

1 Exposition

1.1 Problemidentifikation

In der globalisierten Welt finden jeden Tag unzählige Warenbewegungen statt, bei denen Güter zwischen Ländern ausgetauscht werden. Dabei existieren in Sachen Arbeits- und Umweltschutz von Region zu Region häufig unterschiedliche Regelungen und Schutzniveaus. Während in den Industrienationen in den vergangenen Jahrzehnten ein stärkeres Bewusstsein für die Bedeutung dieses Themas entstanden ist, kommt dem Arbeits- und Umweltschutz in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern leider immer noch eine eher untergeordnete Bedeutung zu, was höhere Fallzahlen arbeitsplatzbezogener Unfälle oder gar Todesfälle nach sich zieht.¹ Geringere Schutzstandards begünstigen Kostenvorteile bei der Produktion in den jeweiligen Ländern, was wiederum zu der Tendenz führt, dass zahlreiche Produkte für den europäischen Markt in diesen Ländern hergestellt und importiert werden.² Ein sich selbst nährenden Kreislauf entsteht, bei dem auch hiesige Verbraucher und Unternehmen entweder selbst mit problematischen Stoffen in Endprodukten oder Materialien konfrontiert werden oder durch ihren Konsum indirekt an problematischen Arbeitsbedingungen für ausländische Arbeitskräfte mitverantwortlich sind. Ein Beispiel hierfür ist etwa die Produktion von Komponenten für Smartphones durch das Unternehmen Foxconn. Der asiatische Zulieferer geriet in der Vergangenheit mehrfach durch zahlreiche versuchte und vollendete Selbstmorde von Mitarbeitern in die Schlagzeilen, die auf schlechte Arbeitsbedingungen in Form zahlreicher Überstunden bei schlechter Bezahlung zurückgeführt wurden.³ Foxconn ist Zulieferer namhafter amerikanischer Unternehmen aus der IT-Branche, wie etwa HP, Apple, IBM oder Amazon. In deren Herkunftsland existieren Arbeitsschutzgesetze, die eine derartige Ausbeutung nicht zugelassen hätten.⁴

Ein Treiber von Unfällen und gesundheitlichen Langzeitfolgen am Arbeitsplatz der produzierenden Industrie ist die Verwendung von gesundheitsgefährdenden Chemikalien und Stoffen zur Herstellung von Gütern. Diese finden Verwendung als Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe. Roh- und Hilfsstoffe werden in der Regel als Bestandteil fest mit dem Produkt verbunden und wirken sich neben den Gefahren für die Umwelt auch gesundheitlich auf Produktionsmitarbeiter sowie Endverbraucher aus (z. B. Blei in Glasprodukten). Im Idealfall sind die problematischen Bestandteile so lange im Produkt gebunden, bis es im Rahmen von Recycling-Prozessen wieder in seine Bestandteile zerlegt und fachgerecht entsorgt oder wiederverwendet wird. Hilfsstoffe werden zu keinem festen Bestandteil des Produkts, weshalb mögliche Gesundheitsgefahren hier in erster Linie als eine Fragestellung des betrieblichen Arbeitsschutzes behandelt werden. Die generelle Problematik der Gefahrstoffe ist nicht nur auf Produzentenseite ein wichtiges Thema. Die in Rezepten

¹ Vgl. ABUBAKAR (2015), S. 1351

² Für das Jahr 2020 meldet das Statistische Bundesamt beispielsweise Warenimporte nach Deutschland im Wert von 1.025 Mrd. €, wobei China als wichtigster Außenhandelspartner gilt, vgl. Statistisches Bundesamt (2021)

³ Vgl. CHAN UND PUN (2010)

⁴ Der FAIR LABOR STANDARDS ACT OF 1938 beispielsweise regelt Mindestlöhne, Überstunden sowie Kinderarbeit auf Bundesebene in den USA

bzw. Stücklisten von Endverbraucherprodukten enthaltenen Gefahrstoffe gelangen über den Handel auch unweigerlich zum Konsumenten und können hier Schaden anrichten, wie Stiftung Warentest am Beispiel von Gummigriffen bei E-Scootern zeigt.⁵ Gerade in Kunststoff- und Gummiprodukten können bereits während des Lebenszyklus problematische Bestandteile entweichen, etwa in Form von flüchtigen Weichmachern.

In Europa und anderen Teilen der Welt hat sich der Gesetzgeber dieser Problematik bereits angenommen und Gesetze zum Verbraucherschutz, Arbeitsschutz und zur Arbeitssicherheit erlassen. Nachdem im Zuge der Industrialisierung im 19. Jahrhundert in Deutschland teilweise katastrophale Zustände in Fabriken und Manufakturen herrschten⁶, konnten ab etwa 1850 erste Verbesserungen des Arbeitnehmerschutzes beobachtet werden, etwa durch das 1884 beschlossene *Unfallversicherungsgesetz*, das Maßnahmen zur Unfallverhütung und medizinischer Heilbehandlung für Arbeitnehmer umfasste.⁷ Heute kommt dem Arbeitnehmerschutz in Deutschland eine bedeutende Rolle zu. Produzierende Unternehmen werden durch Gesetzgebung auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene aufgefordert, regelmäßige Gefährdungsbeurteilungen am Arbeitsplatz durchzuführen und mögliche Gefahren zu eliminieren.⁸

Ein Instrument zur Reduzierung der Gefährdungslage durch schädliche Substanzen ist die sogenannte *Substitutionsprüfung*, bei der Unternehmen ihre Stücklisten bzw. Rezepturen mit dem Ziel analysieren, gesundheits- oder umweltgefährdende Stoffe (*substances of very high concern* bzw. SVHC) durch weniger gefährliche *Ersatzstoffe* zu substituieren. Konkrete Vorschriften bezüglich einer Substitutionsprüfung finden sich beispielsweise im *Arbeitsschutzgesetz* (ArbSchG), der *Gefahrstoffverordnung* (GefStoffV), in Leitfäden von *Berufsgenossenschaften* oder in der *Europäischen Chemikalienverordnung*, welche umgangssprachlich auch als REACH-Verordnung bekannt ist (*Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals*).⁹ Darüber hinaus gelten für Unternehmen, die ihre Produktion nicht lediglich in Deutschland durchführen, noch weitere nationale Gesetze der jeweiligen Produktionsstandorte. Diese können analog zur Gesetzeslage in Deutschland eine Substitution vorschreiben oder bestimmte Grenzwerte für gefährliche Stoffe in Produkten oder am Arbeitsplatz vorgeben, bei deren Überschreitung Schutzmaßnahmen bis hin zur vollständigen Substitution geprüft werden müssen.

Die Durchführung einer Substitutionsprüfung ist mit hohem Personal- und Kostenaufwand verbunden, da sie je nach Komplexitätsgrad der hergestellten Produkte eine umfangreiche Suche und Erprobung neuer Ersatzstoffe erforderlich macht. Die für eine Substitutionsprüfung notwendige Zeit, Ressourcen sowie Analysemethodik stellen daher eine Limitierung bei deren Durchführung

⁵ Vgl. STIFTUNG WARENTEST (2020)

⁶ Vgl. LAMPERT UND ALTHAMMER (2007), S. 23–29

⁷ Vgl. KAUFHOLD (1989), S. 231

⁸ Vgl. u.a. §5 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)

⁹ Vgl. § 6 Abs. 1 S. 2 Nr. 4 Gefahrstoffverordnung (GefStoffV); §4 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG); §2 Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaft (BGV A1: Grundsätze der Prävention); Art. 55 REACH-Verordnung (EC 1907/2006)

dar¹⁰, wobei die Limitierung von Ressourcen insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen ein Thema ist.¹¹ Auf der anderen Seite lässt sich jedoch auch beobachten, dass eine nachhaltige und umweltschonende Produktion nicht nur die Umwelt und Gesundheit der Belegschaft schont, sondern auch zu Kostenvorteilen führen kann.¹² Unternehmen stehen daher regelmäßig vor dem Problem, die Substitutionsprüfung effizient zu gestalten und auch abseits gesetzlicher Vorschriften Möglichkeiten zur Substitution problematischer Stoffe zu prüfen.

Für die Durchführung einer Substitutionsprüfung schlägt das Institut für Arbeitsschutz bei der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) die Orientierung am sogenannten *Spaltenmodell* vor. Beim Spaltenmodell wird die von einem Stoff ausgehende Gefahr für Mensch und Umwelt anhand der sechs festgelegten Kriterien *Akute und chronische Gesundheitsgefahren, Umweltgefahren, physikalisch-chemische Gefahren, Freisetzungsverhalten* sowie *Verarbeitungsverfahren* bewertet.¹³ Es handelt sich dabei um ein relativ einfaches Verfahren zum Vergleich zweier Stoffe. Das Spaltenmodell geht davon aus, dass mögliche Ersatzstoffe bereits bekannt sind und bietet keinen strukturierten Prozess zur Identifikation von Ersatzstoff-Kandidaten an. Neben dem sehr einfachen Spaltenmodell existieren international eine Reihe umfangreicherer Vorgehensmodelle, die den Prozess der Substitutionsprüfung in aufeinanderfolgende Prozessschritte untergliedern.¹⁴ Nach erster Analyse dieser Vorgehensmodelle können heute für die Durchführung von Substitutionsprüfungen folgende vier Problembereiche identifiziert werden:

1. Überfluss an Informationen

Der US-amerikanische *Chemical Abstract Service* (CAS) ist eine Unterabteilung der *American Chemical Society* und befasst sich mit der weltweiten Katalogisierung von Chemikalien. Hierzu vergibt die CAS eine eindeutige Registrierungsnummer, die sogenannte *CAS-Nummer*. Zum aktuellen Zeitpunkt verwaltet die CAS in Ihrer Datenbank mehr als 178 Mio. registrierte organische und anorganische Substanzen.¹⁵

In Europa existieren ähnliche Bestrebungen, die mittlerweile kaum mehr überschaubare Vielfalt an chemischen Substanzen zu ordnen. Hierzu betreibt die Europäische Union zwei Datenbanken. Bis zum Jahr 1981 wurden alle sich innerhalb der Europäischen Gemeinschaft (EG) im Umlauf befindlichen chemischen Substanzen im *European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances* (EINECS) gesammelt. Diese mittlerweile als „Altstoffdatenbank“ bezeichnete Sammlung bekam 1981 einen Nachfolger. Ab diesem Zeitpunkt und bis heute werden alle neu angemeldeten Stoffe in der *European List of Notified Chemical Substances* (ELINCS) inventarisiert. Ähnlich zur CAS-Nummer erhalten auch die in diesen beiden Datenbanken gesammelten Chemika-

¹⁰ Vgl. OGUZCAN ET AL. (2017), S. 362

¹¹ Vgl. JACOBS ET AL. (2016), S. 277

¹² Vgl. SITTEL ET AL. (2014)

¹³ Vgl. SMOLA (2020), S. 2–3

¹⁴ Vgl. JACOBS ET AL. (2016)

¹⁵ Vgl. CAS (2020), Stand: 03/2021

lien mit der *EG-Nummer* eine eindeutige, jedoch von der CAS-Nummer abweichende Identifikationsnummer. Verwaltet werden beide Listen von der *Europäischen Chemikalienagentur* (ECHA), einer Behörde der Europäischen Union. Zum aktuellen Zeitpunkt verfügen die Stoffdatenbanken der ECHA über ca. 186.000 Einträge.¹⁶

Die reine Anzahl an chemischen Substanzen stellt lediglich einen Aspekt des vorherrschenden Informationsüberflusses dar. Ein weiterer Aspekt ist die Vielzahl an verschiedenen Attributen, durch den jeder einzelne Stoff charakterisiert ist. Durch welche Attribute ein Stoff beschrieben wird, kann je nach Einsatzzweck der Substanzdaten variieren. Im Bereich des Arbeitsschutzes etwa sind vorrangig gefahrenbezogene Informationen relevant, während im Bereich des Engineerings eher die physikalisch- und chemischen Eigenschaften von Bedeutung sind. Nachfolgende Übersicht vermittelt einen anhand der durch die ECHA veröffentlichten *Verwendungseigenschaften chemischer Substanzen* gewonnenen ersten Eindruck, welche Komplexität Stoffdaten aufweisen können:¹⁷

- **31 Verfahrenskategorien (PROC):** Die Verfahrenskategorien definieren Aufgaben oder Verfahrensarten aus der Sicht des Arbeitsschutzes.
- **45 Produktkategorien (PC):** Beschreibt, in welchen Arten von chemischen Produkten (= Stoffe oder Gemische) ein Stoff letztendlich enthalten ist, wenn er an Endverwender geliefert und durch diese verwendet wird, z. B. in Reinigungsmitteln, Farben usw.
- **24 Verwendungssektoren (SU):** Die Kategorien der Verwendungssektoren sollen Informationen über den Wirtschaftszweig oder den Marktsektor liefern, in dem die Verwendung stattfindet. Sie bezeichnen daher Industriebereiche oder -segmente, in denen der Stoff eingesetzt wird.
- **26 Umweltfreisetzungskategorien (ERC):** Anhand von ERC-Kategorien soll beschrieben werden, wie die Stoffe in die Umwelt gelangen können.
- **81 Erzeugniskategorien (AC):** Beschreibt die Art des Erzeugnisses, z. B. Holz-, Metall-, Kunststoffherzeugnisse.
- **121 Technische Funktionen (TF):** Die Kategorien der technischen Funktion sollen die Funktion beschreiben, die der Stoff bei seiner Verwendung hat, z. B. Weichmacher, Haftvermittler, Antioxidans, etc.

Jedes Jahr kommen etliche tausend neue Einträge zur Stoffdatenbank hinzu. Somit müssten Domänenexperten diese aktuell 186.000 Stoffe anhand ihrer insgesamt 328 Eigenschaften vergleichen können, um eine qualifizierte Aussage bzgl. der Substituierbarkeit eines Stoffs durch einen Ersatzstoff treffen zu können. Darüber hinaus existieren weitere Klassifikationsschemata, etwa in

¹⁶ Vgl. EUROPEAN CHEMICALS AGENCY (2020)a, Stand: 03/2021

¹⁷ Vgl. EUROPEAN CHEMICALS AGENCY (2015)

Form physikalisch-chemischer Eigenschaften oder der chemischen Struktur von Stoffen, welche die Attributvielfalt jedes einzelnen Stoffs zusätzlich erhöhen (vgl. 2.3.1). Da die Auswertung dieser Informationsmenge allein auf kognitiver Ebene durch Experten kaum möglich ist, besteht hier die Notwendigkeit des Einsatzes von entsprechenden Informationssystemen (IS) zur Strukturierung und Unterstützung des Auswahlprozesses für alternative Substanzen unter Berücksichtigung verfügbarer Stoffbeschreibungen.¹⁸

2. Informationsfragmentierung

Über die Datenbank der ECHA hinaus existieren Stoffinformationen in verschiedenen anderen Quellen, z. B. in einer Vielzahl von privaten Stoffdatenbanken¹⁹ wie etwa GESTIS²⁰ oder STARS²¹ oder in Form von Sicherheitsdatenblättern, die in der Regel lediglich als PDF vorliegen. Davon gibt es derzeit ca. 5,5 Mio. Stück.²² Diese Fragmentierung der Informationen über verschiedene Quellen stellt ein zu entwickelndes Informationssystem vor zahlreiche Herausforderungen.²³ Zum einen muss das Informationssystem über geeignete Schnittstellen verfügen, um Informationen über Substanzen von verschiedenen Datenbanken einlesen zu können. Weiterhin muss das Datenmodell des Informationssystems dazu geeignet sein, die Vielschichtigkeit der Substanzdaten und ihrer Attribute abbilden zu können. Ein entsprechendes Datenmodell muss die Sammlung, Extraktion und Verdichtung von Stoffdaten umfangreich unterstützen.

3. Fehlende Unterstützung durch Methoden und Informationssysteme

Informationssysteme haben sich in der Vergangenheit als Treiber zahlreicher Innovationen herausgestellt. Bei der Schaffung neuer Innovationen haben Durchbrüche in verschiedenen Bereichen der IT eine Rolle gespielt, z. B. im Hinblick auf *Portabilität* (z. B. Apps), *Geschwindigkeit* (Big Data) sowie *Miniaturisierung* und *Vernetzung* (Industrie 4.0). Die wirklichen Innovationen im Bereich des Arbeitsschutzes und Arbeitssicherheit beschränken sich in erster Linie auf neuar-

¹⁸ Vgl. KOKAI ET AL. (2020), S. 2

¹⁹ Eine ausführliche Übersicht über verschiedene Stoffdatenbanken ist unter UMWELTBUNDESAMT (2020)b zu finden

²⁰ GESTIS ist das Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen gesetzlichen Unfallversicherung und enthält Informationen für den sicheren Umgang sowie wichtige physikalisch-chemische Daten zu etwa 8.800 Stoffen, vgl. INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG (2021)a

²¹ STARS ist die Stoffdatenbank des Umweltbundesamts und beinhaltet Informationen zu Stoffen bzw. chemischen Verbindungen in Boden, Wasser und Luft. Das Augenmerk liegt hier insbesondere auf den Bereichen Toxizität der Stoffe und Arbeitsschutz

²² Abgerufen werden können die Sicherheitsdatenblätter im *Informationssystem für Sicherheitsdatenblätter* (ISi), einer Kooperation des Verbands der chemischen Industrie (VCI) und dem Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung, vgl. INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG (2021)b

²³ Vgl. KOKAI ET AL. (2020), S. 2

tige Möglichkeiten bei der Erkennung von Arbeitsplatzbelastung durch Schadstoffe mittels miniaturisierter Sensorik sowie auf das Monitoring von Maschinen (z. B. *predictive maintenance*) oder der Anwendung von Augmented Reality.²⁴

Zwar existieren zum Arbeitsschutz einige Informationssysteme, diese beschränken sich jedoch oftmals auf die Funktion des „Dokumentierens“ und „Informierens“, beispielsweise Systeme zum Erstellen von Gefahrenanweisungen im Unternehmen. Darüber hinaus existieren einige Lösungen zum Material-Compliance-Management (MCM).²⁵ Dabei handelt es sich um Software-Anwendungen, die etwa bei der Prüfung unterstützen, ob ein bestimmtes Produkt den geltenden gesetzlichen Grenzwerten für enthaltene Schadstoffe entspricht, also ob diese Produkte *compliant* sind. Im Bereich des Einsatzes von Informationssystemen zur Unterstützung der Substitutionsprüfung von gefährlichen Stoffen existieren zwar ebenfalls einige Softwarelösungen, die weisen jedoch einen stark begrenzten Funktionsumfang auf und unterstützen den Prozess der Substitutionsprüfungen nur in einzelnen Teilaspekten (vgl. Kapitel 2.3.3.2).

Die große Zahl von Substanzen und Informationsquellen lässt bereits erahnen, dass es für Entwicklungsingenieure nahezu unmöglich ist, einen umfassenden Überblick über alle am Markt erhältlichen Substanzen mitsamt ihren Merkmalen zu haben. Gerade ein solcher Überblick ist jedoch zwingend erforderlich, wenn es um die Substitution gefährlicher Substanzen durch weniger gefährliche Alternativen geht.²⁶ Bisher mangelt es in der Praxis an geeigneten Informationssystemen zur Unterstützung der Substitutionsprüfung. Aus diesem Grund gehen viele Produktionsunternehmen, die möglicherweise Gefahrstoffe einsetzen, einen pragmatischen Weg und verlassen sich bei Neuentwicklungen auf Stoffempfehlungen ihrer Stammlieferanten.²⁷ Dies wiederum erzeugt ein Abhängigkeitsverhältnis zwischen Lieferanten und Abnehmer. Derlei Abhängigkeitsverhältnisse sind im Rahmen der Prinzipal-Agenten-Theorie auch Gegenstand wissenschaftlicher Auseinandersetzung. Konkret besteht die Gefahr, dass der Lieferant die Stoffe empfiehlt, die aus finanzieller Sicht am rentabelsten für ihn sind, anstatt diejenigen, welche aus der Umwelt- oder Arbeitsschutzperspektive am sinnvollsten wären.

Aus diesem Grund bedarf es für den Bereich der Substitutionsprüfung der Entwicklung neuer Tools zur Entscheidungsunterstützung, die den Prozess der Substitutionssuche möglichst vollumfänglich unterstützen.²⁸ Ein entsprechendes Informationssystem zur Substitutionsprüfung muss den Verwender in die Lage versetzen, eigenverantwortliche und gut informierte Substitutionsentscheidungen treffen zu können oder zumindest dabei helfen, diese Entscheidungen vorzubereiten. Aufgrund der eingangs erwähnten großen Datenmenge müssen hier spezielle Algorith-

²⁴ Vgl. KAMINSKY (2019)

²⁵ Beispiele für solche Systeme sind etwa DataCross und CoChecker von tec4U-Solutions GmbH

²⁶ Aus diesem Grund wird in einigen Definitionen der Substitutionsprüfung auch explizit von einer „informierten Substitutionsentscheidung“ gesprochen (engl. *informed substitution*), vgl. z. B. JACOBS ET AL. (2016), S. 265 oder TICKNER, JACOBS UND MACK (2019), S. 1

²⁷ Vgl. BIZNGO (2013), Abs. 6–7

²⁸ Vgl. TICKNER, JACOBS, MALLOY ET AL. (2019), S. 861

men konzipiert werden, welche die Datenbestände ordnen und zusätzliches Wissen aus den Daten generieren können. Hierzu gehören z. B. Verfahren zur Klassifikation von Stoffen anhand ihrer Charakteristika (*classification*), die Gruppierung ähnlicher Stoffe anhand ihrer Eigenschaften (*clustering*) oder die Vorhersage zukünftiger Ereignisse auf Basis historischer Daten (*predictive analytics*). Entsprechende Verfahren sind im Themenbereich des Maschinellen Lernens anzutreffen.

4. Unstrukturierte Vorgehensweise bei der Suche nach Ersatzstoffen

Obwohl in den vergangenen 20 Jahren zahlreiche Vorgehensmodelle zur Durchführung von Substitutionsprüfungen von staatlichen und privaten Organisationen veröffentlicht wurden, gehen viele Unternehmen noch immer eher unstrukturiert vor, wenn es um die Suche nach weniger gefährlichen chemischen Stoffen geht.²⁹ Diese unstrukturierte Vorgehensweise³⁰ bringt zahlreiche Nachteile mit sich, welche die Qualität von Substitutionsprüfungen negativ beeinflussen können. Zum einen führen individuelle bzw. von Unternehmen zu Unternehmen variierende Vorgehensweisen dazu, dass Unternehmen auf unterschiedliche Informationsarten zurückgreifen, wodurch die Herausbildung eines unternehmensübergreifenden einheitlichen Informationskorpus bzgl. chemischer Substanzdaten erschwert wird. Zum anderen erschweren unstrukturierte Prozesse die Anwendung etablierter Verfahren zur Prozessoptimierung aus dem Methodenspektrum des Business Process Managements, wie etwa *Process Mining*³¹ oder *Robotic Process Automation*³². Auch ist der Aufwand zur Modellierung unstrukturierter Prozesse ungleich höher.³³ Da sich die Substitutionssuche als ein Prozess versteht, bei dem mehrere aufeinanderfolgende Prozessschritte durchlaufen werden müssen³⁴, bestehen entlang der Prozessdurchführung Optimierungspotenziale, die es zu schöpfen gilt, etwa durch die zielgerichtete Auswahl und Anordnung sinnvoller Prozessschritte oder deren Unterstützung durch geeignete Informationssysteme.

1.2 Ziele der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Referenzmodells, das den Prozess der Substitutionsprüfung strukturiert und entlang dessen Durchführung in den jeweiligen Prozessschritten gezielt sinnvolle IS-Unterstützung³⁵ anbietet. Um dies zu erreichen, müssen verschiedene Zwischenziele umgesetzt werden:

²⁹ Vgl. JACOBS ET AL. (2016), S. 266

³⁰ Unter unstrukturierten Prozessen werden in dieser Arbeit Prozesse verstanden, die nicht vollständig vorherbestimmt sind, bei denen keine feste Regeln für die Abwicklung existieren oder die sich häufig ändern und daher nicht beliebig wiederholbar sind, vgl. auch VON HAGEN UND STUCKY (2004), S. 25

³¹ Vgl. VAN DER AALST UND GÜNTHER (2007), S. 3

³² Vgl. BAVISKAR ET AL. (2021), S. 72894

³³ Vgl. TERMER ET AL. (2012), S. 61

³⁴ Vgl. JACOBS ET AL. (2016), S. 265

³⁵ Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird bei der Bezeichnung der „IT-gestützten Substitutionsprüfung“

- Erhebung des aktuellen **State of the Art** zur Substitutionsprüfung in Unternehmen und **Ableitung von Anforderungen** an eine Plattform zur Unterstützung der Substitutionsprüfung.
- Definition eines **geeigneten Prozessmodells** zur Durchführung der Substitutionsprüfung unter Berücksichtigung aller relevanten Tätigkeiten.
- Konzeption eines **geeigneten Datenmodells** zur Abbildung der verschiedenen Datentypen (u. a. technische Informationen, Gefahreninformationen, Arbeitsplatzgrenzwerte für Stoffe) sowie Herstellung von **sinnvollen Beziehungen** untereinander.
- **Identifikation und Extraktion geeigneter Daten** aus unterschiedlichen Quellen (z. B. Stoffdatenbanken wie ECHA/GESTIS, Sicherheitsdatenblätter für Gefahrenhinweise, Produktdatenblätter für technische Informationen).
- **Konzeption geeigneter Methoden** zur **Lösung spezifischer Probleme** der einzelnen Prozessschritte.
- **Evaluation der Möglichkeiten zur Einbindung in bestehende Unternehmenssysteme** zur Verbesserung des Prozesses der Substitutionsprüfung (z. B. durch regelmäßige automatische Substitutionsprüfung über alle Substanzen der Stücklisten innerhalb eines PPS-Systems des Anwenders).
- **Evaluation der entwickelten Artefakte** unter Einbeziehung von Fachexperten.

1.3 Forschungsfragen

Zur Umsetzung der genannten Meilensteine ist ein zielgerichtetes Vorgehen notwendig, das sich an der Beantwortung relevanter Forschungsfragen orientiert. Zu Beginn der Arbeit sollten zunächst grundsätzliche Fragen über den Bedarf einer neuen Methode oder eines Informationssystems zur Substitutionsprüfung stehen. Wissenschaftliche Erkenntnisse müssen sich regelmäßig gegenüber einem anerkannten Bewertungsmaßstab bewähren, der auf der einen Seite zwischen der Notwendigkeit einer neuen Methode für die Praxis unterscheidet (*Relevance*), auf der anderen Seite die Stringenz des wissenschaftlichen Entwicklungsprozesses bemisst (*Rigor*).³⁶ Dabei ist zu beachten, dass sich beide Facetten gegenseitig beeinflussen, wodurch mehr *Relevance* in der Regel zu weniger *Rigor* und umgekehrt führt.³⁷ Im Rahmen dieser Arbeit sollen diese beiden Facetten in der für die vorliegende Fragestellung notwendigen Tiefe berücksichtigt werden. Die folgenden Forschungsfragen heben die wesentlichen Forschungsschwerpunkte dieser Arbeit hervor:

Der Kernaspekt dieser Arbeit stellt die Erstellung eines Referenzmodells dar, das als Ausgangspunkt für die Transformation von häufig händisch durchgeführten Prozessen der Substitutions-

³⁶ Vgl. ÖSTERLE ET AL. (2010), S. 665–666

³⁷ Vgl. MOODY 2000, S. 353

prüfung dient. Mit der Transformation soll die Entwicklung dieser Prozesse hin zu einer integrierten und IS-gestützten Durchführung der Substitutionsprüfung ermöglicht werden. Die hierfür verwendete IS-Unterstützung sollte das Ziel verfolgen, die wesentlichen und heute bereits existierenden Problemstellungen bei der Durchführung von Substitutionsprüfungen zu adressieren und notwendige Lösungskonzepte bereitzustellen.

Forschungsfrage 1: *Kann der Einsatz von Informationssystemen dabei helfen, die derzeit bestehenden Hemmnisse in Bezug auf die Substitutionsprüfung zu beseitigen?*

Als relevant kann ein Forschungsartefakt angesehen werden, wenn er auf konkrete Probleme aus der Praxis abzielt und diese mit einer (Teil-)Lösung adressiert. Dafür ist es notwendig, zunächst die Anforderungen aus der Praxis an eine Lösung zur Substitutionsprüfung zu erheben und anschließend bei der Konstruktion des Artefakts zu berücksichtigen.

Forschungsfrage 2a: *Welche Anforderungen werden aus Sicht von Forschung und Praxis an ein Informationssystem zur Unterstützung von Umwelt- und Arbeitsschutz im Allgemeinen sowie zur Unterstützung der Substitutionsprüfung im Besonderen auf Prozess-, Informations- und Methodenebene gestellt?*

Forschungsfrage 2b: *Wie lassen sich diese Anforderungen in konkrete IS-Artefakte integrieren und lässt sich aus ihnen die Architektur eines Informationssystems zur Substitutionsprüfung ableiten?*

Die Wirtschaftsinformatik ist als Schnittstellendisziplin zwischen Betriebswirtschaft und Informatik in besonderem Maße dazu geeignet, betriebliche Prozesse unter Berücksichtigung informationstechnischer Aspekte zu optimieren und die dafür notwendigen Informationssysteme zu gestalten.³⁸ Die Optimierung von Prozessen kennt dabei zwei Richtungen: einerseits die Anpassung von neuen Informationssystemen an bestehende Unternehmensprozesse (i. d. R. Individualentwicklung) oder umgekehrt, die Anpassung betrieblicher Prozesse an bereits existierende Informationssysteme (IS) oder an eine generelle IS-Strategie.³⁹ Eine dritte Variante, nämlich sowohl der Entwurf neuer Prozesse, als auch die Einführung einer an die neue Prozesslandschaft ausgerichteten IS-Landschaft kann als Mischform dieser beiden Typen betrachtet werden. Der Aufstieg neuer Technologien, wie Industrie 4.0, Sensorik oder Maschinelles Lernen stellt neue Anforderungen an die Prozesslandschaft im Bereich der Substitutionsprüfung, beispielsweise durch die Notwendigkeit der Kuratierung großer Datenbestände zur Verarbeitung von Trainingsdaten.

Forschungsfrage 3a: *In welcher Hinsicht müssen möglicherweise bestehende Prozesse zur Substitutionsprüfung angepasst werden, um eine effektive Unterstützung dieser Prozesse durch ein Informationssystem sicherstellen zu können (alignment)?*

³⁸ Vgl. LEIMEISTER (2015), S. 9–11; MERTENS ET AL. (2017), S. 3–4

³⁹ Vgl. HENDERSON UND VENKATRAMAN (1999), S. 477–480

Forschungsfrage 3b: Welchen Beitrag können Informationssysteme in den einzelnen Prozessschritten leisten, um spezifische Probleme der Prozessdurchführung zu adressieren?

Eines der erklärten Ziele der Wirtschaftsinformatik ist die „*sinnhafte Vollautomation*“ von operativen und planerischen Tätigkeiten.⁴⁰ Dabei geht es darum, Methoden zu entwickeln, die menschliche Entscheidungsprozesse imitieren können. Hierzu wurden in den vergangenen Jahrzehnten verschiedene Ansätze verfolgt. Ein solcher Ansatz sind Expertensysteme, bei denen auf Grundlage von Regeln oder Fallkonstellationen („*wenn X, dann Y*“) Entscheidungen getroffen werden. Expertensysteme bestehen aus einer *Wissensbasis*, die vorhandenes Wissen abbildet sowie einer Komponente zur *Wissensverarbeitung* (sog. *Inferenzmechanismus*).⁴¹ Während die Regeln häufig explizit in eine Datenstruktur überführt werden müssen, werden diese Regeln in aktuellen Ansätzen der Künstlichen Intelligenz (z. B. *Deep Learning*) implizit durch einen Trainingsprozess abgeleitet. Bis eine Vollautomatisierung erreicht ist, müssen in vielen Fällen Zwischenstadien mit verschiedenen Automatisierungsgraden bestimmter Tätigkeiten durchlaufen werden. Die Substitutionsprüfung stellt aktuell eine weitestgehend manuelle und zum großen Teil kognitive Aufgabe dar, die jedoch ein großes Potenzial für Effizienzgewinne durch Automatisierung in sich birgt.

Forschungsfrage 4: Können Verfahren der Künstlichen Intelligenz dazu verwendet werden, die arbeitsintensiven Tätigkeiten der Substitutionsprüfung zumindest teilweise zu automatisieren?

Da bislang noch keine geeignete Lösung in Form eines Informationssystems zur Unterstützung der Substitutionsprüfung am Markt verfügbar ist, müssen die entwickelten Artefakte einer formalen Evaluation unterzogen werden. Die Evaluation dient dazu, einerseits den Erfüllungsgrad der ursprünglich erhobenen Anforderungen von Unternehmen an die Lösung zu überprüfen. Andererseits muss überprüft werden, ob der im Informationssystem umgesetzte Prozess zur Substitutionsprüfung die betrieblichen Erfordernisse berücksichtigt und ob die konstruierten Datenmodelle zuverlässige Substitutionsempfehlungen ermöglichen.

Forschungsfrage 5: Welcher erwartete Nutzen lässt sich im Rahmen einer empirischen Evaluation des Referenzmodells und der Implementierung eines Informationssystems zur Substitutionsprüfung für den potenziellen Anwenderkreis der beiden Artefakte identifizieren?

1.4 Forschungsmethode

1.4.1 Gestaltungsorientierte Forschung

Die Wirtschaftsinformatik versteht sich als eigenständige Forschungsdisziplin⁴² und verwendet, wie viele andere Disziplinen auch, ein spezifisches Spektrum an etablierten Forschungsmethoden

⁴⁰ Vgl. MERTENS (1995), S. 48–49; MERTENS ET AL. (2017), S. 4

⁴¹ Vgl. ALPARE ET AL. (2019), S. 36

⁴² Vgl. HEINRICH (2012), S. 80–81