

# Abschlussbericht zu ProcMAPE

Zuwendungsempfänger:  <b>PITSS GmbH Universität Ulm (UULM), Institut für Datenbanken und Informationssysteme</b>	Förderkennzeichen:  <b>16IS23045A-B (alt: 01IS23045A-B)</b>
Vorhabenbezeichnung: <b>KMU-innovativ - Verbundprojekt ProcMAPE: Entwicklung eines MAPE (Monitor, Analyse, Plan, Execute) Frameworks zur datengetriebenen Adaption objektzentrierter Prozesse in Software-Systemen</b>	
Laufzeit des Vorhabens: <b>01.09.2023 – 31.08.2025</b>	
Berichtszeitraum: <b>01.09.2023 – 31.08.2025</b>	

## Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzdarstellung.....	1
1.1.	Zielsetzung .....	1
1.2.	Wissenschaftlicher und technischer Startpunkt.....	1
1.3.	Wesentliche Ergebnisse und Rollen der Projektpartner .....	2
1.3.1.	PITSS GmbH.....	2
1.3.2.	Universität Ulm (UULM) .....	3
2.	Detaillierte Ausführung .....	3
2.1.	Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten im Vergleich zur Vorhabensbeschreibung.....	3
3.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	16
3.1.	PITSS GmbH .....	16
3.2.	Universität Ulm .....	16
4.	Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten .....	16
4.1.	PITSS GmbH .....	16
4.2.	Universität Ulm (UULM).....	17
5.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit .....	17
5.1.	PITSS GmbH .....	17
5.2.	Universität Ulm .....	18
6.	Fortschritte in Wissenschaft und Technik während der Projektlaufzeit.....	18
7.	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen .....	19

**Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 01IS23045A-B im Programm KMU Innovativ gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren und Autorinnen.**

# 1. Kurzdarstellung

## 1.1. Zielsetzung

Ziel des ProcMAPE-Projekts war die Entwicklung eines innovativen softwaregestützten Rahmenwerks zur datengetriebenen Adaption und Evolution objektzentrierter Prozesse (z. B. Auftragsabwicklungsprozess) in Software-Systemen. Dieses Rahmenwerk (engl. *Framework*) sollte vier aufeinander aufbauende Aufgaben in integrierter Form unterstützen: (1) Online-Monitoring objektzentrierter Prozesse während ihrer Ausführung (**Monitor**), (2) Online-Analyse von Prozesseigenschaften wie *Performance*, *Conformance* und *Compliance* (**Analyse**), (3) Datengetriebene Planung sinnvoller *Adaptionen* zur Optimierung implementierter Prozesse (**Plan**) und (4) (automatische) Umsetzung geplanter Adaptionen (z.B. Änderung der Prozesslogik) im laufenden Systembetrieb (**Execute**). Das resultierende **MAPE**-Framework sollte eine robuste und leistungsfähige Umsetzung von Prozessadaptionen in Softwaresystemen ermöglichen, ohne die korrekte Ausführung der Prozesse in der Folge zu beeinträchtigen (z.B. Ausschluss von Deadlocks und Livelocks). Ein weiteres Ziel war, dass Selbstadaptionen des Software-System für relevante Benutzergruppen (Entwickler, Endbenutzer, Systemadministratoren, Process Owner) erklärt werden können und damit transparent sind.

## 1.2. Wissenschaftlicher und technischer Startpunkt

Zur Unterstützung betrieblicher Prozesse (sog. *Geschäftsprozesse*) setzen viele Unternehmen komplexe Software-Systeme ein. Viele davon sind jedoch veraltet (sog. *Legacy Systems*) und die Prozesslogik ist fest im Programm- oder Datenbankcode verankert. D.h. es gibt kein explizites Prozesswissen in Form von *Prozessmodellen*, was die Pflege der Altsysteme und deren (Teil-)Migration auf moderne Software-Architekturen sehr schwierig und kostspielig gestaltet. Ebenso wenig sind rasche Adaptionen der implementierten Prozesse infolge veränderter Anforderungen möglich. Unternehmen leiden unter der Starrheit ihrer Altsysteme und wünschen sich stattdessen moderne Software-Lösungen mit einer flexiblen Prozessunterstützung und dynamischen Adaptierbarkeit der Prozesse an veränderte Gegebenheiten.

Idealerweise können notwendige Prozessadaptionen automatisch aus den Daten des (prozessorientierten) Software-Systems abgeleitet werden, ohne dass dazu aufwendige Nutzerinteraktionen erforderlich werden. Beispiele für Selbstadaptionen sind die automatische Erweiterung bestehender Maskenfelder, die Änderung der Maskenlogik (d. h. Adaption der Benutzerführung), die Änderung des Prozessverhaltens (z. B. geänderte Reihenfolge in der Ausführung von Prozessschritten bzw. Masken) und Code-Anpassungen (z. B. Abschalten nicht verwendeter Prozesspfade). Automatisch abgeleitete Adaptionen können den Nutzern vom System empfohlen sowie bei Annahme automatisch und korrekt von diesem umgesetzt werden. Ein Beispiel ist die Auslagerung von Teilprozessen in neue Software-Architekturen (z.B. Microservices). Damit datengetriebene Selbstadaptionen die notwendige Robustheit, Effizienz und Transparenz bieten, ist ein ganzheitlicher Ansatz nötig, der vom Monitoring der implementierten Prozesse und deren Online-Analyse, über die Ableitung, Bewertung und Planung sinnvoller Prozessadaptionen, bis zur korrekten Umsetzung dieser Adaptionen im Code und Datenbank-Schema sowie in den Benutzermasken reicht – im laufenden Betrieb.

In einem ERP-System können tausende von Datenbanktabellen existieren, die durch Primär- und Fremdschlüsselbeziehungen miteinander verknüpft sind und semantische 1:1-, 1:n- und n:m Beziehungen zwischen (Geschäfts-)Objekten herstellen (z. B. eine *Bestellung* kann mehrere *Bestellpositionen* umfassen; ein *Paket* kann die *Artikel* mehrerer *Bestellungen* enthalten). Dennoch erwarten traditionelle Ansätze der Prozessmodellierung und des Process Mining, dass sich Prozesse auf Einzelfälle beziehen. Ein Prozessmodell beschreibt daher z.B. den Lebenszyklus eines Objekts 1 (z.B. Auftrag in einem Bestellprozess) oder eines Objekts 2

(z.B. Artikel), nicht jedoch deren koordinierte Ausführung. In gängigen Modellierungsnotationen wie BPMN 2.0 kann man zwar separate *Lanes* für jedes involvierte Objekt verwenden, deren 1:n- oder n:m-Beziehungen werden aber meist nicht transparent. Mit solchen klassischen Modellierungsansätzen lassen sich die o.g. genannten Prozesse, wie sie in vielen Softwaresystemen implementiert sind, nicht adäquat und ganzheitlich erfassen. Entsprechend aufwendig gestaltet sich die Implementierung und Wartung solcher objektzentrierter Prozesse. Deren datengetriebene, dynamische Adaption zur Laufzeit ist faktisch nicht möglich.

### 1.3. Wesentliche Ergebnisse und Rollen der Projektpartner

Im ProcMAPE-Projekt wurde ein durchgängiges Rahmenwerk zur datengetriebenen Evolution objektzentrierter Prozesse realisiert. Dabei konnten signifikante Fortschritte für deren Real-time-Monitoring und Online-Analyse sowie für die datengetriebene Ableitung notwendiger Prozessadaptionen und deren dynamischer Umsetzung im laufenden Betrieb erzielt werden.

Ein umfassendes, visuell unterstütztes **Realtime-Monitoring implementierter Prozesse** ermöglicht vielfältige **Online-Analysen** im laufenden Betrieb. Mittels *Performance-Analysen* für objektzentrierte Prozesse können Leistungskennzahlen wie Prozessdurchlaufzeiten, Liegezeiten einzelner Instanzen und Engpässe im Prozessablauf systematisch erfasst und ausgewertet wurden. Dadurch kann die Prozesseffizienz fundiert bewertet werden, was die Grundlage zur Ableitung bestimmter Optimierungsmaßnahmen bildet. Des Weiteren wurden von uns *statistische Analyseverfahren* realisiert, mit deren Hilfe sich auffällige oder unerwartete Verhaltensmuster in den beobachteten Prozessen identifizieren lassen. Hierbei kamen verschiedene Verfahren der deskriptiven und explorativen Datenanalyse zum Einsatz, um Abweichungen, Ausreißer oder wiederkehrende Problemstellen im Prozessablauf zu erkennen und zu verstehen. Im Rahmen der im Projekt entwickelten *Konformitätsanalysen* (engl. *Conformance Checking*) lässt sich untersuchen, inwieweit die im (Alt-)Software-System tatsächlich ausgeführten Prozesse (Ist-Prozesse) mit den gewünschten Soll-Prozessen übereinstimmen bzw. wo es Abweichungen gibt und wie diese zu bewerten sind. Darüber hinaus wurde ein Verfahren für *Compliance-Analysen* realisiert, um für objektzentrierte Prozesse die Einhaltung bestimmter Compliance-Vorgaben während ihrer Ausführung zu prüfen. Letztere umfassen z.B. interne Richtlinien, branchenspezifische Normen oder regulatorische Vorgaben (z.B. DSGVO, Dokumentationspflichten). Auf Basis der jeweiligen Analyseergebnisse können mit den im Projekt ebenfalls entwickelten Verfahren und Algorithmen dann konkrete System- und Prozessadaptionen (i.S. von Maßnahmen zur Umsetzung sinnvoller Prozessoptimierungen) abgeleitet und geplant werden. Dazu gehörten z.B. Code- und Datenbankoptimierungen, Anpassungen von Benutzermasken (inkl. ihrer Steuerung) sowie technische Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der Prozess- und Datenverarbeitung. Alternative Adaptionen und deren Effekte werden für Entscheider transparent dargestellt und mit entsprechenden Erklärungen verknüpft. Die letztendlich gewählte Adaption wird dann im laufenden Betrieb (d.h. dynamisch) systemtechnisch umgesetzt, wobei auch hier relevante Benutzergruppen (z. B. Prozessbeteiligte) über die Veränderungen informiert werden.

Für das Frontend wurden im Projekt verschiedene Diagramme zur Visualisierung objektzentrierter Prozesse entwickelt. Diese dienen der transparenten Darstellung von Analyseergebnissen und unterstützen die Benutzer dabei, relevante Informationen über den Zustand und die Leistungsfähigkeit der Prozesse schnell und intuitiv zu erfassen.

#### 1.3.1.PITSS GmbH

Die PITSS hat bereits seit ihrer Gründung 1999 mit der Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur Analyse des Source Codes von Anwendungen begonnen, um auch ohne umfassendes

Prozesswissen den Code beliebig großer und komplexer Anwendungen modernisieren zu können. Ausgehend von diesen Werkzeugen ist die PITSS in der Lage, zuverlässige Aussagen über Entwicklungsvorhaben zu tätigen und diese auch auszuführen. Hierbei liegen die Qualität und Geschwindigkeit der umgesetzten Projekte weit über dem Branchendurchschnitt. Das Unternehmen ist heute mit 30 Mitarbeitern in Stuttgart, Paderborn und den USA der führende Anbieter für Lösungen, Strategien und Tools zur digitalen Transformation von Legacy-Systemen.

Die PITSS übernahm im vorliegenden Vorhaben als Konsortialführer die Gesamtprojektkoordination sowie wesentliche softwaretechnische Entwicklungsarbeiten. Nach Projektabschluss obliegt der PITSS die Verwertung der Projektergebnisse.

### **1.3.2. Universität Ulm (UULM)**

Das Institut für Datenbanken und Informationssysteme (DBIS) der UULM forscht seit 1990 in den Bereichen der prozess- und datenorientierten Informationssysteme sowie zu aktueller Datenbank- und Prozess-Management-Technologie. Im Fokus steht die Flexibilität prozessorientierter Informationssysteme entlang ihres Lebenszyklus (Analyse / Mining, Design, Konfiguration, Betrieb und Optimierung). Prof. Reichert, DBIS-Direktor, zählt zu den weltweit führenden und meistzitierten Forschern in dem für das Vorhaben grundlegenden Bereich des *Business Process Management*. Mit ADEPT wurde von seinem Team eine innovative Technologie geschaffen und als AristaFlow BPM Suite in die Praxis transferiert – diese bildet weltweit die Speerspitze adaptiver Prozess-Management-Technologie. Ebenso einschlägig sind seine Arbeiten aus dem PHILharmonicFlows-Projekt zu objektzentrierten Prozessen, bei dem die Modellierung, Ausführung und Analyse von Prozessen und Daten integriert erfolgen. Daten-, objekt- und benutzerzentrierte Prozesse sind für OLTP- und ERP-Anwendungen typisch. Weitere Forschungsbeiträge liegen in Bereichen wie Process Mining, Process Analytics, Process Compliance, Prozessqualität, Prozessmodellierung sowie Prozessautomation.

Die UULM hat in dem Vorhaben die PITSS mit neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen zu objektzentriertem Prozess-Management und Process Mining unterstützt und ihre vielfältige Expertise in das Projekt eingebracht. Sie hat ferner die Konzepte, Algorithmen und Verfahren entwickelt für das Monitoring und die Online-Analyse objektzentrierter Prozesse, ebenso wie für die Ableitung alternativer Prozessoptimierungen (inkl. Erklärungen) und die dynamische Adaption zur systemseitigen Umsetzung der gewählten Prozessoptimierung im laufenden Betrieb. Erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang mehrere originelle Verfahren zur Feststellung der Konformität (engl. Conformance) implementierter Prozesse mit einem gegebenen Soll-Prozessmodell und mit vorgegebenen Compliance-Regeln (z.B. regulatorische Vorgaben). Alle entwickelten Artefakte wurden von UULM getestet und im Rahmen von empirischen Studien und Benutzertests evaluiert.

Die UULM hat die im Projekt erzielten Forschungsergebnisse hochkarätig publiziert (s. Publikationsliste im Kontext von AP11) sowie auf mehr als 10 internationalen Konferenzen und Workshops präsentiert. Hinzu kommt die erfolgreiche Dissertation des Projektmitarbeiters, ein Zeitschriftenartikel und mehrere eingeladene Vorträge.

## **2. Detaillierte Ausführung**

### **2.1. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten im Vergleich zur Vorhabensbeschreibung**

Nachfolgend werden die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Projektes sowie die gewonnenen Erkenntnisse/Erfahrungen entlang der Arbeitspakete präsentiert.

## **Arbeitspaket AP1: Projektmanagement (Hauptverantwortlich PITSS)**

Als Konsortialführer übernahm die PITSS die Gesamtprojektkoordination für das Vorhaben. Sie umfasste die Planung, Koordination und Durchführung der Projekttreffen sowie die Abstimmungen zwischen den Entwicklungspartnern PITSS und DBIS/UULM sowie den assoziierten Anwendungspartnern. Darüber hinaus übernahm die PITSS die Durchführung des Projektmanagements mit dem projektinternen Qualitätsmanagement und dem projektbegleitenden Berichtswesen sowie der zugehörigen Dokumentation für den Projektverbund. Dies inkludierte auch die Kommunikation mit dem Projektträger.

Das Institut für Datenbanken und Informationssysteme (DBIS) der UULM Ulm übernahm im Rahmen dieses Arbeitspakts die Projektmanagement-Aufgaben für sein Teilprojekt und die von ihm verantworteten Arbeitspakete (u.a. Sicherstellung der Einhaltung von Kosten und Terminen sowie Reporting). DBIS beteiligte sich ferner aktiv an den bilateralen Absprachen und Projekttreffen mit der PITSS. Abschließend unterstützte DBIS die PITSS bei der Abstimmung und Detailplanung der Entwicklungsaufgaben sowie bei der Feinplanung.

## **Arbeitspaket AP2: Technische Voruntersuchungen, Anforderungsfälle, Anforderungskatalog (Hauptverantwortlich PITSS)**

### **AP 2.1: Bestandsaufnahme typischer Prozessumgebungen**

Im Rahmen der technischen Voruntersuchungen erfolgte eine Bestandsaufnahme zu objektzentrierten Prozessen sowie deren Charakteristika und Implementierung in realen Software-Systemen. Berücksichtigt wurden zwei unterschiedliche Anwendungsfälle von Kunden der PITSS GmbH:

1. *Anwendungsfall 1.* Aufgabe eines klassischen Consulting-Anbieters, der für einen Kunden dessen Applikationslandschaft und die in seinen Software-Systemen implementierten Prozesse mit möglichst wenig Aufwand analysieren und verstehen möchte.
2. *Anwendungsfall 2.* Unterstützung für Kunden, die Individualsoftware für die Geschäftsprozesse immer wieder an sich ändernde Anforderungen anpassen und monitoren müssen.

Für den ersten Anwendungsfall war es notwendig, in einem unbekanntem und nicht notwendigerweise gut strukturierten bzw. dokumentierten Datenmodell die zu analysierenden Geschäftsobjekte identifizieren zu können. Dazu wurden die DB-Tabellen mittels statischen Code-Analysen in verschiedene Verwendungsarten (Konfigurations-, Logging-, Lookup-, Bridge- und Objekt-Tabellen) unterteilt. Für Objekt-Tabellen wurden Verfahren ermittelt, um die Bedeutung der einzelnen Spalten (Keys im Datenmodell, statusgebende Attribute oder ergänzende Anzeigen) zu erkennen. Im zweiten Anwendungsfall standen vor allem die datengetriebene Ableitung und dynamische Umsetzung von Prozessadaptionen im Fokus.

### **AP 2.2: Detaillierte Spezifikation**

Ausgehend von der Bestandsaufnahme wurden für die beiden Anwendungsfälle die detaillierten Spezifikationen erstellt.

Bei der Analyse unbekannter Applikationslandschaften im *Anwendungsfall 1* erlauben wir es Key-Usern, an verschiedenen Stellen eines Alt-Software-Systems eigene Annotationen zu Kontextinformationen einzubringen. Aus diesen Annotationen sowie aus dem statischen Code und den Ergebnissen der Datenmodell-Analyse werden dann geeignete Vorschläge zu relevanten Objekten sowie deren Verhalten und Zustände abgeleitet, wobei der Key-User jederzeit eigene Entscheidungen treffen kann. Für die Planungs- und Ausführungs-Phase des MAPE-Frameworks ging es bei *Anwendungsfall 1* vor allem darum, aus den objektzentrischen Betrachtungen regelmäßig auf die damit verbundenen Source-Code-Fragmente der Alt-Applikation verweisen zu können. Für *Anwendungsfall 2* der Inhouse-Applikation ging es nach ersten

Interviews darum, welche Komponenten der Alt-Applikation in welchem Maße (Prozesskonformität, Häufigkeit, Durchgängigkeit) zum Einsatz kommen. Für das entsprechende Verfahren wurden zunächst *User Interface* (UI) und Filterkriterien spezifiziert. Ferner wurde eine „Trainingsphase“ festgelegt, in welcher die Arbeitsweise der Alt-Applikation vermittelt wird, ebenso wie eine Listening-Phase, in der das Verfahren die Interaktionen der Nutzer mit dem Alt-System beobachtet und diese dem Gelernten vergleicht.

### **AP 2.3: Erhebung der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen**

Die Erfassung der funktionalen Anforderungen an das MAPE-Framework für objektzentrierte Prozesse sowie dessen Komponenten *Monitoring*, *Analysis*, *Planning* und *Execution* erfolgte mit höchster Priorität, da ohne relevante Informationen aus den verschiedenen Datenquellen keine verlässlichen Informationen und Empfehlungen abgeleitet werden können.

Zu den zentralen Anforderungen an das *Monitoring* gehörten zum einen ein minimal-invasives System-Monitoring (im Hinblick auf Performance und die erforderliche Code-Eingriffe in der Alt-Applikation), zum anderen die durchgängige Verwendung eines eindeutigen Identifikators beginnend bei einer User Session bis hin zur Änderung im Datenmodell. Bei der *Analyse* der objektzentrierten Prozesse wurden die Anforderungen für die beiden Anwendungsfälle differenziert: einmal ging es darum, die Veränderungen eines Objektstatus (d.h. die Prozessbearbeitung des Objekts) fehlerfrei und durchgängig mit Code-Fragmenten der Alt-Applikation (vom Datenmodell über die Business Logik bis hin zu verbundenen Screens und User Interface Elementen) in Verbindung setzen zu können. Ein anderes Mal stand bei der Analyse mehr im Fokus, welche Bereiche der Alt-Applikation kaum bis selten genutzt wurden und an welchen Stellen die Anwender die meisten Interaktionen mit dem System und damit einhergehend die längsten Wartezeiten hatten. Bei der *Planung* und *Ausführung* von Prozessadaptionen wiederum ging es darum, alternative Adaptionen abzuleiten und zu bewerten, die Alternativen den relevanten Nutzern angemessen zu erklären und die letztendlich gewählte Alternative robust und korrekt auf Systemebene umzusetzen, d.h. durch dynamische (Selbst-) Adaptionen darf es zu keinerlei Fehlern und unerwünschtem Systemverhalten kommen. Für beide Anwendungsfälle wurde die Planung notwendiger Prozess-, Code- und Datenbank-Adaptionen so in die Anforderungen übernommen, dass prozessbezogen die dazu gehörigen Sourcen isoliert für die weitere Optimierung betrachtet werden können. Dabei wurde wesentlich offengelassen, welche Art der Optimierung (Refakturierung, Modernisierung, Befreiung von technischen Schulden, usw.) zu berücksichtigen sind.

Bezogen auf nicht funktionale Anforderungen standen bei beiden Anwendungsfällen, insbesondere für das Monitoring, zwei Aspekte im Fokus. Zum einen sollte es dem Kunden selbstständig möglich sein, das Monitoring einzurichten und zu automatisieren. So sollte der Kunde eigenständig und über einem vom ihm bestimmten Zeitraum mit dem System arbeiten. Zum anderen sollte sichergestellt werden, dass die erhobenen Daten datenschutzkonform sind, d.h. z. B. keine Leistungsdaten der Nutzer mit dem System ermittelt werden können.

Abschließend wurde in diesem Aufgabenpaket beschrieben, wie das MAPE-Framework in die Infrastruktur des Kunden eingebunden und mit den vorhandenen Produkten zur Code-Analyse, Optimierung und Modernisierung verknüpft werden kann.

### **AP 2.4: Untersuchungen zur technischen Umsetzbarkeit**

Die Untersuchungen zur technischen Umsetzbarkeit erforderten zwei Anpassungen. Diese betrafen zum einen das *Logging der User-Interface-Interaktionen*, bei denen Umfang und Performance zum Parsen und Analysieren der erhobenen Events bzw. Daten in Einklang gebracht werden mussten. Der ursprüngliche Wunsch, auch die selektierten Daten innerhalb einer Transaktion erheben zu wollen, um mehr *Business Context* zu erzeugen, musste in einem ersten Release aus Performance Gründen ausgeschlossen werden. Eine Überarbeitung des

Datenmodells des Frameworks und eine Parallelisierung der Monitor-Komponente sollen zukünftig Verbesserungen bringen. Zum anderen musste die Konfiguration der Monitoring-Komponente für die Datenänderungen mehrfach angepasst werden, um relevante Informationen zum *Business Context* extrahieren zu können, die ein fehlerfreies *Matching* zwischen UI Aktionen (d.h. Nutzerinteraktionen) und Datenänderungen möglich machten. Beide Änderungen waren problemlos möglich.

### **Arbeitspaket AP3 - Entwicklung einer Komponente für das Management von relationalen Prozessstrukturen und Prozesssichten (Hauptverantwortlich UULM)**

Das PHILHarmonicFlows-Framework der UULM bietet die Möglichkeit, relationale Prozessstrukturen (= Prozessstrukturen bestehend aus einer Vielzahl miteinander interagierender *Object Lifecycle Processes*) im Kontext des MAPE-Frameworks zu modellieren und diese effizient sowie robust zu speichern, zu verarbeiten und zu nutzen. Dabei verwaltet das Framework alle prozessrelevanten Objekte (inkl. *Object Lifecycle Processes*) sowie deren semantische Beziehungen, die mithilfe eines spezifischen Verfahrens aus *objektzentrierten Event Logs* gewonnen werden konnten. Zur Ausführungszeit sind die Instanzen relationaler Prozessstrukturen hochgradig dynamisch aufgrund der (1) flexiblen Ausführbarkeit objektzentrierter Prozesse (z.B. Löschen/Hinzufügen von Objekten, Ad-hoc-Abweichungen von der definierten Maskenreihenfolge oder Masken-Steuerungslogik) sowie der (2) Möglichkeit, in einem *Business Context* dynamisch Objektinstanzen zu erzeugen bzw. zu löschen.

Bei der Implementierung der Komponente für das Management relationaler Prozessstrukturen war uns die robuste Speicherung und Verarbeitung der Daten besonders wichtig. Dazu wurde die Multi Model NOSQL Datenbank *ArangoDB* in die Laufzeitumgebung des Frameworks integriert. Dies ermöglichte uns die Speicherung und Verwaltung von Daten entweder als JSON-Dokument oder Graph. *ArangoDB* war daher gut geeignet, um relationale Prozessstrukturen (d.h. Objektinstanzen und deren Relationen) als Graphen zu speichern. Objektinstanzen selbst werden als JSON-Dokumente gespeichert, die die Knoten des Graphen bilden. Relationen werden durch Kanten zwischen diesen Knoten repräsentiert. Mithilfe der integrierten Graph-Traversierungsfunktionen lassen sich so z.B. tieferliegende, verknüpfte Objektinstanzen ermitteln. Auf dieser Grundlage wurde ein Ansatz zur Erweiterung der bisherigen Datenstruktur um prozessrelevante Code-, Datenbank- und Maskenartefakte entwickelt. Dadurch lassen sich Querbezüge zwischen objektzentrierten Prozessen und Artefakten des unterstützenden Softwaresystems für das MAPE-Framework effizient herstellen. Ebenso wurde ein Sichtenkonzept für verschiedene Benutzergruppen (d.h. Entwickler, Endbenutzer, Systemadministratoren, Prozesseigentümer) entwickelt und in das Framework integriert.

### **Arbeitspaket AP4 - Entwicklung einer Gesamtarchitektur für das MAPE-Framework für objektzentrierte Prozesse (Hauptverantwortlich PITSS)**

#### **AP 4.1: Spezifikation der Komponenten und ihrer Schnittstellen**

Für die Monitoring-Komponente war zu spezifizieren, aus welchen Datenquellen relevante Informationen für das *Mining (Discovery)* objektzentrierter Prozesse berücksichtigt werden sollten. Notwendig sind *Event Logs* des Applikationsservers (z.B. mit Aufzeichnungen von Nutzerinteraktionen) und die Datenbank mit Informationen zu Objekten und Objektänderungen. Die Konzeption der Schnittstellen sollte sicherstellen, dass zukünftig weitere Frontend- bzw. Backend-Komponenten einbezogen werden können. Wichtig war es auch, die Schnittstellen zwischen den MAPE-Komponenten robust gegenüber dem Zeitpunkt der Verfügbarkeit von Logs zu gestalten. D.h. Nutzerinteraktionen sollten verarbeitet werden können, selbst wenn Logs bzw. Daten noch nicht verfügbar sind und umgekehrt. Da die zeitgleiche Verfügbarkeit der Rohdaten ohnehin nicht sichergestellt werden kann, war diese Spezifikation zwingend.

Der Workflow zwischen den MAPE-Komponenten kann sowohl von Nutzern als auch automatisiert gesteuert werden können – jede Komponente sollte zunächst autark sein und über verschiedene Verfahren angesprochen werden können. Die Übergabe der Kontrolle zwischen den Komponenten zur Analyse, Planung und Ausführung von Prozessadaptionen erfolgt durch Steuerung des Nutzers über das User Interface, da über die Monitoring-Komponente kontinuierlich neue Informationen in das System einfließen, die ggf. weitere Adaptionen nach sich ziehen können. Wichtig ist, dass nach Abschluss der Analyse-Phase alle weiteren Workflow-Schritte mit denselben aktuellen Daten aus der Monitoring-Komponente arbeiten und zudem mit den Analyse-Daten des statischen Codes ergänzt werden.

#### **AP 4.2: Simulation ausgewählter Anwendungsfälle**

Die Simulation der ersten beiden Workflow-Schritte, insbesondere der Monitoring- und Analyse-Komponenten wurde anhand kleinerer Beispielapplikationen mit überschaubaren Anwendungsfällen evaluiert. *Missing Links* konnten so früh identifiziert und behoben werden. Weitere Simulationen mit größeren Datenmengen trugen dazu bei, Maßnahmen zur Performance-Optimierung zu identifizieren und umzusetzen.

Die Simulation von Anwendungsfällen aus anderen Infrastruktur-Installationen (Betriebssystem, Version der eingesetzten Produkte zu Datenbank und Applikations-Framework) ließen erkennen, dass vorhandene Fehler in den von der Anwendung erstellten Log-Files innerhalb der Monitoring Komponente eine flexiblere Fehlerbehandlung und Toleranz erforderten.

Die Simulation von Anwendungsfällen aus einem unbekanntem Kundenumfeld schließlich warf die Frage auf, wie Monitoring-Daten zu analysieren sind, wenn die assoziierten Sourcen nicht oder in einer nicht kompatiblen Version vorhanden sind. Dazu wurden die Anforderungen an die Analyse- und Plan-Komponente verfeinert.

#### **AP 4.3: Konzeption der Gesamtarchitektur & Implementierung der Basiskomponenten**

In diesem Arbeitspaket wurde zunächst die ProcMAPE-Gesamtarchitektur beschrieben. Basierend auf den unterschiedlichen Datenquellen und der notwendigen asynchronen Verarbeitung der einfließenden Daten wurde ein Multi-Staging-Ansatz verfolgt, in dem zunächst jede Datenquelle für sich geladen und im Hinblick auf die notwendige Datenqualität überprüft werden kann. Das Datenmodell innerhalb der Staging-Area wurde so entworfen, dass jede Quelle für sich den jeweils verbindenden Schlüssel beinhaltet, so dass an jeder Stelle des Frameworks ein vollumfängliches Bild der Prozesse möglich war.

Bei der Wahl der Export- und Import-Schnittstellen war unser Entscheidungsprozess gebunden durch die Verfügbarkeit von Alternativen innerhalb der bestehenden Infrastruktur-Komponenten, d.h. für den Weblogic-Server stand nur ein vom Hersteller bestimmtes binäres und proprietäres Dateiformat zur Verfügung. Dieses konnte in der Staging-Area gelesen, transformiert und in die gewünschte Persistenz überführt werden. Für den Import der datenbankrelevanten Informationen wurde ein eigenes Format definiert, das zum einen zu Kontrollzwecken leicht vom Kunden (insbesondere von dessen DB-Administratoren) verstanden und kontrolliert werden kann und zum anderen die Möglichkeit einer leichten, aber sehr guten Verschlüsselung für DSGVO-relevante Daten innerhalb des Event- bzw. Datenstreams bietet.

In AP4.3 wurden die ersten Basisversionen der vier MAPE-Komponenten (Monitor, Analyse, Plan, Execute) entwickelt. Dies umfasst vor allem die konsistente Datenhaltung zwischen den Komponenten und die grundlegenden Algorithmen, um die Prozess-Ausführungen zu identifizieren, isolieren und gezielt Optimierungen zukommen zu lassen.

## Arbeitspaket AP5 - Entwicklung der Monitoring-Komponente für objektzentrierte Prozesse (M) (Hauptverantwortlich UULM, PITSS)

In AP5 wurde von der UULM und der PITSS GmbH ein umfassender Monitoring-Ansatz für objektzentrierte Geschäftsprozesse entwickelt. Dazu wurden zunächst verschiedene Metriken für das Monitoring von Prozessinstanzen während ihrer Ausführung definiert, die einen Überblick zu laufenden, beendeten, gelöschten und zu erwartenden Instanzen ermöglichen. Zusätzlich wurden Metriken zur Erfassung der Dauer von Prozessinstanzen spezifiziert. Auf ihrer Basis ist es z. B. möglich, diejenigen Instanzen zu clustern, die im Zeitplan liegen, bei denen zeitliche Risiken bestehen oder die bereits in Verzug sind. Das Monitoring der Prozessinstanzen dient dazu, Probleme, Verspätungen oder Verzögerungen so früh wie möglich zu erkennen, um eventuellen Ressourcenengpässen oder anderen Problemen entgegenwirken zu können. Hierzu hat die UULM mehrere Forschungsbeiträge geliefert. [7, 8, 11]

Von der UULM wurde untersucht, wie die von Dashboards her bekannten Sunburst-Diagramme für die Visualisierung und das Monitoring objektzentrierter Prozesse (d.h. mit in Beziehung zueinanderstehenden Objektinstanzen) genutzt werden können. Dazu wurden entsprechende Ergebnisse veröffentlicht [10, 11]. Bei Benutzertests mit komplexen Anwendungsszenarien ergaben sich Einschränkungen hinsichtlich Lesbarkeit und Verständlichkeit großer Sunburst-Diagramme, wie sie bei relationalen Prozessstrukturen mit hunderten von Objekten resultieren (siehe AP10). Um diese zu überwinden, wurden verschiedene Erweiterungen entwickelt und in einer empirischen Studie miteinander verglichen, insbesondere im Hinblick auf die Verständlichkeit, Lesbarkeit und Eignung der jeweils generierten Diagramme. Die Ergebnisse wurden zur Veröffentlichung eingereicht [12]. Darüber hinaus wurden vier Visualisierungstechniken entwickelt, um die Lesbarkeit und Eignung von großen, unübersichtlichen Sunburst-Diagrammen zu optimieren. Zu diesem Zweck wurde eine empirische Studie mit 154 Teilnehmenden [AP 10] durchgeführt, um die Eignung der Visualisierungsmethoden zu untersuchen. Die Ergebnisse der Studie wurden anschließend durch eine empirische Eye-Tracking-Studie mit 38 Teilnehmern [AP 10] ergänzt. Der Fokus lag auf der Analyse der Benutzerinteraktionen mit großen und unübersichtlichen Sunburst-Diagrammen. Ein ebenfalls untersuchter Visualisierungsansatz sind Heatmaps, die z.B. für Analysen zur Auslastung von Ressourcen und für die Visualisierung zeitlicher Verzögerungen während der Prozessausführung genutzt werden können. Dazu wurde von der UULM ein entsprechender Visualisierungsansatz in das Monitoring-Framework integriert. Dieser generiert Heatmaps für objektzentrierte Koordinationsprozesse, deren Einfärbung in Abhängigkeit von Häufigkeits- und Verweildauereanalysen erfolgt; Heatmaps werden während der Prozesslaufzeit kontinuierlich angepasst.

Des Weiteren wurden mehrere methodische Ansätze entwickelt, evaluiert und miteinander verglichen, um den Fortschritt von objektzentrierten Prozessen sowohl auf Instanz- als auch Objektebene zu quantifizieren. Diese Ansätze basieren entweder auf Event Logs, die den tatsächlichen Ablauf und die Zeitpunkte von Instanzen abbilden, oder auf der zugrundeliegenden relationalen Prozessstruktur (falls keine ausreichenden Event Logs verfügbar sind). Aus den Zwischenergebnissen dieser Fortschrittsberechnungen lassen sich verschiedene Aspekte ableiten. Dazu gehören Metriken für Performanz-Analysen, mit denen sich z.B. Durchlaufzeiten, Wartezeiten oder Engpässe quantifizieren lassen, statistische Analysen zum Prozessverhalten, die Muster, Varianzen und Korrelationen im Ablauf aufdecken, sowie Compliance-Analysen, die prüfen, inwieweit der Prozess den vordefinierten Regeln, Richtlinien und regulatorischen Anforderungen entspricht. Mithilfe dieser Ableitungen und weiterer Monitoring-Komponenten ist eine umfassende Einsicht in die Effizienz, Stabilität und Compliance der objektzentrierten Fortschritte möglich [8].

Im *User Interface* wurde diese Online-Monitoring Komponente zunächst auf Basis der zur

Verfügung stehenden Technologie des Low-Code Frameworks *APEX* und der darin enthaltenen JavaScript-Integrationsmöglichkeiten über die OpenSource-Library *Cytoscape* realisiert. In einem weiteren Schritt wurde evaluiert, welche verfügbaren Diagramm-Typen aus dem Low-Code Framework geeignet sind, um die von der UULM definierten und evaluierten Monitoring-Ergebnisse anzureichern.

### **Arbeitspaket AP6 - Entwicklung der Analysekomponente für objektzentrierte Prozesse (A) (Hauptverantwortlich UULM, PITSS)**

Ausgehend von den Event Logs objektzentrierter Prozesse wurden grundlegende Analysearten identifiziert, definiert und implementiert. Dazu gehören Performance-Analysen (z.B. Ermittlung von Metriken wie Prozessdurchlaufzeiten oder Liegezeiten einzelner Prozessinstanzen) [11], statistische Analysen (z. B. Ermittlung von auffälligem Prozessverhalten) [11], Konformitätsanalysen (d.h. Ermittlung von Abweichungen zwischen dem implementierten (Ist-)Prozess und dem gewünschten Soll-Prozess (sog. Conformance Checking) [1] sowie Compliance-Analysen (z. B. Überprüfen der Einhaltung von Compliance-Regeln). Hinzu kommen umfangreiche Analysen zur Feststellung, ob bzw. inwieweit die Log-Daten mit der Logik der Benutzermasken in Implementierungen objektzentrierter Prozesse übereinstimmen [5].

Analysen sind nicht nur für die Lebenszyklusprozesse einzelner Objekte (z.B. Kundenauftrag, Rechnung) möglich, sondern auch für Multi-Objekt-Prozesse, d.h. Geschäftsprozesse in deren Ausführung mehrere Objekte und deren Lebenszyklusprozesse involviert sind. Die koordinierte Ausführung dieser Lebenszyklusprozesse erfolgt durch *Koordinationsprozesse*, die die komplexen Abhängigkeiten zwischen den Objektlebenszyklen definieren und überwachen (z.B. *Rechnung* darf erst freigegeben werden, wenn alle referenzierten *Artikel* in der angegebenen Menge geliefert worden sind). Unter anderem hat die UULM ein Conformance-Checking-Verfahren für Koordinationsprozesse auf Grundlage von *Linear Temporal Logic* Regeln (LTL-Regeln). Dieses wurde mithilfe der Python-Bibliothek PM4PY implementiert. Die Evaluationen zeigen, dass dieser Ansatz eine zuverlässige Methode für das Conformance-Checking von Koordinationsprozessen darstellt. Zusätzlich wurde ein weiterer Ansatz verfolgt, bei dem Koordinationsprozesse in Petri-Netze umgewandelt wurden, um bekannte Analyseverfahren aus diesem Bereich anzuwenden. Alles wissenschaftlichen Arbeiten (inkl. Prototypimplementierung und Evaluation) lagen bei der UULM [1].

Für alle Algorithmen und Verfahren wurden Performancetests durchgeführt, in deren Rahmen unter anderem die Auswirkungen der Generierung von Event Logs in einem Software-Altssystem analysiert wurden [4]. Die Tests wurden unter der Prämisse durchgeführt, dass a priori weder Event Logs noch Domänenwissen existieren – eine typische Situation zum Start eines Software-Modernisierungsprojekts. Im Zuge einer Studie wurden Altssysteme analysiert und sowohl Abhängigkeiten in der Datenbank als auch im Quellcode identifiziert. Zudem wurde ein Clustering der Datenbanktabellen durchgeführt, um zu ermitteln, welche Tabellen potenziell Objektinstanzen speichern. Der Quellcode des Altsystems wurde an den bestimmten Stellen mittels Code-Injektion erweitert, so dass eine automatische Generierung von Event-Log-Einträgen [4] möglich wurde. Diese Aufgaben lagen überwiegend im Verantwortungsbereich der PITSS GmbH, die UULM war an mehreren Stellen in die Konzeption eingebunden. Es konnte festgestellt werden, dass es zwischen Prozessen mit und ohne Tracking-Informationen keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Gesamtlaufzeit gibt. Dies hat eine Laborstudie [AP10] an der UULM bestätigt. Im Rahmen der Studie wurden Probleme im Wesentlichen nur im Zusammenhang mit rekursiven Aufrufen festgestellt – hier werden bei jedem Rekursionsschritt zusätzliche Ereignisse dokumentiert, was zu Schwierigkeiten führen kann. Durch eine statische Codeanalyse können allerdings Codefragmente identifiziert werden, die in rekursiven Aufrufstrukturen oder iterativen Schleifen genutzt werden, um sie von Tracking-

Prozessen auszuschließen. Diese Lösung gewährleistet eine zuverlässige und konsistente Nutzung des Verfahrens und trägt somit zu einer hohen Prozessstabilität bei.

Analysen sollten auch für den Fall möglich sein, dass keine Prozessmodelle (z.B. Objektlebenszyklen) vorliegen. Dazu wurde von der UULM ein objektzentrierter *Process Discovery* Algorithmus entwickelt [2], mit dem die Zustände und Schritte eines Lebenszyklusprozesses automatisch aus einem Event Log abgeleitet werden können. Im Anschluss können daraus dann die eigentlichen (Objekt-)Lebenszyklusmodelle (d.h. Prozessmodelle für die Verarbeitung einzelner Objekte) rekonstruiert werden. Im Zuge der Implementierung dieses Ansatzes konnte sowohl die Abfolge von Masken bei der Bearbeitung eines Geschäftsobjekts abgeleitet werden als auch die Bearbeitungslogik einzelner Masken [2]. Dazu wurden von der UULM ein Verfahren zur Vorverarbeitung von Event Logs implementiert und bestehende Process-Mining-Algorithmen (u.a. Heuristic Miner) adaptiert. In einer Evaluationsstudie konnte die Praxis-tauglichkeit des entwickelten Process Discovery Algorithmus demonstriert werden [1, 2].

Des Weiteren wurde ein Verfahren zur Analyse von Chunks in Event Logs entwickelt. Ein *Chunk* bezeichnet eine logisch zusammenhängende Gruppe von Log-Einträgen, die sich auf denselben technischen oder fachlichen Vorgang (z.B. Teilprozess, Transaktion, Aktionseinheit eines Nutzers) beziehen. Chunks waren nicht explizit in der Logdatei markiert, sondern wurden von PITSS-Experten zunächst manuell analysiert, definiert und im Log entsprechend markiert. Die Grundlage dafür bilden einfache Heuristiken (z.B. gemeinsame Attribute oder zeitliche Nähe der betreffenden Logeinträge). Um dieses aufwändige Verfahren zu automatisieren, wurde von der UULM ein KI-Modell, basierend auf maschinellem Lernen, entwickelt, das Chunks automatisch zuordnen und gruppieren kann. Zusätzlich wurde große synthetische Datensätze erzeugt, um die Visualisierung von Chunks im Monitoring-Framework umfassend testen zu können [AP10]. Dazu wurde ein Netzwerkdiagramm implementiert, welches die Übergänge zwischen den Chunks visualisiert. Damit können die Abhängigkeiten zwischen Chunks und die Häufigkeit ihrer Ausführung analysiert werden.

Die Entwicklung der Analyse-Komponente des MAPE-Frameworks richtete sich zunächst auf den statischen Code der Alt-Applikation, um aus dem Datenmodell die in AP2 beschriebenen Verwendungsklassen der Datenbanktabellen ableiten zu können. Im weiteren Verlauf konnte so der Fokus auf die objekttragenden Tabellen gerichtet werden. Für diese wurde eine Analyse-Funktionalität bereitgestellt, um die Spalten bezüglich ihrer Eigenschaft als Äquivalenz-Merkmal für eine Objektinstanz durch Code-Betrachtung zu ermöglichen. Dieser Algorithmus nutzt die Identifikation von Fallunterscheidungen, Schleifen und Join-Conditions auf dedizierten Spalten, um diese als Äquivalenz-Merkmal einzustufen.

Dem folgend wurde ein Verfahren implementiert, um die Nutzerinteraktionen mit dem System zu Chunks zu gruppieren. Damit konnte erreicht werden, dass eine minimal unterschiedliche Verwendung des User Interfaces (z.B. Ausfüllen von Eingabe-Feldern in einer irrelevant anderen Reihenfolge), die aber zum selben Effekt auf der Datenbankebene führten, zusammengefasst werden können. Gleichzeitig konnte dieses Ordnungskriterium genutzt werden, um in der Listening-Phase (siehe AP2) in langen User-Sessions, Teilprozesse aus der Trainingsphase wiederzuerkennen und von der Prozess-Bezeichnung zuzuordnen.

### **Arbeitspaket AP7 - Entwicklung der Komponente zur Ableitung und Planung sinnvoller Adaptionen für objektzentrierte Prozesse (P) (Hauptverantwortlich PITSS, UULM)**

In AP7 wurde die MAPE-Komponente zur datengetriebenen Ableitung und Planung sinnvoller Adaptationen für objektzentrierte Prozesse entwickelt. Ein Beispiel hierfür ist die automatische Ableitung von Anpassungen in den Bildschirmmasken für einzelne Benutzer bzw. Benutzergruppen. *Benutzerspezifische Anpassungen* sind z. B. sinnvoll, wenn ein bestimmter Benutzer eine gewisse Reihenfolge in der Befüllung der Felder einer Maske präferiert. Maskenanpassungen für eine Benutzergruppe (sog. *Schema-Evolution*) sind nützlich, wenn sich aufgrund

der bisherigen Maskeninteraktionen der Mitglieder dieser Gruppe gezeigt hat, dass diese von der empfohlenen Maskenlogik abweichen, etwa wenn bestimmte Felder nie oder nur sehr selten befüllt werden oder die tatsächliche Reihenfolge der Maskenabarbeitung von der empfohlenen abweicht. Weitergehende Adaptionen sind ebenfalls ableitbar, etwa die Hinzunahme, das Löschen oder die Erweiterung von Bildschirmmasken, um bestimmte Compliance-Regeln zu erfüllen. Insgesamt entwickelte UULM fundierte Konzepte, Algorithmen und Verfahren zur Ableitung und Planung von Adaptionen für objektzentrierte Prozesse und evaluierte diese in einer empirischen Studie. [1, 5] Mittels Plug-in-Architektur wird sichergestellt, dass die entwickelte Komponente erweiterbar ist, d.h. es können jederzeit neue Algorithmen zur technischen Umsetzung von Prozessoptimierungen auf Systemebene auf der Basis standardisierter Schnittstellen eingebracht werden. Des Weiteren wurde eine Sub-Komponente zur Visualisierung und Erklärung alternativer Prozessanpassungen realisiert.

Des Weiteren wurde von der UULM die in Event Logs aufgezeichneten Ist-Prozesse mit definierten (Objekt-)Lebenszyklusprozessen abgeglichen [1]. Für den direkten Vergleich wurde eine positionsbasierte Repräsentation für (Objekt-)Lebenszyklusprozesse und Event Logs entwickelt. Dabei wurde jedem Zustand – vom Start- bis zum Endzustand – eine eindeutige Position im Lebenszyklusprozess zugewiesen. Für alle Schritte innerhalb eines Zustands wurde dasselbe Verfahren angewandt. Für jede (Objekt-)Instanz und jedes Auftreten innerhalb einer Instanz wurden ebenfalls Positionen im Event Log vergeben. Dadurch wurde es möglich, die einzelnen Positionen im Event Log mit denen im Lebenszyklus zu vergleichen und evtl. Abweichungen zu identifizieren. Basierend auf identifizierten Abweichungen und deren Häufigkeit wurde ein Evolutionsansatz entwickelt, der notwendige Anpassungen des betreffenden Lebenszyklusprozesses (und damit der aus ihm generierten Bildschirmmasken) spezifiziert. Fehlende Schritte im Event Log zeigen z. B. an, dass ein Maskenfeld nie ausgefüllt wurde und dem entsprechend gelöscht werden kann. Insgesamt können mit dem entwickelten Verfahren die Modelle von (Objekt-)Lebenszyklusprozessen und die daraus automatisch generierten Benutzermasken bei Bedarf flexibel angepasst werden. Insgesamt wurden fortschrittliche Algorithmen entwickelt, die Änderungen im Prozessmodell (z.B. im Lebenszyklus) vornehmen können, wenn Anpassungen in den Benutzermasken notwendig sind. [1]

Für die beiden in AP2 betrachteten Anwendungsfälle wurde in der MAPE-Planungskomponente prototypisch ein einheitlicher Ansatz für die Refakturierung der jeweiligen Alt-Applikation implementiert. Basierend auf den Monitoring-Daten sowie unter Einbindung des Benutzers (→ Festlegung des Beobachtungszeitraums für das Monitoring und Auswahl der zu betrachtenden Prozesse) können für die gewählten Prozesse optimierte Masken und Maskenabfolgen abgeleitet werden. Diese beinhalten ausschließlich Elemente (z.B. Felder, Aktionsflächen), die für die Ausführung dieser Prozesse relevant sind. Damit wird sichergestellt, dass bei der Modernisierung einer Alt-Applikation die Ableitung sinnvoller Optimierungen für bestimmte Prozesse nur die für diese relevanten Artefakte einbezieht. Ebenfalls wird sichergestellt, dass innerhalb der laufenden Alt-Applikation eine im Hinblick auf Performance, Klickraten oder anderen Aspekten nicht effiziente Prozessunterstützung isoliert modernisiert werden kann.

Mit der entwickelten Komponente konnten für die beiden Anwendungsfälle teilautomatisiert neue Masken erstellt werden, die ausschließlich Informationen beinhalteten, die für die jeweils ausgewählten Prozesse und Prozessschritte nötig waren. Alle weiteren Funktionalitäten und „überflüssigen“ Informationen konnten dagegen ausgeblendet werden. Ebenfalls teilautomatisiert konnten Datenflüsse, die sich über mehreren Masken desselben Benutzers verteilten, in einzelnen Masken zusammengefasst werden, was zu Effizienzsteigerungen in der Prozessbearbeitung führte. Schließlich wurde für alle Analysen und Änderungen am Quellcode ein *User Interface* erstellt. Dieses konnte sowohl im Kontext der Alt-Applikation wichtige Aspekte zu Objekten, Attributen und Prozessbeschreibungen aufzeigen, aber auch als Brücke zu den entsprechenden Software-Artefakten (Programm-Einheiten, Validierungen, *User Interface*

*Events*) fungieren. Der Bereich der Prozessbeschreibungen und Interpretationen war eher für den Endbenutzer der Alt-Applikation gedacht, während die teilautomatisierten Adaptionen innerhalb der Applikation für Software-Architekten bzw. -Entwickler vorgesehen waren.

### **Arbeitspaket AP8 - Entwicklung der Komponente zur Durchführung der Adaptionen (E) (PITSS)**

Auf Grundlage der in den Arbeitspaketen AP4 – AP7 entwickelten MAPE-Komponenten und Algorithmen wurde in AP8 die vierte MAPE-Komponente zur Durchführung abgeleiteter Prozessadaptionen entwickelt und systemtechnisch umgesetzt. Mit ihr lassen sich objektzentrierte Prozesse bzw. deren Artefakte (Code-Fragmente, Benutzermasken, Datenbanktabellen) automatisch optimieren sowie an das Verhalten einzelner Nutzerinnen oder ganzer Nutzergruppen adaptieren. Hierfür wurden robuste und effiziente Verfahren implementiert, getestet (inkl. Performance Tests) und integriert (inkl. Integrationstest). Zudem wurde das Logging durchgeführter Adaptionen implementiert, auf dessen Basis sich mittels Konfiguration und Filterung verschiedene Änderungsreports einfach ableiten lassen.

Ausgehend von den mit der MAPE-Planungskomponente (AP7) für ausgewählte Prozesse extrahierten und im Repository abgelegten Artefakte können modernisierte Software-Artefakte für ein neues Softwaresystem erzeugt werden (z.B. Microservice-Architektur oder – im konkreten Anwendungsfall – ein modernes Low-Code Framework). Dieser Prozess konnte aus Sicht des Architekten und Prozessverantwortlichen im Laufe der Generierung angepasst und mehrfach wiederholt werden, ohne die vorhandenen Prozesse der Alt-Applikation zu beeinflussen. Somit konnte eine sukzessive Modernisierung der Alt-Applikation realisiert werden, wobei das realisierte Lowcode-Framework kurze Zyklen ermöglichte.

Durch das von den MAPE-Komponenten gemeinsam genutztes Repository, das mit Monitoring-Daten, Analyse-Ergebnissen sowie Änderungsplänen und zugehörigen Artefakten angereichert wurde, kann die Execution-Komponente des MAPE-Frameworks ohne weitere Schnittstelle auf die vorhandenen und angereicherten Daten zugreifen. Die Markierung betroffener Artefakte innerhalb des Repository bietet darüber hinaus die Möglichkeit, Adaptionen zielgerichtet (z. B. zwecks Performance Tuning oder Ausnahmebehandlungen) innerhalb der bestehenden Alt-Applikation durchzuführen.

Für die Änderungen wurden Checklisten und Protokolle für die verschiedenen Zielgruppen, insbesondere für Architekten und Entwickler, erstellt. Diese dienten nicht nur zur Dokumentation der durchgeführten Adaptionen, sondern steuerten auch nachgelagerte Tätigkeiten zum Finetuning und Testen der erstellten Artefakte.

### **Arbeitspaket AP9 - Schnittstellenkonfiguration und Implementierung des Demonstrators (Hauptverantwortlich PITSS)**

In AP9 wurden die von PITSS und UULM entwickelten MAPE-Komponenten in einem funktionsstarken Demonstrator (Proof-of-Concept) zusammengeführt. Dazu wurden die Schnittstellen und Ablaufmodelle für die Interaktionen der MAPE-Komponenten untereinander definiert. Bereits in einer frühen Phase des Projektes wurde festgelegt, dass ein gemeinsames Repository, in dem die vorhandene Struktur der Alt-Applikation – von der Implementierung, über das Design des *User Interfaces* bis zur Modellierung der Datenhaltung – gespeichert wird, um die von den MAPE-Komponenten generierten Daten angereichert werden sollte.

Zur Erhebung der Monitoring-Daten wurden Schnittstellen zum Applikationsserver und Datenbank-Server definiert. Diese wurden minimal-invasiv im Hinblick auf Performance und Interaktion mit der Alt-Applikation gestaltet. Auf die Verwendung von *Web Services* wurde aber verzichtet, da sichergestellt werden sollte, dass das ProcMAPE-Framework ggf. auch in einer völlig losgelösten Infrastruktur betrieben werden kann.

Für die integrative Verwendung wurden Services bereitgestellt, die den Transport der Informationen über die Schnittstellen-Dateien für den Kunden automatisieren konnten. Die Verarbeitung der Informationen in den Schnittstellen konnte reproduzierbar, asynchron und fehler-tolerant implementiert werden.

Auf einer isolierten Umgebung wurde ein Demonstrator implementiert, der mit den von den assoziativen Partnern bereitgestellten Informationen die Arbeitsschritte des ProcMAPE Framework zusammenfassend präsentieren konnte. Alle Komponenten wurden unter einer einheitlichen Oberfläche, basierend auf dem integrativen Software-Repository, entwickelt.

### **Arbeitspaket AP10 – Projektbegleitende Evaluation (Hauptverantwortlich PITSS)**

Im AP10 wurden parallel zu den Entwicklungsarbeiten verschiedene Tests der Softwarekomponenten und mehrere Studien durchgeführt. Das Monitoring von Objektinstanzen wurde in das Framework integriert und mithilfe eines Benutzerakzeptanztests evaluiert und optimiert (UULM). Des Weiteren wurde die Semantik des Sunburst-Diagramms in das Monitoring-Framework integriert – das Diagramm kann sowohl zur Entwurfszeit (objektbasierte Ansicht) als auch Laufzeit (instanzbasierte Ansicht) angezeigt werden. Für die instanzbasierte Ansicht wurden zwei Konzepte [11] (Informationen zum globalen Status und zum Fortschritt einzelner Instanzen) entwickelt, die ebenfalls im Monitoring-Framework integriert wurden. Mittels Anwendungstests wurden weitere Optimierungen realisiert, um eine bessere Lesbarkeit und präzisere Ergebnisse zu erzielen. Zudem wurde eine Anwenderstudie durchgeführt, in der mögliche Diagrammtypen zur Darstellung objektzentrierter Geschäftsprozesse in einem Monitoring-Framework untersucht werden. Betrachtet wurden u.a. Dendrogramme, Balken, Baum und Euler-Diagramme, die Informationen zum globalen Status und zum Fortschritt einzelner Instanzen objektzentrierter Prozesse visualisieren. Ziel war es, den Endnutzer mit einer breiten Palette an Darstellungsmöglichkeiten zu versorgen, um personalisierte Monitoring-Dashboards zu gestalten. In diesem Kontext hat sich die UULM auch mit der Visualisierung objektzentrierter Prozesse mittels BPMN 2.0 befasst, die hieraus hervorgegangene Publikation erhielt den Best Paper Award der *Modellierung'24*-Fachtagung in Potsdam [3].

Zur Evaluierung der MAPE-Komponenten wurden typische Szenarien mit kundenspezifischen Sourcen und definierten Beobachtungszeiträumen auf Test- und Produktionssystemebene durchgespielt. Die Ergebnisse lieferten wertvolles Feedback zur Usability und Performance der MAPE-Komponenten, insbesondere für die Monitoring- und Analyse-Komponenten.

Bei der Entwicklung der Monitoring Komponente wurde von Anfang an auf eine minimal-invasive Belastung des jeweiligen Software-Systems geachtet. Dies erforderte, dass Konvertierungsprozesse in das MAPE-Framework verlagert werden. Allerdings führte die Integration von mehreren 100 User Sessions ohne Parallelisierung zu Engpässen der Analyse-Komponente, weshalb wir deren Algorithmen refakturiert haben, um eine parallele und verteilte Verarbeitung von Monitoring Daten zu ermöglichen.

### **Arbeitspaket AP11 - Öffentlichkeitsarbeit und Transfer (Hauptverantwortlich PITSS)**

Im Rahmen von AP11 wurden von den Entwicklungspartnern PITSS und UULM die Forschungsergebnisse ausgewertet, geeignet aufbereitet und veröffentlicht. UULM hat Projektergebnisse in diversen wissenschaftlichen Arbeiten [2 – 13] veröffentlicht sowie auf wissenschaftlichen Konferenzen und Workshops präsentiert. Eine Veröffentlichung erschien in einer renommierten Zeitschrift [5]. Des Weiteren war die Dissertation des Projektmitarbeiters Marius Breitmayer thematisch im Projekt angesiedelt, diese wurde im Dezember 2024 verteidigt und im letzten Projektjahr formal publiziert. Im Detail:

[1] Breitmayer, Marius (2025). [Mining Object Lifecycle Processes: Challenges, Concepts, Uses Cases](#). Dissertation, Fachbereich Informatik, Universität Ulm.

- [2] Breitmayer, Marius; Arnold, Lisa; Goth, David; Reichert, Manfred (2024). An approach for discovering data-driven object lifecycle processes. In Proceedings 18<sup>th</sup> Int Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS), Guimarães, Portugal, 2024, Springer Nature, S. 237– 254.
- [3] Breitmayer, Marius; Arnold, Lisa; Pejic, Marko; Reichert, Manfred (2024). Transforming object-centric process models into BPMN 2.0 models in the PHILharmonicFlows framework. In Proc. Modellierung 2024, S. 83–98, Gesellschaft für Informatik (Best Paper Award).
- [4] Breitmayer, Marius; Arnold, Lisa; Reichert, Manfred (2024). Simulating event logs from object lifecycle processes. In Proceedings 16<sup>th</sup> Int'l ZEUS Workshop, Ulm, 2024, CEUR Workshop Proceedings Volume 3673, S. 14–21.
- [5] Breitmayer, Marius; Arnold, Lisa; Winter, Michael; Reichert, Manfred (2024). Exploring user editing preferences in electronic forms: an empirical study. Information Systems and e-Business Management, 22(1): 171-207, 2024.
- [6] Breitmayer, Marius; Arnold, Lisa; Reichert, Manfred (2024). Permission analysis for object-centric processes. In Forum Proceedings of the 36<sup>th</sup> Int Conference on Advanced Information Systems Engineering (CAiSE'2024), Springer, S. 11 – 19, Limassol, Zypern.
- [7] Arnold, Lisa; Breitmayer, Marius; Reichert, Manfred (2024). Predictive process monitoring: An implementation and comparison of student performance prediction. In Proceedings 16<sup>th</sup> Int ZEUS Workshop, 2024, CEUR Workshop Proc. Volume 3673, S. 47–53. CEUR-WS.org.
- [8] Arnold, Lisa; Breitmayer, Marius; Reichert, Manfred (2024). Determining the progress of a business object based on its object instances: an empirical study. In: Proceedings 19<sup>th</sup> Int Conference on Software Technologies (ICSOFTE 2024), S. 315 – 323, Dijon.
- [9] Arnold, Lisa; Reichert, Manfred (2024) Coordination process verification for object-centric business processes. In: Workshop Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Int Conference on Business Process Management (BPM 2024), Krakau, Polen, S. 287-99.
- [10] Arnold, Lisa; Breitmayer, Marius; Reichert, Manfred (2024) A web-based modelling tool for object-centric business processes. In: Tools & Demos at the 28<sup>th</sup> Int EDOC Conference (EDOC 2024), Wien, S. 267-75.
- [11] Arnold, Lisa (2025). Object instance monitoring. In Proceedings 17<sup>th</sup> Int ZEUS Workshop, Wien, 2025, CEUR-WS.org, 2024.
- [12] Arnold, Lisa; Cordts, Maurice; Reichert, Manfred (2025). Visualising and Monitoring Object-centric Processes with Complex Object Interdependencies. In: Forums at the 29<sup>th</sup> Int EDOC Conference (EDOC 2025), Lisbon. (accepted).

Des Weiteren wurde von Prof. Reichert, ProcMAPE-Teilprojektleiter (UULM), eine Reihe von Vorträgen und Interviews zu projektbezogenen Themen gehalten.

1. Reichert, M. (2025) Interview zum ersten Forum für Prozesstechnologie der BPM-Konferenzreihe, BPM Newsletter, BPM Association
2. Reichert, M. (2025) Object-centric Process Management. Kolloquiumsvortrag an der TU München
3. Reichert, M. (2025) Recent Developments in Process Management. Energieforum Leipzig, eingeladene Keynote
4. Reichert, M. (2024) Radio free FM: Eine Stunde mit Prof. Reichert (2024) über aktuelle Trends und Forschungsprojekte in der Prozess- und Datenwissenschaft.
5. Reichert, M. (2024) From Activity- to Object-centric Business Process Support: Challenges, Technologies, Applications. ZEUS'24 Workshop, eingeladene Keynote

Während der Fokus der UULM auf der wissenschaftlichen Dissemination der Projektergebnisse lag, hat sich PITSS auf die allgemeinverständliche Kommunikation der Ergebnisse fokussiert. Ergebnisse und einzelne Komponenten des MAPE-Frameworks wurden von der PITSS auf verschiedenen Konferenzen und Kundenveranstaltungen vorgestellt:

1. Stephan La Rocca, Vortrag „Wie cool wäre es, ein ERM in Aktion zu sehen“ auf der APEX Connect 2025

2. Stephan La Rocca, Artikel „Warum weiß die Anwendung mehr über ihr Datenmodell als die Datenbank“, im RedStack Magazin 4/2025
3. Stephan La Rocca, offenes Webinar „Goodbye Forms Legacy –Hello APEX-Efficiency“, 10/2025
4. Stephan La Rocca, APEX Tours mit Oracle, 2025
5. Andreas Zack, „Object Centric Process Discovery in Database Applications“, DOAG Anwenderkonferenz 2025

### **Arbeitspaket AP12 - Erarbeitung und Entwicklung eines geeigneten Datenschutz-konzeptes (Hauptverantwortlich PITSS)**

Für das im Projekt genutzte objektzentrierte Framework PHILHarmonicFlows der UULM wurde ein Konzept zur Zugangskontrolle, Verschlüsselung und Überwachung entwickelt und integriert, so dass nicht autorisierte Zugriffe und andere Verletzungen der Datensicherheit vermieden werden können. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, darunter die Einführung einer Passwort-Richtlinie und einer Passwort-Bewertungsskala im Registrierungsprozess. Die Zugangsdaten werden mithilfe von *Argon2id* verschlüsselt. Für das Datenschutzkonzept wurde ein feingranulares Sichtenkonzept entwickelt, das bereits beim Modellieren eines Prozesses definiert werden kann. Im Rahmen der Berechtigungsverwaltung können die Berechtigungen je nach Objektattribut individuell definiert werden. Dies erfolgt jeweils für die einzelnen Prozesszustände und alle definierten Benutzerrollen. Zusätzlich können im Monitoring-Framework diese Rechte individuell für bestimmte Benutzer oder Benutzergruppen angepasst werden.

In der Praxis ist es entscheidend, überprüfen zu können, ob die Implementierung einer fein abgestuften Zugriffskontrolle in einem Informationssystem (d. h. die tatsächlichen Berechtigungen) den Unternehmensanforderungen (z. B. Compliance- und Sicherheitsvorschriften) entspricht. Wenn die Ausführung von Geschäftsprozessen in einem Ereignisprotokoll aufgezeichnet wird, können die tatsächlichen Zugriffsdaten mit den festgelegten Berechtigungen verglichen werden. Eine solche Berechtigungsanalyse umfasst die Identifizierung sowohl von Übereinstimmungen als auch Abweichungen zwischen den Unternehmensanforderungen und der tatsächlichen Umsetzung. Dazu wurde ein Ansatz zur Identifizierung, zum Vergleich, zur Analyse, zur Bewertung und zur Klassifizierung von Berechtigungen in objektzentrierten Prozessen auf der Grundlage von Ereignisprotokollen entwickelt [6].

Für das MAPE-Framework wurde ein zweistufiges Datenschutzkonzept implementiert. Für die Authentifizierung gegenüber dem entwickelten MAPE-System kann auf Seiten des Kunden eine Integration in ein vorhandenes User-Directory (z. B. IDAP, AD) genutzt werden. Damit kann über die bereits vorhandene Unternehmensstruktur eine Berechtigung zur Nutzung des MAPE-Frameworks administriert werden.

Für die Nutzung des Frameworks, z. B. die automatisierte Identifikation von Geschäftsobjekten und deren Status, wurde für die Sicherstellung von Datenschutzrichtlinien ein Konzept entworfen und implementiert, das vor der Extraktion der Daten dem Kunden die Möglichkeit gibt, relevante Attribute unidirektional zu verschlüsseln.

Durch statische Analyse des Datenmodells und der zum Einsatz kommenden Alt-Applikation kann der Anwender im Vorfeld, unterstützt durch das System, die Spalten auswählen, die DSGVO-relevante Daten beinhalten könnten. Dies setzt kein Data Mining oder Data Profiling voraus, so dass die Administration der Verschlüsselung keinen Zugriff auf die Daten benötigt. Die Analyse und Klassifizierung der zu verschlüsselnden Spalten/Attribute kann mit der Identifikation der statusgebenden Attribute abgeglichen werden, so dass der Kunde selbstständig die Anforderungen der DSGVO mit den angestrebten Ergebnissen in Einklang bringen kann. Es ist zu erwarten, dass die meisten DSGVO-relevanten Informationen keine statusgebenden

Attribute sind, da personenbezogene Daten sehr selten in klassischen ERP- oder B2B-Applikationen den Status eines Objektes (z.B. Auftrag, Rechnung, Angebot) beeinflussen.

### **3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

#### **3.1. PITSS GmbH**

Im Vorhaben entfielen die zuwendungsfähigen Ausgaben ausschließlich auf Personalkosten. Diese umfassten projektbezogene Arbeitsanteile von Mitarbeitenden in den Bereichen Softwareentwicklung, Systemarchitektur und in geringeren Anteilen dem Projektmanagement.

Die bewilligten Personalkosten wurden im Projektverlauf vollständig und zweckentsprechend ausgeschöpft. Sachmittel, Investitionen oder Fremdleistungen wurden im Rahmen des Vorhabens nicht geltend gemacht.

#### **3.2. Universität Ulm**

Im Vorhaben entfiel der Großteil der zuwendungsfähigen Ausgaben auf Personalkosten. Diese umfassten projektbezogene Arbeitsanteile von Mitarbeitenden in den Bereichen anwendungsnaher Forschung, Softwareentwicklung und – in geringeren Anteilen – der Erstellung und Präsentation wissenschaftlicher Publikationen. Die bewilligten Personalkosten wurden im Projektverlauf vollständig und zweckentsprechend ausgeschöpft. Aufgrund von Tarifanpassungen ergab sich eine Unterdeckung von ca. 1,5 Personenmonaten gegenüber der Planung; der entsprechende Fehlbetrag wurde von UULM aus Eigenmitteln finanziert, so dass über die komplette Projektlaufzeit stets ein/e wiss. Mitarbeiter/in (E13) im Projekt zu 100 % tätig war.

Die Ausgaben für Reisen zu wissenschaftlichen Events wurden wie geplant ausgeschöpft. Die Ist-Sachmittelausgaben lagen etwas unter dem geplanten Umfang. Investitionen oder Fremdleistungen wurden im Rahmen des Vorhabens nicht geltend gemacht.

### **4. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten**

#### **4.1. PITSS GmbH**

Die Zusammenarbeit im Projekt ermöglichte der PITSS GmbH eine deutliche Erweiterung ihrer bestehenden Kompetenzen im Bereich der Softwaremodernisierung. Insbesondere die gemeinsame Bearbeitung komplexer Fragestellungen mit der UULM zeigte, dass die Entwicklung einer Softwarelösung sowie darauf aufbauender professioneller, softwaregestützter Dienstleistungen ein erhebliches Maß an technischer Expertise, methodischer Strenge und personellen Ressourcen erfordert. Für ein KMU wie PITSS wäre die vollständige Durchführung der konzeptionellen Forschungsarbeiten sowie der prototypischen Umsetzung ohne die enge, kontinuierliche Unterstützung des Projektpartners UULM in dieser Form nicht realisierbar gewesen. Die Entwicklung und prototypische Implementierung von ProcMAPE in heterogenen und dynamischen IT-Umgebungen erforderten einen integrativen Ansatz, der wissenschaftlich fundierte Methoden mit praxiserprobten Entwicklungsverfahren vereint. Die Kombination der unterschiedlichen Perspektiven führte zu einer produktiven Symbiose aus theoretischer Fundierung und unternehmerischer Anwendungskompetenz, die maßgeblich zum Erfolg des Vorhabens beitrug. Für PITSS eröffnet das im Projekt erarbeitete Framework und die entwickelte Methodik neue strategische Möglichkeiten im Einsatz KI-gestützter Verfahren. Insbesondere das Zusammenspiel aus umfangreichen Datenströmen, Log-Informationen und darauf abgestimmten Modellen wird zu künftig eine tragfähige Grundlage für innovative Analyse- und Automatisierungslösungen bilden.

Im Hinblick auf die wirtschaftliche Verwertung sowie die nachhaltige Fortführung der Projektergebnisse wurden bestehende Entwicklerpositionen verstetigt und zusätzliche Stellen geschaffen. Damit ist die organisatorische Basis für die langfristige Nutzung und Ausweitung der im Projekt erzielten Ergebnisse gesichert.

## **4.2. Universität Ulm (UULM)**

Im Projekt hat das Institut für Datenbanken und Informationssysteme ein innovatives MAPE-Framework für objektzentrierte Prozesse, entwickelt – dies wäre ohne die erfolgte Förderung nicht möglich gewesen. Zugleich ergab sich aus der Verknüpfung von Process Mining mit der Modernisierung von Alt-Software-Systemen eine hervorragende, technologische Ausgangsbasis für anwendungsorientierte Forschungsthemen. Eine wesentliche Unsicherheit vor Projektbeginn lag darin, ob die zu entwickelnden Verfahren mit den in Unternehmen vorliegenden Prozessdaten sinnvolle Analysen und Anpassungen zur Modernisierung von Alt-Systemen, die für den Einsatz in realen Umgebungen nutzbar sind, ermöglichen. Insbesondere der Einsatz der angestrebten Verfahren und des MAPE-Frameworks in komplexen und verzweigungsreichen Softwareumgebungen war nicht abzuschätzen. Daher wäre ohne Förderung das wissenschaftlich-technische Risiko zu hoch gewesen, um in diesem Bereich die angedachten Lösungen zu erforschen bzw. entwickeln. Der Austausch mit dem KMU-Partner hat dazu beigetragen, ein tiefes Verständnis für die in der wirtschaftlichen Praxis bzw. in Unternehmen vorliegenden Daten zu erhalten. Ohne den Einbezug der PITSS GmbH hätte UULM in diesem Bereich keine wesentliche wissenschaftliche Forschung betreiben bzw. diese nicht angemessen evaluieren können.

## **5. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit**

### **5.1. PITSS GmbH**

Die im Projekt ProcMAPE gewonnenen Erkenntnisse wurden in das Produktportfolio der PITSS GmbH integriert (Release 25.3.1) und bilden die Grundlage für eine neue Generation datengetriebener Analyse- und Modernisierungswerkzeuge für Legacy-Applikationen.

Die Verwertung erfolgt in drei komplementären Modellen: (1) lizenzbasierte Erweiterung bestehender Analyse-Tools, (2) projektbezogene Modernisierungsdienstleistungen mit MAPE-gestützter Prozessanalyse sowie (3) perspektivisch ein modularisierter Einsatz als eigenständige Monitoring- und Analysekomponente in Transformationsprojekten.

Zielmarkt sind mittelständische und größere Unternehmen mit komplexen, gewachsenen ERP- und Individualsoftware-Landschaften, insbesondere in regulierten Branchen mit hohen Anforderungen an Prozesssicherheit und Compliance. Viele der betroffenen Systeme basieren auf überholten Technologien, die Unternehmen beim Ausbau neuer Geschäftsfelder vor erhebliche technische und betriebliche Herausforderungen stellen. Moderne Lösungsräume – etwa Cloud-Architekturen oder native Webanwendungen – bleiben für diese Systeme meist verschlossen, sodass häufig nur eine vollständige Neuentwicklung als realistische Option erscheint. Allein im deutschsprachigen Raum existieren mehrere tausend potenziell adressierbare Installationen von Legacy-Datenbank- und Formularanwendungen, bei denen Modernisierungsbedarf besteht. ProcMAPE reduziert initiale Analyseaufwände signifikant und ermöglicht eine risikoärmere, schrittweise Transformation bestehender Systeme.

Kurzfristig wird ProcMAPE als technologiegestütztes Differenzierungsmerkmal in Bestands- und Neukundenprojekten eingesetzt. Mittelfristig ist eine skalierbare Lizenzierung einzelner Module vorgesehen. Durch die Integration in bestehende Produktlinien kann auf etablierte Vertriebs- und Kundenstrukturen zurückgegriffen werden, wodurch Markteintrittsrisiken reduziert werden. Erste Kundengespräche wurden bereits aufgenommen.

Das Projekt schafft die technologische Basis für nachhaltiges Umsatzwachstum im Bereich datengetriebener Softwaremodernisierung und stärkt die Wettbewerbsposition der PITSS GmbH im internationalen Markt für Legacy-Transformation. Insbesondere hat das Projekt für PITSS die Basis geschaffen, unbekannte, aber in Alt-Systemen implementierte Geschäftsprozesse gezielt zu analysieren und diese als Leitlinie einer strukturierten, planungssicheren Modernisierung zu nutzen. Existierende Konkurrenzlösungen adressieren meist nur Teilbereiche dieser Transformationskette, was für Kunden weiterhin hohe Aufwände nach sich zieht.

## 5.2. Universität Ulm

Die UULM sieht weiterhin große Potenziale im Bereich der Prozessanalyse, insbesondere der Analyse objektzentrierter Prozesse, und verwertet – in Abstimmung mit der PITSS sowie unter Berücksichtigung unternehmerischer Interessen – ausgewählte Forschungsergebnisse in Form von Präsentationen und Publikationen auf internationalen Fachkonferenzen & Workshops sowie Veröffentlichungen in renommierten Zeitschriften. Nicht zuletzt durch das ProcMAPE-Projekt konnte DBIS bzw. die UULM ihre international herausragende Rolle in den Bereichen Business Process Management und Process Mining stärken.

Im Projekt wurden eine Dissertation und mehr als 10 wissenschaftliche Arbeiten seitens UULM veröffentlicht (s. AP11). Sie beschreiben originelle Konzepte, Implementierungen und Studien, die im ProcMAPE-Projekt entwickelt wurden. Diese Arbeiten bieten eine hervorragende Grundlage für weitere Forschungsarbeiten. Darüber hinaus hat UULM Projektergebnisse in der forschungsnahen Lehre (u.a. in den Lehrmodulen zu „Business Process Intelligence“, „Business Process Management“, „Business Process Modeling Lab“, und „Data & Process Mining“) integriert. Ebenso wurden ausgewählte Ergebnisse in eingeladenen Präsentationen von Prof. Reichert auf Fachkonferenzen und in Forschungskolloquien präsentiert (s. AP11). Er wird zudem Programmverantwortlicher des *Process Technology Forums* im Rahmen der *Int. Conference on Business Process Management (BPM 2026)* in Toronto sein.

Um objekt- und datenzentriertes Prozess-Management noch stärker in der internationalen Forscher-Community zu verankern, hat Prof. Reichert, zusammen mit Kollegen der Uni Potsdam (Prof. Weske) und der Uni Bozen-Bolsano (Prof. Montali) in 2024 eine Initiative für ein Manifest zu objekt- und datenzentriertem Prozessmanagement gestartet. Dieser haben sich mehr als 35 international renommierte Forscherinnen und Forscher aus dem BPM-Bereich angeschlossen. Aktuell befindet sich der betreffende Artikel, der auch PHILharmonicFlows und das entwickelte MAPE-Framework thematisiert im Begutachtungsprozess.

Im Rahmen des Fördervorhabens sind insgesamt >30 Bachelor- und Masterarbeiten sowie mehrere studentische Projektarbeiten zu den Themen Process Mining, Process Analytics, Online Conformance/Compliance Checking, Prozessqualität, Implementierung des Monitoring-Frameworks betreut worden. Das Projekt wurde folglich eng von Studierenden begleitet, die so eng in institutsbezogene Forschung eingebunden waren. Alle Abschluss- und Projektarbeiten wurden öffentlich im Rahmen des DBIS-Institutskolloquiums an der UULM präsentiert. Eine Auflistung findet sich am Ende des Berichtes angehängt.

Eine wirtschaftliche Verwertung seitens der UULM ist nicht vorgesehen.

## 6. Fortschritte in Wissenschaft und Technik während der Projektlaufzeit

Während der Durchführung des Vorhabens wurden folgende neue Arbeiten – nach projektrelevante Themenfeldern kategorisiert – dem ZE bekannt:

Beim objektzentrierten Process Mining, einem speziellen Ansatz zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen, liegt der Fokus nicht primär auf der Abfolge der Aktivitäten (wie

beim traditionellen Process Mining), sondern auf den einzelnen Objekten und ihren Abhängigkeiten zueinander. Während das herkömmliche Process Mining die Abfolge von Aktivitäten betrachtet, legt das objektzentrierte Mining den Fokus auf Objekte und deren semantische Beziehungen. Beispiele für Objekte sind Bestellungen, Kundenanfragen, Patientenbefunde und weitere datenbasierte Entitäten, deren Weg durch verschiedene Prozessschritte und Systeme detailliert nachvollziehbar ist. Die UULM hat sich im ProcMAPE frühzeitig in das neue und wachsende Feld des objektzentrierten Process Mining eingebracht. Dank umfangreicher Vorarbeiten (→ PHILharmonicFlows) kann UULM heute nicht nur die Analyse objektzentrierter Prozesse unterstützen, sondern deckt auch den gesamten Prozess-Lebenszyklus ab. Dieser umfasst alle Phasen, vom Discovery und der Analyse der objektzentrierten Prozesse, über ihre Neugestaltung (Redesign) und Implementierung bis hin zur Überwachung und Optimierung (Monitoring). Damit entsteht ein ganzheitliches Framework, das die Entdeckung von Prozessmustern, die tiefgehende Analyse der Objektflüsse, die Neugestaltung von Prozessen unter Berücksichtigung der Objekte, die Implementierung der entsprechenden Änderungen und schließlich deren laufende Überwachung und Optimierung integriert. Weiterhin ist UULM weltweit die einzige Forschungseinrichtung, die ein umfassendes Framework für objektzentriertes Prozess-Management mit mächtigen Entwicklungs- und Laufzeitkomponenten bietet, die nun auch die skizzierten MAPE-Komponenten umfasst.

## 7. Erfolge und geplante Veröffentlichungen

Die 13 Veröffentlichungen im Projekt wurden bereits bei der Darstellung von AP11 gelistet. Derzeit befindet sich noch ein weiterer Artikel in der Begutachtung:

1. Arnold, Lisa; Cordts, Maurice; Reichert, Manfred (2026). Enhancing the Legibility of Sunburst Charts for Large-Scale Process Monitoring. In Proceedings of the 20<sup>th</sup> Int Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS 2026) (in der Begutachtung)

Liste der Masterarbeiten die im Rahmen des Fördervorhabens entstanden:

1. Proske, Kilian (2023). *Entwurf und Implementierung einer Webanwendung zur Modellierung von Geschäftsprozessen*. Universität Ulm.
2. Goth, David (2023). *Objektzentrierte Prozesse - Identifikation von Prozessmodellen durch Process Mining*. Universität Ulm.
3. Schultz, Florian (2023). *Conception and Realisation of the Backend for a Data-Centric and Object-Aware Process Modelling Tool*. Universität Ulm.
4. Janzer, Diana (2023). *Guidelines for Granularity in Process Modelling*. Universität Ulm.
5. Hiller, Lisa (2023). *An Overview of Business Monitoring Tools: A Systematic Literature Review*. Universität Ulm.
6. Pejic, Marko (2023). *Transforming Object-Aware Processes into BPMN: Conceptual Design and Implementation*. Universität Ulm.
7. Bachhofer, Dennis (2024). *An implementation of coordination processes in a web-based modelling tool for object-centric processes*. Universität Ulm.
8. Waldow, Daria (2024). *Empirical Study of Complex Sunburst Charts*. Universität Ulm.
9. Zimmermann, Marco (2024). *Implementierung einer Laufzeit-Engine für ein BPM-Modellierungstool*. Universität Ulm.
10. Vo, Thanh (2024). *Exporting object-centric Business Processes from a web-based Modelling Tool: An Analysis, Implementation and Evaluation*. Universität Ulm.
11. Maurer, Martin (2024). *Conformance Checking von Objekt-zentrierten Koordinationsprozessen*. Universität Ulm.
12. Schierz, Rick (2025). *Konzeption und Implementierung einer Monitoring-Komponente für objektzentrierte Geschäftsprozesse*. Universität Ulm.
13. Cordts, Maurice (2025). *Exploring User Interactions in Object-Centric Visualisations: An Eye Tracking Study of Sunburst Charts*. Universität Ulm.

14. Cikrikcioglu, Kübra (2025). *Untersuchung der Verständlichkeit und Lesbarkeit von Modellierungsguidelines für objektzentrierte Geschäftsprozesse: Eine empirische Studie*. Universität Ulm.
15. Lüthje, Markus (2025). *Integration Coordination Processes into the PHILharmonicFlows Runtime Engine*. Universität Ulm.
16. Gueleroglu, Ayse (2025). *Überführung von komplexen Koordinationsprozessen in Petrie-Netze zur Analyse des Prozessfortschritts*. Universität Ulm.
17. Bertalis, Nerijus (2025). *Automating Database Interactions and Content Scoring: A Machine Learning Approach for Enhancing User Experience and Reducing Manual Workload*. Universität Ulm.

Liste der Bachelorarbeiten die im Rahmen des Fördervorhabens entstanden:

1. Seelig, Eduard (2023). *Modellierungsguidelines für objektzentrierte Prozesse*. Universität Ulm.
2. Seiffert, Isabel (2023). *Permission Analysis in Object-centric Process Management*. Uni Ulm.
3. Pentz, Erwin (2023). *Flexible Event Log Generation from Object-centric Process Models*. Universität Ulm.
4. Rank, Nikolas (2024). *A random generator for object-centric business processes*. Uni Ulm.
5. Enderle, Dominik (2024). *A Web-Based Implementation of a Data Model for Object-Centric Business Processes*. Universität Ulm.
6. Rottland, Tom (2024). *Die web-basierte Implementierung von Lebenszyklen in objekt-zentrierten Geschäftsprozessen*. Universität Ulm.
7. Nolle, Tim (2024). *Webbasierte Implementierung von Lifecyclegraphen für objektzentrierte Geschäftsprozesse*. Universität Ulm.
8. Meyer, Millane (2024). *Conception and Implementation of a Role Based Registration in a Web-Based Modelling Tool*. Universität Ulm.
9. Korkut, Agit (2024). *Implementation of an import function for a web-based business process framework*. Universität Ulm.
10. Just, David (2024). *Analyse und Optimierung einer Webanwendung für objekt-zentrierte Geschäftsprozesse*. Universität Ulm.
11. Bauer, Alissa (2025). *Overall Progress Determination of an Object-centric Business Process: An Empirical Study*. Universität Ulm.
12. Janz, Jonathan (2025). *Transparenzsteigerung durch eine optimierte Versions- und Statusübersicht im Konfigurationsmanagement*. Universität Ulm.
13. Marek, Sarah (2025). *Integration of Coordination Processes in a web-based BPM Modelling Tool*. Universität Ulm.
14. Chessa, Julian (2025). *Mustererkennung in Logdateien: Vorhersage und Visualisierung von Chunks*. Universität Ulm.
15. Huber, Cornelius (2025). *Predictive Process Monitoring using Machine Learning*. Uni Ulm.

Liste der Projektarbeiten die im Rahmen des Fördervorhabens betreut wurden:

1. Dennis, Bachhofer (2023). *Erweiterung des Modellierungstools PHILharmonicFlows um Berechtigungen*. Universität Ulm.
2. Dennis, Bachhofer (2023). *Implementierung von Guidelines für das Modellierungstool PHILharmonicFlows*. Universität Ulm.
3. Zimmermann, Marco (2024). *Entwurf und Implementierung einer Webanwendung zur Ausführung von objektzentrierten Geschäftsprozessen*. Universität Ulm.
4. Keller, Simon und Neller, Erik und Rettich, Heiko und Zauter, Armin (2025) *Implementierung von objektzentrierten Monitoring-Komponenten*. Universität Ulm.
5. Dashti, Mahta und Kastenhofer, Lisa (2025). *Implementierung der Import und Exportfunktion von objektzentrierten Geschäftsprozessen*. Universität Ulm.
6. Bischof, Anika (2025). *Optimierung des Graphenlayout von Lebenszyklus Prozessen*. Uni Ulm.