihrer Zertifizierbarkeit (im Kontext von Brennern)
- Weiterentwicklung und Anwendung von BaSys-VWS-Teilmodellen für Brennersteuerungen
- Dokumentation der Vorgehensweise zur Entwicklung einer BaSys-PFK mit zugehöriger VWS
- Implementierung der VWS für einen einheitlichen Datenzugriff auf Informationen im Brennerbetrieb

Die Projektspezifikationen führten zur Bildung klar definierter Arbeitspakete, die darauf abzielten, alle erforderlichen Ergebniskriterien zu erfüllen:

- AP 1: Analyse der Anforderungen und Standards
- AP 2: Minimum Working Example
- AP 3: Konzeptentwurf und Spezifikation
- AP 4: Hardware-Entwicklung
- AP 5: Software-Entwicklung
- AP 6: Entwicklung von Prototypen
- AP 7: Bewertung und Abstraktion

Umfassende Diskussionen über jedes der Arbeitspakete, die erforderliche technische Spezifikation und die entsprechenden Ergebnisse aller Arbeitspakete findet sich in den nachfolgenden Kapiteln.

## [2. Technische Spezifikationen](#)

Die folgenden technischen Spezifikationen wurden als Grundlage für das Projekt benötigt.

### [2.1. Basys Grundkonzepte](#)

BaSys bietet eine I4.0-Referenzsoftwarearchitektur sowie Werkzeuge zur Automatisierung bestehender und neuer industrieller Produktionssysteme. Kernkomponenten dieser Architektur sind die VWS und die PFK. Die VWS bietet eine standardisierte digitale Repräsentation eines Assets, z. B. Brennersteuerung oder Ventil. Die PFK definiert standardisierte Zustandsautomaten und Schnittstellen für Steuerungsfunktionen. Sie ermöglicht die Kapselung von Prozessfunktionalitäten in wohldefinierten Diensten, wodurch eine dienstorientierte Prozesssteuerung ermöglicht wird.

#### [Verwaltungsschalen \(VWS\)](#)

Die VWS ist ein grundlegendes I4.0-Konzept, das in BaSys implementiert und erweitert wurde, um Informationen auf verschiedenen Abstraktionsebenen für Assets in einer konsistenten und semantisch klaren Weise bereitzustellen. In diesem Zusammenhang kann jedes Objekt von Interesse innerhalb eines Produktionsprozesses als Asset betrachtet werden. Dazu können Sensoren, Aktoren, Steuerungen, aber auch Software, Kommunikationsschnittstellen, Pläne, Blaupausen und mehr gehören.

Die VWS ist eine standardisierte, maschinenlesbare Beschreibung eines Assets, die Zugang zu verschiedenen Eigenschaften und Funktionen bietet. Sie bietet Informationen über I4.0-Anlagen, eine eindeutige Kennung für diese Anlage und eine generische Schnittstelle zu Informationen über die I4.0-Anlage. Jedes I4.0-Asset verfügt über eine VWS, die den Zugriff auf Eigenschaften und Dienste ermöglicht und Ereignisbenachrichtigungen liefert. VWS gibt es sowohl für physische als auch für nicht-physische Entitäten; daher können sowohl Geräte, Mitarbeiter, Produkte als auch Prozesse über VWS verfügen. Mit diesem Konzept lässt sich eine herstellerunabhängige und standardisierte Darstellung der Prozessanlage erreichen.

Eine VWS enthält außerdem Verweise auf mehrere Teilmodelle. Teilmodelle definieren Eigenschaften und Dienste für einen bestimmten Anwendungsfall oder Teilaspekt des Assets. Teilmodelle können Eigenschaften, Funktionen, Ereignisse, Referenzen, Beziehungen, Datei- und Webreferenzen enthalten. Dies ermöglicht die Bereitstellung einer breiten Palette von Informationen durch Teilmodelle und die Einbeziehung vieler Datenquellen. Teilmodelle können eine Fassade für Datenquellen bieten, für die bisher eine eigene Schnittstelle erforderlich war. Sie dienen daher als gemeinsame Interaktionspunkte in modernen I4.0-Systemen [4]. VWS bieten Zugang zu Metainformationen über die I4.0-Anlage, die sie darstellen, und bilden, wenn sie vollständig entwickelt sind, letztendlich einen digitalen Zwilling der Anlage [5]. Die Elemente des Teilmodells können mit semantischen Referenzen annotiert werden. Damit wird eine maschinenlesbare Semantik sichergestellt. Dies ist ein Schlüsselmerkmal für Interoperabilitätsszenarien [6].

#### *Prozessführungskomponenten (PKF)*

In der traditionellen Prozessautomatisierung führen speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) Steuerungsanwendungen durch zyklische Programme aus. Diese Programme werden z. B. zur Automatisierung einer Produktionszelle oder zur Ausführung von Schritten in einem Fertigungsprozess oder eines definierten Prozessrezepts verwendet. Diese Vorgehensweise bei der Entwicklung von Automatisierungsanwendungen führt zu statischen Lösungen und bietet nur eine begrenzte Flexibilität.

Notwendige Änderungen im Produktionsprozess erfordern beispielsweise eine Neuprogrammierung der SPS, was zu einem Neustart führt, der oft unerwünschte Nebeneffekte und erhebliche Betriebskosten nach sich zieht. Nach jeder Änderung müssen Simulationen und Tests für das gesamte Programm durchgeführt werden, um die Funktionssicherheit zu gewährleisten und zu überprüfen, ob die gewünschten Ergebnisse innerhalb des Prozesses erreicht werden. BaSys definiert daher eine serviceorientierte Architektur für die Prozesssteuerung auf der Basis der PFK<sup>1</sup>. Die PFK kapselt die Funktionalitäten eines Geräts (oder mehrerer verwandter Geräte innerhalb eines Moduls) als Softwarekomponente und stellt Dienste bereit, die über standardisierte Schnittstellen<sup>2</sup> zugänglich sind.

Die VWS bietet ein standardisiertes Informationsmodell und eine einheitliche Schnittstelle für den Zugriff auf Prozessinformationen. In ähnlicher Weise stellt die PFK standardisierte Schnittstellen zur Verfügung, allerdings für die Steuerung von Geräten. Die Nutzung dieser Schnittstellen ermöglicht die Entwicklung herstellerunabhängiger Steuerungskonzepte und erleichtert den Austausch von Prozessinformationen, z. B. mit der VWS.

Dieser serviceorientierte Ansatz ermöglicht eine Trennung zwischen den Schnittstellen der PFK und der Implementierung ihrer Funktionalität. Änderungen an den Diensten können vorgenommen werden, ohne die übergeordnete Steuerung zu beeinträchtigen. Erweiterungen der Funktionalität können durch die Entwicklung neuer Dienste oder durch Änderungen an den übergeordneten

---

<sup>1</sup> [https://wiki.eclipse.org/BaSyx/\\_Documentation/\\_ControlComponent](https://wiki.eclipse.org/BaSyx/_Documentation/_ControlComponent)

<sup>2</sup> [https://wiki.eclipse.org/BaSyx/\\_Documentation/\\_API/\\_ControlComponent#Control\\_component\\_interface](https://wiki.eclipse.org/BaSyx/_Documentation/_API/_ControlComponent#Control_component_interface)

Rezepten realisiert werden. Diese dienstbasierte Architektur erhöht die Flexibilität, Änderbarkeit und Wartbarkeit von Automatisierungsanwendungen. Die höhere Flexibilität ergibt sich auf der Anlagenebene (bzw. auf der Ebene der Anlagenkomponenten), da die Betriebsmittel, wie z. B. die Brennersteuerung, als eine von mehreren Komponenten einheitlich verwaltet werden können.

## 2.2. BaSys-Grundkonzepte und Anforderungen an die Brennersteuerung nach Normen

Brennersteuerungen müssen strenge Anforderungen erfüllen, um sicherzustellen, dass sie in verschiedenen Branchen sicher und effektiv arbeiten. In Deutschland müssen beim Bau eines Brennersystems Normen wie DIN EN 298 [7], DIN EN 746-2 [8] [9] und DIN EN 746-11 [10] berücksichtigt werden.

In diesen Normen befasst sich die DIN EN 298 mit Gasfeuerungsautomaten und legt Kriterien für die sichere Inbetriebnahme, den Betrieb und die Abschaltung von Gasbrennern fest, wobei die Notwendigkeit zuverlässiger Flammenerkennungs- und Überwachungsmechanismen betont wird. Die Normen DIN EN 746-2 und DIN EN 746-11 befassen sich dagegen mit unterschiedlichen Aspekten von Industrieöfen. DIN EN 746-2 bezieht sich auf allgemeine Sicherheitsanforderungen für industrielle Thermoprozessanlagen und umfasst Aspekte wie Temperaturregelung, Belüftung und Brennstoffzufuhr zur Aufrechterhaltung einer kontrollierten Umgebung. DIN EN 746-11 befasst sich speziell mit den Anforderungen an thermische Prozesskomponenten, wobei der Schwerpunkt auf dem funktionalen Sicherheitsaspekt einzelner Komponenten und Prozesse sowie dem Umweltschutz liegt. In Kombination fordern diese Normen umfassende Brennersteuerungssysteme, die nicht nur die Betriebssicherheit, sondern auch die Effizienz und die Umweltverträglichkeit in den Vordergrund stellen.

Sie umfassen verschiedene Aspekte wie Zündung, Flammenüberwachung, Temperaturregelung, Belüftung und Abgasmanagement. Die Einhaltung dieser Normen hilft der Industrie, zuverlässige, sichere und umweltbewusste Brennersteuerungssysteme für ein breites Spektrum von Anwendungen zu entwickeln.

In Anbetracht der vorherrschenden Normen ist es zwingend erforderlich, Steuersysteme für Brenner einzurichten, die nicht nur die Betriebssicherheit gewährleisten, sondern auch eine optimale Leistung bei gleichzeitiger Minimierung negativer Umweltauswirkungen ermöglichen. Die Überlegungen umfassen den Zündvorgang, die wachsame Überwachung der Flamme, die Temperaturregelung, die Bereitstellung einer angemessenen Belüftung und ein effektives Management der Restabgase.

## 3. Durchgeführte Arbeit und Ergebnisse

Alle Mitglieder des Projektkonsortiums haben sich engagiert, um die zugesagten Leistungen in den verschiedenen Arbeitspaketen zu erbringen. Um die erforderlichen Ziele zu erreichen, wurden eine Reihe von Meilensteinen festgelegt. Der erste Meilenstein konzentrierte sich in erster Linie auf die Anforderungsanalyse und stellte eine zentrale Leistung im Rahmen von Arbeitspaket 1 dar. Dieser Meilenstein diente als Indikator für die Differenzierung zwischen dem Minimum Working Example (MWE), dem Prototyp und dem potenziellen kommerziellen Produkt. Der nächste Meilenstein beinhaltete die Entwicklung des MWE, das als Machbarkeitsstudie für den Prototyp diente. Der dritte Meilenstein umfasste konzeptionelle und beschreibende Aufgaben sowie die Implementierung des Prototyps in den Bereichen Software und Hardware. Der letzte Meilenstein konzentrierte sich auf abschließende Tests und umfassende Dokumentationsverfahren.

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete werden in den folgenden Abschnitten einzeln vorgestellt:

### 3.1. AP1: Analyse von Anforderungen und Normen

Das Hauptaugenmerk in diesem Arbeitspaket lag auf der Schaffung einer Grundlage für die anwendungsorientierte Entwicklung und Evaluierung des Demonstrators und Prototyps. Dieses Arbeitspaket gliedert sich in zwei Teile. Der erste Teil besteht aus den Anforderungen. In den Anforderungen sollte ein Lastenheft für den Brennersteuerungsprototyp erstellt werden, das ein

Glossar der im Projekt verwendeten relevanten BaSys- und I4.0-Begriffe sowie eine tabellarische Auflistung und Einordnung relevanter Normen und Empfehlungen für deren Berücksichtigung im Brennersteuerungsprojekt enthält. In einem ersten Schritt wurde daher ein BaSys-Workshop am IAT der RWTH vorbereitet und durchgeführt. In diesem Workshop wurden alle grundlegenden Anforderungen und Standardanalysen diskutiert. Dieser Workshop diente dazu, ein einheitliches Verständnis der I4.0-Konzepte bei den Partnern sicherzustellen. Ebenso wurden im Rahmen eines Normenworkshops die verschiedenen anwendbaren und notwendigen Richtlinien und normativen Hintergründe für Brennersysteme erläutert. Das IOB der RWTH hat den Workshop vorbereitet und moderiert. In diesem Normenworkshop wurden die wichtigsten und gängigsten technischen und industriellen Normen sowie die angestrebten Zertifizierungen und Funktionalitäten von Brennersystemen eingehend diskutiert.

Die Anforderungen wurden im Wesentlichen durch die Abstimmung mit direkten und assoziierten Partnern gesammelt. Die wichtigste Aufgabe bestand darin, die PFK und ihre Schnittstellen im Anwendungskontext zu definieren. Außerdem wurden die minimal erforderlichen VWS-Teilmodelle bestimmt. Darüber hinaus wurden im ersten Teil dieses Arbeitspaketes die technischen Anforderungen an die Brennerfunktion, die Anforderungen an mögliche neue Kommunikationsschnittstellen und die Definition erster Soft- und Hardware-Anforderungsspezifikationen (insbesondere für das MWE) festgelegt.

Für die Normenanalyse wurden eine Literaturrecherche und eine Normenrecherche mit Schwerpunkt auf der Zertifizierung durchgeführt. Es wurde eine Kategorisierung und Vorauswahl von Normen auf Basis der Anforderungen und Berücksichtigung der relevanten Bereiche in den einzelnen Normen festgelegt. Außerdem wurden Abstimmungen mit relevanten Verbänden über anstehende Überarbeitungen wichtiger Normen durchgeführt. Hans Hennig stellte eine Marktanalyse in Form einer Umfrage vor, in der die handelsüblichen Brennersteuerungen und gewünschten Zusatzfunktionen verglichen wurden.

Zusätzlich wurde eine Marktanalyse durchgeführt, in der Mithilfe eines Fragenkatalogs verschiedene Anwender und Hersteller zu einer möglichen Brennersteuerung befragt wurde. Ziel dieser Umfrage war die Untersuchung des Bedarfs in der Industrie, die Einordnung und Abschätzung der gewünschten und geforderten Funktionen sowie die Analyse des Bedarfs nach einer technischen Neuerung.

### 3.2. AP2: Minimum Working Example

Für das Arbeitspaket waren folgende Hauptaufgaben geplant:

- Zusammenstellung und frühzeitige Etablierung eines minimalen Open-Source-Brennersteuerungssystems als Entwicklungsgrundlage
- Bereitstellung eines offenen Demonstrators als Beispiel für BaSys-Anwender
- Entwicklung eines Entwicklungsboards mit einer Minimal-Brennersteuerung als Leitkomponente und einem beispielhaften zugehörigen VWS
- Vereinfachte Open-Source-Brennersteuerung als Implementierungsbeispiel und Vorläufer des Prototyps
- Digitaler Demonstrator, der online frei zugänglich, dokumentiert und verlinkt ist

Zunächst wurde ein vorläufiger Prototyp, das so genannte Minimum Working Example (MWE), auf einem Brennerprüfstand am IOB der RWTH realisiert. Dieser Brennerprüfstand besteht aus einem Sicherheits-, Mess- und Regelsystem für Erdgas nach DIN EN 746-2, einer Luftversorgungsanlage, einem Brenner und einer kommerziell verfügbaren Steuer- und Bedieneinheit, die sich im Schaltschrank des Prüfstandes befindet. Das MWE war eine Vorstufe in der Entwicklung und wurde später mit einem Standard-Entwicklungsboard (Raspberry-Pi-basierte Steuerung) realisiert und am Prüfstand installiert. Das MWE wurde neben dem bestehenden Schaltschrank installiert, so dass eine einfache Umschaltung und ein Vergleich der beiden Steuerungskonzepte möglich waren.

Im weiteren Verlauf des Projekts diente das MWE als Basis für die Entwicklung eines Demonstrators eines ersten Steuerungsprototyps. Die Ergebnisse der an dem MWE durchgeführten Tests der BaSys-Konzepte wurden für die Entwicklung der BCU übernommen. Somit diente das MWE auch als

Machbarkeitsstudie für das Endprodukt. Die daraus resultierende BCU wurde dann auf dem Brennerprüfstand getestet und bewertet. Neben den Aufgaben und Entwicklungsschritten war ein kontinuierlicher Wissensaustausch zwischen den Partnern ein laufender Prozess. So wurden im Verlauf des Arbeitspakets mehrere Workshops durchgeführt.

Um alle vorgesehenen Aufgaben zu erfüllen, wurden die folgenden Schritte durchgeführt:

## Implementierung von PFK

Für die Implementierung der PFK für das MWE waren unter anderem die Auswahl und Beschaffung geeigneter Demonstrator-Hardware und die Programmierung der Software notwendig. Als Programmiersprache für die gesamte Implementierung wurde die Sprache C verwendet. Des Weiteren wurde für die Implementierung des Ausführungsautomaten PackML (Packaging Machine Language) als Ausführungsautomat verwendet. Hintergrund ist, dass BaSys-PFK PackML als Ausführungszustandsautomaten verwendet. Der PackML-Automat ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Details zum Grundkonzept von PFK und VWS wurden bereits in [11] veröffentlicht.

Für dieses Projekt waren einige der Zustände in der Zustandsmaschine für den Betrieb der Brennersteuerung nicht erforderlich, weshalb in Abbildung 1 rechts eine vereinfachte Version dargestellt ist.

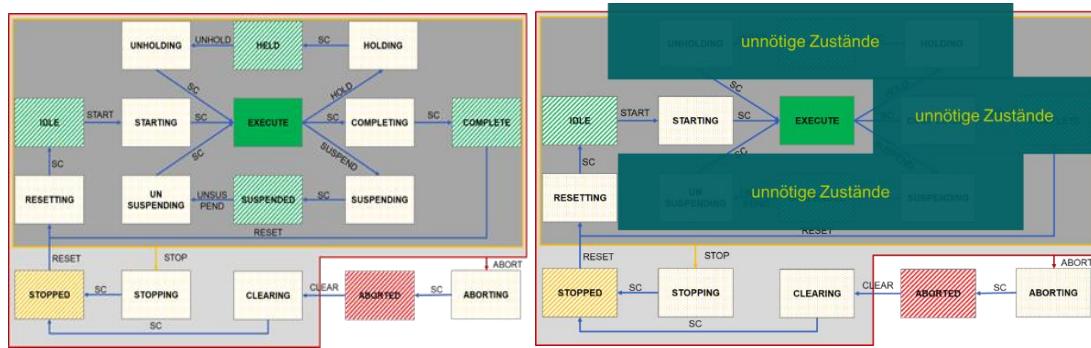


Abbildung 1: Ausführungszustandsautomat für PFK-Implementierung

Basierend auf der Ausführung der Zustandsmaschine wurde die Betriebsart für die Brennersteuerung programmiert und mit dem realen Brenner am IOB der RWTH umgesetzt und getestet. Die Ergebnisse der Implementierung sind im Ua Expert<sup>3</sup> in Abbildung 2 zu sehen.

Es sind die verschiedenen für die Brennersteuerung möglichen Operationen sowie Einblicke in den Ausführungsmodus, den Ausführungszustand und den aktuellen Arbeitszustand dargestellt.

<sup>3</sup> <https://www.unified-automation.com/products/development-tools/uaexpert.html>

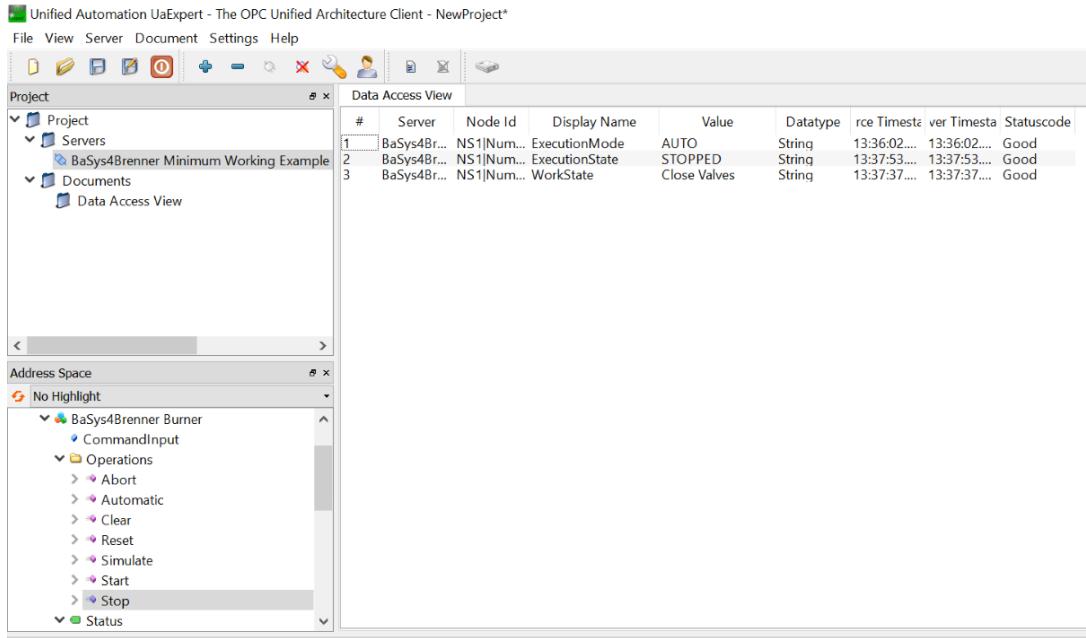


Abbildung 2: B4B MWE in UaExpert

### VWS-Teilmodelle für Brennersteuerungen

Es wurden mit dem AAS Manager [12] VWS-Teilmodelle für den Brenner erstellt, wie in Abbildung 3 dargestellt. Zu den verschiedenen Teilmodellen gehören ein Typenschild-Teilmodell und ein PFK-Teilmodell. Das Typenschild-Teilmodell funktioniert als digitales Typenschild, das die allgemeinen Informationen, z. B. über den Hersteller, das Baujahr oder die Seriennummer des Brenners, beschreibt.

object	type	category	description	id_short	semantic_id	value	value_type
✓ Brenner_AAS_1.aaxs	Package						
concept_descriptions	DictObjectStore						
shells	DictObjectStore						
assets	DictObjectStore						
submodels	DictObjectStore						
✓ Nameplate	Submodel	VARIABLE			Nameplate	Refer...	
✓ ManufacturerName	MultiLanguageP...	PARAMETER			Manufact...	Refer...	
✓ ManufacturerProductDesignation	MultiLanguageP...	PARAMETER			Manufact...	Refer...	
✓ Address	SubmodelELEM...	VARIABLE			Address	Refer...	
✓ ManufacturerProductFamily	MultiLanguageP...	PARAMETER			Manufact...	Refer...	
✓ SerialNumber	Property	PARAMETER			SerialNu...	Refer...	
✓ YearOfConstruction	Property	PARAMETER			YearOfC...	Refer...	
✓ Markings	SubmodelELEM...	VARIABLE			Markings	Refer...	
✓ AssetSpecificProperties	SubmodelELEM...	VARIABLE			AssetSp...	Refer...	
✓ ControlComponent	Submodel	None			ControlC...	Refer...	
✓ Executionstate	SubmodelELEM...	None			Execution...	Refer...	
✓ Workstate	SubmodelELEM...	None			Workstate	Refer...	
✓ HasType	ReferenceElement	None			HasType	Refer...	
✓ ExecutionMode	SubmodelELEM...	None			Execution...	Refer...	
fileStore	DictSupplement...						

Abbildung 3: VWS-Teilmodell für PFK

Das PFK-Teilmodell beschreibt den Ausführungszustand, den Ausführungsmodus und den Arbeitszustand der PFKs. Außerdem wurde eine zusätzliche VWS für den Brenner unter Verwendung von Python erstellt, wie in Abbildung 4 dargestellt. Diese VWS zeigt die verschiedenen Zustände und Modi der PFK innerhalb des aktuellen Zeitraums an.

Asset Administrative Shell Basys4Brenner	
Nameplate Submodel	
Manufacturer Name:	Basys4Brenner_Partners
Manufacturer Product Designation:	MWE_mark1
Address:	Heerweg 15C, 73770 Denkendorf
Manufacturer Product Family:	Burner
Serial Number:	TU_2021/23-b4b
Year Of Construction:	2022
Markings:	None
Control Component Submodel	
Last updated:	2022-11-14 12:47:33.443401
Execution State:	STOPPED
Execution Mode:	AUTO
Work State:	Close Valves

Abbildung 4: VWS-Teilmmodell in Python

### Setup und Tests auf einem Raspberry Pi

Das Konzept wurde mit einem industriellen Raspberry-Pi-basierten Controller (Revolution Pi) verifiziert und getestet. Der Controller verfügt über einen Quad-Core-Prozessor mit 1,2 GHz, 1 GB RAM und 8 GB eMMC-Flash-Speicher. Außerdem ist er mit acht digitalen und acht analogen Eingängen sowie acht digitalen und zwei analogen Ausgängen ausgestattet. Auf dem System ist ein Raspbian Buster-Betriebssystem installiert und die PFK ProfilesUA-Bibliothek<sup>4</sup> wurde zur Programmierung der Brennerdienste in der Programmiersprache C verwendet. Das System wurde außerdem so konfiguriert, dass die verschiedenen Betriebsvariablen über einen OPC-UA-Server veröffentlicht werden. Eine Beschreibung der Variablen wurde mit Hilfe der VWS erstellt.

Anschließend wurde das MWE am IOB der RWTH Aachen in verschiedenen Szenarien getestet und validiert. Die Videos wurden zu Referenzzwecken archiviert.

### 3.3. AP3: Konzeptentwurf und Spezifikation

Die Hauptaufgaben für dieses Arbeitspaket bestanden aus:

- Übertragung der BaSys-Konzepte auf den Brennersteuerungsprototyp
- Spezifikation der Umsetzung der im Pflichtenheft skizzierten Anforderungen
- Erstellung eines Konzepts, wie eine innovative und I4.0-fähige Brennersteuerung mit relevanten Technologien umgesetzt werden kann
- Erstellung eines Pflichtenheftes als Grundlage für die weitere Entwicklung

Dieses Arbeitspaket konzentrierte sich vor allem auf den Konzeptentwurf und die Technologiezuordnung sowie auf weitere Anforderungsspezifikationen. Der Konzeptentwurf und die Technologieabbildung erfolgten durch Übertragung der BaSys-Konzepte auf den Brennersteuerungsprototyp sowie der Einordnung der Vorgaben durch Normen und Standards in einer Spezifikation. Es wurden wichtige Festlegungen für den Einsatz verschiedener Komponenten getroffen, wie z. B. die strategische Platzierung der Schnittstelle der Führungskomponenten, um die Stabilität innerhalb des Systems zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde eine universelle Schnittstelle entwickelt, um die Führungskomponenten nahtlos mit den Brennern zu koppeln und so einen flexiblen und rationellen Ansatz für die Steuerung zu gewährleisten. Als Teil des Qualitätssicherungsprozesses wird eine mögliche Konzeptprüfung bei einer zertifizierten Stelle, wie dem TÜV, in Betracht gezogen.

<sup>4</sup> <https://git.rwth-aachen.de/acplt/basys4.2/PFKProfilesUA>

Für die Entwicklung der Steuerung wurden darüber hinaus diverse Spezifikationen auf Basis der relevanten Normen und Anforderungskataloge aufgestellt. Im Rahmen einer allgemeinen Systemspezifikation wurde die Systemstruktur sowie der generelle Inhalt und Funktionsumfang der angestrebten Steuerung definiert. In einer Hardwarespezifikation wurden alle Anforderungen und Ansätze für die Umsetzung der sicheren Hardware festgehalten, von der internen Hardwarestruktur bis zum funktionalen Aufbau der verschiedenen Signale. In einer Softwarespezifikation wurde der geltende Anforderungskatalog an die Software dokumentiert sowie der gesamte Programmablauf von der Zustandssteuerung bis zur allgemeinen Systemsteuerung spezifiziert.

### 3.4. AP4: Hardwareentwicklung

Für das Arbeitspaket waren folgende Hauptaufgaben geplant:

- Sicherheitsorientierter Hardwareentwurf als zertifizierbarer Rahmen für die Erweiterung des Steuerungssystems um projektspezifische Anforderungen
- Hardwareentwurf der Steuerungshardware
- Kommunikationsfähigkeit der Steuerungshardware für I4.0-Anwendungen

Für die Hardwareentwicklung wurden zu Beginn zwei Hardwaresysteme geplant. Ein erstes Testsystem mit reduzierter Funktionalität wurde zuerst im Rahmen eines Rev-pi sowie eines Pre-Prototyps (Funktionsplatine) erstellt, welche lange Zeit für die Softwareentwicklung genutzt wurde. Aufbauend auf den Spezifikationen und Anforderungen durch die Normen sowie der durchgeführten Marktumfrage wurde eine erste Hardware entwickelt, welche die Funktionen der Brennersteuerung umsetzt und erste Schnittstellen für die Integration der BaSys-Funktionalitäten bereitstellt. Der im ersten Entwurf umgesetzte Pre-Prototyp entsprach dabei einer formlosen Funktionsplatine. Hintergrund war das Testen und Erproben der realisierten Schaltungen unter Berücksichtigung der angestrebten und geforderten Funktionen.

Im weiteren Verlauf des Projektes erstreckte sich der Einsatz der Funktionsplatine auch auf die erste Software-Entwicklung, da bedingt durch die Lieferketten-Problematik, die Entwicklung und Fertigung eines ersten Prototyps stark verzögert wurde. Somit unterscheidet sich der Pre-Prototyp von dem geplanten Prototyp (Microchips und PIC-Controller) in mehreren Punkten bezüglich des finalen Funktionsumfangs als auch bei der eingesetzten Hardware (Controller, Komponenten, Aufbau, etc.).

Im Prototyp sowie im geplanten finalen Produkt ist das Steuerungssystem in zwei Hardwaresysteme unterteilt, wie in Abbildung 5 dargestellt.

Hardwaresystem 1 beinhaltet:

- Die Implementierung der sicheren und zertifizierbaren Brennersteuerung über zwei miteinander kommunizierende Mikrocontroller ( $\mu$ C1 und  $\mu$ C2) mit allen I/O-Signalen zur Steuerung des Brennerstarts, Brennerablaufs und der Abschaltung. Ziel ist dabei die Erfüllung aller Functional-Safety relevanten Anforderungen.
- Das Interface zur Parametereingabe, allgemeinen Systemstatusanzeige über ein Display, NFC-Kommunikation und Modbus RTU-Salve über einen dritten Mikrocontroller ( $\mu$ C3).

Das Hardwaresystem 2 umfasst die folgenden Funktionen:

- Der Modbus-RTU-Master zum Empfang aller Daten von Hardwaresystem 1
- Die softwareseitige Steuerungskomponente zur Steuerung des Hardwaresystems 1 gemäß dem BaSys-System
- OPC-UA Schnittstelle zur Kommunikation mit der BaSys-VWS

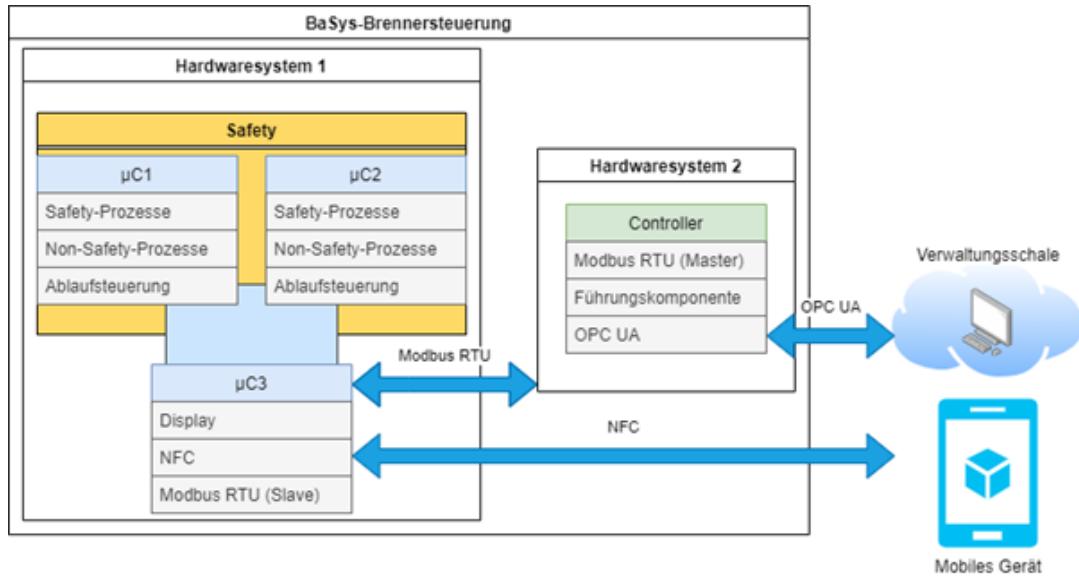


Abbildung 5: Hardwaresystem

### 3.5. AP5: Softwareentwicklung

Die in diesem Arbeitspaket geplanten Hauptaufgaben waren folgende:

- Überführung der Lösungen aus AP2 in das in AP4 entwickelte zertifizierbare Framework
- Prototypischer Softwarekern des Brennersteuerungssystems
- Implementierung der Brennersteuerungsfunktionalität mit standardisierten Zustandsautomaten auf Basis einer Variante der PFK Spezifikation
- Brennersteuerung mit BaSys-konformer Control-Component-Schnittstelle
- Beispiel-VWS zur Einbindung der Brennersteuerung in die BaSys- und I4.0-Umgebung

Zur Erreichung der oben genannten Aufgaben wurden die allgemeinen Anforderungen an die Software des BaSys-Steuerungssystems sowohl hinsichtlich der sicherheitsrelevanten als auch der nicht sicherheitsrelevanten Funktionen und Aspekte detailliert spezifiziert. Für das Hardwaresystem 1 wurden zusätzlich die Prozesse der μC1- und μC2-Controller für die sichere und nicht sichere Prozess- und Ablaufsteuerung sowie die Prozesse des μC3-Controllers für die Parametrierung des Brennerprozesses, die Anzeige von Informationen und die Kommunikation über NFC und Modbus RTU als Slave spezifiziert. Die allgemeinen Anforderungen sind im Folgenden aufgeführt:

- Die Software ist nach den Vorgaben der QM-Arbeitsanweisung A8.3-04/00 "Programmierrichtlinien für die Erstellung von Systemsoftware" zu entwickeln.
- Die Abläufe und Funktionen der μC1- und μC2-Controller sind unter Berücksichtigung der Anforderungen an die funktionale Sicherheit zu implementieren.
- Die Abläufe und Funktionen des μC3 (Display-Controller) unterliegen nicht den Anforderungen der funktionalen Sicherheit.
- Die Programmentwicklung wird in der Programmiersprache C durchgeführt.
- Für das Hardwaresystem 1 wurde eine ausführliche Softwarespezifikation aufgestellt, welche Abläufe zum Starten, Betreiben und Beenden eines Brennerprozesses detailliert beschreibt. Darüber hinaus sind alle im Rahmen der funktionalen Sicherheit relevanten Funktionen und Methoden, die ebenfalls für eine Zertifizierung des Gerätes notwendig sind, definiert und dokumentiert.
- Für das Hardwaresystem 2 wurden die Abläufe der Master-Komponente und die Kommunikation über Modbus RTU als Master sowie die Kommunikation über OPC UA spezifiziert. Es gibt Anforderungen an die Safety und Security, wie z. B. Benutzereinschränkungen bei der Parametrierung zur Laufzeit.

Die Softwareimplementierung erfolgte gemäß diesen Anforderungen. Die zusätzlichen Funktionen z. B. Modbus Kommunikationsmodul, wurden im Laufe des Projekts hinzugefügt, um die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt zu gewährleisten.

### 3.6. AP6: Prototyp-Entwicklung

Die Hauptaufgaben für dieses Arbeitspaket waren wie folgt:

- Bau und Dokumentation des Prototyps als Machbarkeitsstudie
- Erste industrielle BaSys-PFK im BaSys4Brenner-Prototyp
- Plausibilitätsnachweis für die Zertifizierbarkeit

Der Prototyp beinhaltet ein zertifizierbares und voll funktionsfähiges Brennersteuerungssystem. Dieses System ist so konzipiert, dass es nahtlose Konnektivität durch OPC UA und NFC-Technologien bietet. Es basiert auf Basys-PFK und -VWS, die das Steuerungssystem beschreiben. Hardware und Software wurden im letzten Schritt zu einem funktionalen und sicheren Steuerungssystem integriert. Dies wurde anhand eines ersten Prototyps realisiert und validiert. Der Prototyp hat verschiedene Tests erfolgreich bestanden, sowohl an einem Prüfstand am IOB der RWTH als auch an einer von Hans Hennig zur Verfügung gestellten Industrieanlage: von der sicheren Systemaktivierung über die Auswertung von sicherheitskritischen Signalen in den Luft- oder Gasleitungen sowie der Anlage im Allgemeinen bis hin zum sicheren Betrieb und Abschalten.

Trotz der Lieferschwierigkeiten des Hardware-Prototyps wurde trotzdem kontinuierlich an weiteren Funktionen gearbeitet. Zander arbeitete an zusätzlichen Funktionen und Verfeinerung, die die Entwicklung des Prototyps zu einem kommerziellen Produkt ermöglichen sollen, wie z. B. einem Modbus-Kommunikationsmoduls.

### 3.7. AP7: Evaluation and Generalisierung

Die wesentlichen Aufgaben innerhalb dieses Arbeitspaketes waren:

- Begleitende Evaluation und Monitoring der Entwicklung sowie der Implementierungen
- Sicherstellung der technischen Entwicklung und Übertragbarkeit des Projekts
- Entwicklung eines Prototyps, der den Spezifikationen und Anforderungen entspricht
- Testbericht und Mediendokumentation der Brennersteuerungsdemo (z. B. Video)
- Bericht über das Verfahren mit verallgemeinerter Vorgehensweise
- Drei Veröffentlichungen (national/international), Marktumfrage sowie kontinuierliche Marktanalyse

Das entwickelte Brennersteuerungssystem wurde an einem Brennerprüfstand am IOB der RWTH getestet, wie in [11] beschrieben. Um die Sicherheitsabschaltungen zu überprüfen, wurden verschiedene Störungen, die an realen Industrieanlagen auftreten können, getestet:

- 1) Keine Erkennung des Luftdrucks beim Anfahren,
- 2) Verlust des Gasdrucks während des Betriebs und
- 3) Ausfall des Luftdrucks während des Betriebs.

Alle genannten Störungen wurden erfolgreich erkannt und der Brenner konnte wie geplant arbeiten. Darüber hinaus wurde der Prototyp auch in einem von Hans Henning bereitgestellten industriellen System getestet. Die Medien-Dokumentation des Projekts ist in einem Cloud-System der RWTH Aachen gesammelt. Alle relevanten Dokumente, Workshop-Präsentationen, technische Dokumentationen und Videos von Live-Demonstrationen des Brenners sind dort gespeichert.

## 4. Zusätzliche Informationen

### 4.1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweis / Finanzierungsübersicht

Insgesamt sind für das Projekt Ausgaben in Höhe von 684.831,88 Euro angefallen. Die bewilligten Mittel waren 478.338,29 Euro.

Die für das Projekt bewilligten Mittel von HANS HENNIG GmbH wurden hauptsächlich für Personal- und Materialkosten aufgewendet. Insgesamt sind Ausgaben in Höhe von 45.622,50 Euro angefallen von denen 18.249,00 Euro vom Bund übernommen wurden. Die Ausgaben für Personal liegen bei 39.004,86 Euro und für Sachkosten bei 6.617,64 Euro.

Die für das Projekt bewilligten Mittel von Hermann ZANDER GmbH & Co. KG wurden ausschließlich für Personalkosten aufgewendet. Insgesamt sind Ausgaben in Höhe von 358.240,18 Euro angefallen von denen 179.120,09 Euro vom Bund übernommen wurden.

Die für das Projekt bewilligten Mittel von RWTH wurden hauptsächlich für Personalkosten und die Projektpauschale aufgewendet. Zweithöchster Kostenpunkt sind Sachkosten für Hardware.

Insgesamt sind Ausgaben in Höhe von 280.969,20 € angefallen, von denen 280.969,20 € vom Bund übernommen wurde. Die Ausgaben für Personal liegen bei 228.266,02 €, Sachkosten bei 5.874,98 €, Projektpauschale bei 46.828,20 €.

### 4.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Basierend auf der durchgeführten Marktanalyse (AP1), wurde aufgezeigt, dass ein Bedarf an I4.0-Lösungen in der Industrie besteht. Die Implementierung auf einer BCU könnte ein erster Teil in der Thermoprozessbranche sein. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um die geforderten Ziele und Arbeitspakete umzusetzen.

### 4.3. Verwertbarkeit und Nutzen

Dank der Möglichkeiten neuer interoperabler Protokolle, insbesondere des OPC UA-Standards, können die Vorteile von I4.0 nun in die Prozessleitsysteme integriert werden. Dies bedeutet, dass prozessrelevante Parameter, wie die Leistung des Brenners oder der Durchfluss, vom dezentralen Steuersystem am Brenner zum zentralen Prozessleitsystem oder sogar zur Cloud übertragen und von dort aus unabhängig vom Hersteller abgerufen und nach Bedarf geändert werden können.

Zusätzlich hat sich in den letzten Jahren aufgrund der Einbeziehung von Anforderungen für Steuerungs- und Schutzsysteme in Normen (insbesondere DIN EN 746-2 und DIN EN 50156-1) eine neue Marktsituation ergeben. Dies hat zu einer weiteren Sensibilisierung für Anlagensicherheit (Funktionale Sicherheit) geführt und bei Zertifizierungsstellen (z. B. TÜV oder BG) eine stärkere Anerkennung gefunden. Dies zeigt sich besonders bei Komponenten, die früher als bewährt galten. Diese Komponenten entsprechen nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik, was zu einer verstärkten Suche nach Alternativen auf dem Markt führt, wie zum Beispiel Zander Safety Mikrocontroller.

Somit schafft die Implementierung der BaSys4brenner-Entwicklungen für Anwender von Brennersteuerungen sowie Brenneranlagenbauer eine infrastrukturelle Grundlage für die Digitalisierung. Dies ebnet den Weg für zukünftige Dienstleistungen und Funktionen, wie Überwachung, Diagnose, Verfügbarkeitsanalyse, Wartungsvorhersagen oder fortschrittliche Optimierungstools (KI, maschinelles Lernen), um auf die standardisierten oder semantisch annotierten Daten von BaSys zuzugreifen. Darüber hinaus besteht das Potenzial für die inkrementelle Integration bestehender Systeme (Retrofit) und einen einfachen Brenneraustausch (Plug & Produce, Rekonfiguration). Letztendlich repräsentiert die herstellerübergreifende und anwendungsübergreifende Interoperabilität, die durch die generalisierten Managementkomponenten

in Verbindung mit der VWS ermöglicht wird, einen bedeutenden Schritt in Richtung adaptive Produktion.

#### 4.4. Bekannt gewordener Fortschritt

Die BaSys-PFK unterstützt eine flexible Gesamtsteuerungsarchitektur, die Änderungen und Optimierungen am System erleichtert und den Testprozess vereinfacht. Die VWS ermöglicht die Abstraktion und Kapselung von Daten aus verschiedenen Anlagen, während die PFK eine flexible, serviceorientierte Anwendung für das Steuersystem ermöglicht.

Mit der Implementierung von BaSys-PFK in einem Vorprototypen (MWE) wurde erstmals eine Implementierung einer BaSys-PFK auf industrieller Ebene durchgeführt. Zuvor wurden Implementierungen nur an Demonstratoren durchgeführt.

#### 4.5. Erfolgte Veröffentlichungen

Benedikt Schmetz; Stefan Ruland; Marco Zander; Nicolas Camargo; Ramy Hana; Julian Grothoff; Tobias Kleinert; Lukas Sankowski; Nico Schmitz; Herbert Pfeifer, Entwicklung einer zertifizierbaren und Industrie 4.0 fähigen Brennersteuerung, 3. AOTK, 2021

Nicolas Camargo; Ramy Hana; Julian Grothoff; Lukas Sankowski; Nico Schmitz; Herbert Pfeifer; Benedikt Schmetz; Stefan Ruland; Marco Zander; Tobias Kleinert, Integration of Industry 4.0 Concepts for Automation and Digitalization of Furnace Control Systems as Enabler for Optimization and Changeability in Operation, INFUB, 2021

Shagufta; Ramy Hana; Tobias Kleinert; Benedikt Schmetz; Lukas Sankowski, Development of a certifiable and Industry 4.0-capable burner control system, 4. AOTK, 2023

### 5. Referenzen

- [1] M. Ghobakhloo, "Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability," *Journal of Cleaner Production*, 2020.
- [2] C. Wagner, C. von Trotha and U. Epple, "Fundamentals for the next Generation of Automation Solutions of the Fourth Industrial Revolution," in *11th Asian Control Conference (ASCC)*, 2017.
- [3] J. Grothoff, " BaSys 4.0: Metamodell der Komponenten und Ihres Aufbaus.," 2018.
- [4] T. Miny, S. Heppner, I. Garmaev, I. T. Kleinert and B. Höper, "Verwaltungsschalen-Teilmodelle – Kopiervorlagen oder Informationsmodell-Typen," in *Automation*, 2023.
- [5] J. Grothoff, S. Malakuti, S. Grüner, R. Drath, C. Wagner, M. Hoffmeister, P. Zimmerman and U. Epple, "Die Rolle der Industrie 4.0 „Verwaltungsschale“ und des „digitalen Zwillings“ im Lebenszyklus einer Anlage: Navigationshilfe, Begriffsbestimmung und Abgrenzung," 2017.
- [6] J. Grothoff, S. Grüner, C. Barth, A. Kehl, M. Freund and T. Klausmann, "Asset Administration Shell as Integration Layer for the Orchestration of Mixed Process and Manufacturing Plants," 2022.
- [7] DIN EN 298:2012, "Feuerungsautomaten für Brenner und Brennstoffgeräte für gasförmige oder flüssige Brennstoffe, Deutsches Institut für Normung e.V.," 2012.

- [8] DIN EN 746-2:2020, "Industrielle Thermoprozessanlagen und dazugehörige Prozesskomponenten – Sicherheitsanforderungen- Teil 2: Feuerungen und Brennstoffführungssysteme (ohne Feststeoffe), Deutsches Institut für Normung e.V.," 2020.
- [9] DIN EN 746-2:2011, "Industrielle Thermoprozessanlagen und dazugehörige Prozesskomponenten – Sicherheitsanforderungen- Teil 2: Feuerungen und Brennstoffführungssysteme (ohne Feststeoffe), Deutsches Institut für Normung e.V.," 2011.
- [10] DIN EN 746-11:2020, " (Draft 2020), Industrielle Thermoprozessanlagen und dazugehörige Prozesskomponenten – Sicherheitsanforderungen- Teil 11: Schutzsysteme, Deutsches Institut für Normung e.V.," 2020.
- [11] N. Camargo, R. Hana, J. Grothoff, L. Sankowski, N. Schmitz, H. Pfeifer, B. Schmetz, S. Ruland, M. Zander and T. Kleinert, "Integration of Industry 4.0 Concepts for Automation and Digitalization of Furnace Control Systems as Enabler for Optimization and Changeability in Operation," 2021.
- [12] I. Garmaev, T. Miny, T. Kleinert, A. Schüller and P. Bitterlich, "Konzept und Realisierung für die automatische Erstellung von Verwaltungsschalen in Unternehmen basierend auf bestehenden Daten aus verschiedenen Informationssystemen," in *Automation*, 2022.



# Kurzbericht Basys4Brenner

Entwicklung einer zertifizierbaren und Industrie 4.0 tauglichen innovativen Brennersteuerung auf Grundlage der BaSys-Konzepte

**Förderkennzeichen:** 01IS21016

**Laufzeit:** 01.04.2021 - 31.07.2023

**Datum:** 18.12.2023

- 1) Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme für die Prozess- und Werkstofftechnik (IAT der RWTH)
- 2) Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB der RWTH)
- 3) Hermann ZANDER GmbH & Co. KG (Zander)
- 4) HANS HENNIG GmbH (Hennig)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS21016 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Autoren: Ramy Hana, Shagufta, Dr.-Ing. Torben Miny, Lukas Sankowski, Benedikt Schmetz, Thorsten Günther

Ziel des Projekts war es, Anforderungen aus Industrie 4.0 und der Thermoprozessindustrie zu analysieren, ein Lastenheft zu erstellen und aufbauend darauf eine Implementierung einer Industrie 4.0-fähigen Brennersteuerung zu entwickeln. Die Spezifikationen wurde in zwei Phasen an realen Versuchsbrennern getestet und verifiziert. Die erste Phase, die als Minimum Working Example (MWE) bezeichnet wurde, ist eine Vorstufe des Prototyps, die durch schnelle Iterationszyklen eine praktische Spezifikation ermöglichte und gleichzeitig die Machbarkeit des Prototyps sicherstellte. Sie wurde im weiteren Verlauf des Projekts als Demonstrator verwendet. Darüber hinaus diente dieser Meilenstein als Machbarkeitsstudie für den Prototyp. Die zweite Phase war ein Endprototyp, der die Sicherheitsnormen und Standards erfüllte und zertifiziert werden kann.

Als Kernbausteine für die Entwicklung der Steuerungsarchitektur wurden die Technologien der Projekte Basissystem Industrie 4.0 (BaSys 4.0) und Basissystem Industrie 4.2 (BaSys 4.2) zu Verwaltungsschalen (VWS) sowie Prozessführungskomponenten (PFK) genutzt. Das Projekt open62541 diente als Kern für die Bereitstellung von Live-Daten über OPC-UA.

Im MWE wurde ein konventioneller Kaltluftbrenner mit einer nominellen Leistung von 100 kW im Erdgasbetrieb eingesetzt. Die zugehörigen Sicherheitsstrecken für Erdgas und Verbrennungsluft wurden nach den erforderlichen Normen, insb. DIN EN 746-2, ausgeführt, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Die Zündung und Flammenüberwachung des Brenners wurden über eine Elektrode realisiert, die im Brenner integriert ist. Fachkenntnisse in der Entwicklung von Sicherheitsgeräten sowie in der Brennertechnik wurden von den Industriepartnern ebenfalls in Betracht gezogen.

Am Anfang des Projekts wurde vom IOB der RWTH eine detaillierte Analyse der verfügbaren Normen und Standards im Hinblick auf den Einsatz einer Brennersteuerung in verschiedenen Branchen, insb. für Thermoprozessanlagen, durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in einem Workshop vorgestellt und diskutiert. Zander führte einen Vergleich zwischen den notwendigen Sicherheitsmaßnahmen in jeder Norm durch. Hans Hennig analysierte, wie aktuelle kommerzielle Brenner die Normen einhalten und präsentierte Lösungen, wie die technischen Anforderungen in einem neuen Brenner umgesetzt werden können. Das IAT der RWTH führte einen Workshop über die BaSys-Konzepte durch, bei dem ein besonderer Fokus auf VWS und PFK gelegt wurde. Basierend darauf wurden die Anforderungen an das MWE und den finalen Prototyp von den Partnern ausgearbeitet. Im Anschluss wurde das MWE mit einem Revolution Pi Entwicklungsboard implementiert und die Steuerung an einer Brenneranlage im Technikum des IOB der RWTH getestet. Es wurden verschiedene Sicherheitsszenarien durchgeführt, um zu prüfen, ob die Steuerung wie vorgesehen reagiert.

Aufgrund der Corona-Pandemie und des Ukraine-Kriegs traten Probleme in der Lieferkette auf, die die Beschaffung wichtiger Hardwareelemente verzögerten. Die Verzögerung wirkte sich auf den Bau des finalen Prototyps aus. Aus diesem Grund wurde eine viermonatige Projektverlängerung bewilligt. Schließlich wurde der finale Prototyp entwickelt und im IOB-Technikum sowie bei Hans Hennig an einer industriellen Brenneranlage getestet.

Das Projekt stellt dar, wie die BaSys-Konzepte VWS und PFK bei der Steuerung von sicherheitskritischen Komponenten eingesetzt werden können. Eine zentrale Herausforderung war die Integration der Forderung nach einer redundanten Steuerung mit dem PFK-Konzept. Es wurde gefordert, dass zwei Steuerungen alle Eingaben erfassen und für den korrekten Betrieb des Systems die gleiche Aussage treffen müssen. Die Open-Source-Bibliothek open62541 wurde für die Übertragung der Systemvariablen über einen OPC-UA-Server verwendet. Das gesamte System wurde in einer VWS modelliert, um eine höhere Abstraktionsebene zu schaffen und die Selbstbeschreibung von Variablen und Funktionen zu standardisieren. Das finale Gerät bestehend aus einer Hard- und Software inklusive der BaSys relevanten Schnittstellen bietet zukünftigen Anwendern eine Vielzahl an Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten. Die Steuerung befähigt sowohl zur digitalen Vernetzung als auch zur Optimierung und Überwachung von Prozessen.