



# Software Engineering und Software-Engineering-Forschung im Zeitalter der Digitalisierung

## Ein Beitrag über das aktuelle und zukünftige Selbstverständnis des Software Engineering

Michael Felderer<sup>1</sup> · Ralf Reussner<sup>2</sup> · Bernhard Rumpe<sup>3</sup>

Online publiziert: 13. November 2020  
© Der/die Autor(en) 2020

### Zusammenfassung

Die Digitalisierung und der damit verbundene digitale Wandel durchdringen alle Lebensbereiche. Qualitativ hochwertige Software ist der zentrale Baustein und Treiber der Digitalisierung. Damit nimmt auch das ingenieurmäßige Erstellen von Software, das Software Engineering, eine zentrale Rolle im digitalen Wandel ein und ist dabei selbst großen Veränderungen unterworfen. Dieser Artikel versucht deshalb eine Standortbestimmung des Software Engineering und seiner Forschung im Zeitalter der Digitalisierung vorzunehmen.

„Die Informatik verändert sich. Deshalb müssen auch die Informatiker Ihre Rolle in der Gesellschaft neu überdenken.“  
von Ranga Yogeshwar 2018 auf der Informatik Tagung der GI.

Software und damit das Software Engineering zum kritischen Baustein und zentralen Innovationstreiber der Digitalisierung in allen Lebensbereichen. Auch wissenschaftlich ergeben sich neue Chancen und Herausforderungen für das Software Engineering als treibende Disziplin bei der Entwicklung jedweder technischer Innovation. Gerade die Chancen dürfen allerdings auch nicht dem Wettbewerb um bibliometrische Zahlen als Selbstzweck geopfert werden.

### Aktueller Stand und Beobachtungen

Die Digitalisierung wirkt sich nicht nur auf die Gesellschaft aus, sie verlangt auch eine Neubestimmung des Standorts der Informatik und der InformatikerInnen, wie sie der Wissenschaftsjournalist Yogeshwar in seinem obigen Zitat anregt. Da gerade sämtliche Aspekte der Digitalisierung auf Software beruhen, soll dieser Artikel der Versuch einer Neubestimmung insbesondere der Rolle des Software Engineering und seiner Forschung sein. Schon jetzt haben softwarebasierte Produkte, Systeme oder Dienstleistungen praktisch alle Lebensbereiche durchdrungen. Dadurch wird

### Trends

Konkret können wir gegenwärtig wenigstens diese sieben Trends über Software und das Software Engineering beobachten:

1. Software spielt in vielen Produkten die Rolle des wesentlichen Innovationstreibers oder Produkte werden durch softwarebasierte Dienstleistungen ergänzt, um sich am Markt wesentlich zu differenzieren. Beispiele sind automatisiertes Fahren oder die Digitalisierung von Geschäftsprozessen.
2. Software integriert Geräte und Dienstleistungen und ist damit der Kern sogenannter Systems-of-Systems. Beispiele sind die Themen zusammengefasst unter „Industrie 4.0“, das Smart Energy Grid oder moderne multimodale Mobilitätssysteme.
3. Software wird sogar noch zunehmend von Personen entwickelt, die dies nicht primär gelernt haben. Das liegt

✉ Michael Felderer  
michael.felderer@uibk.ac.at

<sup>1</sup> Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich

<sup>2</sup> KIT Karlsruhe, Karlsruhe, Deutschland

<sup>3</sup> RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

- zum Teil an der Unterversorgung des Arbeitsmarkts und zum Teil an dem zur Entwicklung notwendigen Domänenwissen. Notwendiger- und glücklicherweise wird zumindest die Programmierung von Software zum Commodity, deren Möglichkeiten und Grundzüge allerdings jeder wenigstens ansatzweise verstehen sollte.
4. Software nutzt zunehmend KI-Techniken, um Funktionalitäten zu lernen, zu verbessern oder anzupassen. Dadurch wird die Überprüfung von Qualitätseigenschaften während der Entwicklungszeit eingeschränkt und manchmal sogar verhindert, da das eigentliche Verhalten der Software erst nach der Trainingsphase absehbar ist, und nicht nur durch bloße Analyse des Codes oder das klassische Testen von Anforderungen deduziert werden kann. Beispiele finden sich etwa in der Bild- und Sprachverarbeitung und damit auch in sicherheitskritischen Systemen wie autonomen Fahrzeugen. Obwohl dies zum Beispiel aufgrund der Nutzung von Datenbanken immer schon partiell so war, übernehmen nun die Daten eine stärkere Rolle bei der Definition des Verhaltens von Software. Zudem haben KI-Techniken (etwa durch neue Verfahren der Bild- und Spracherkennung) auch zu einer Erweiterung des Spektrums der Benutzerschnittstellen und damit der Bedeutung der User Experience beigetragen.
  5. Auch für den Forschungsprozess im Software Engineering selbst sind Daten entscheidend, um Hypothesen empirisch zu prüfen. Allerdings birgt die beinahe beliebige Verfügbarkeit von Daten im Software Engineering auch Gefahren für den Forschungsprozess. Zu häufig werden Daten etwa aus Software Repositorien oder durch Umfragen generiert und anschließend publiziert ohne diese durch eine Theorie, eine genaue Kontextdefinition oder eine Vision zur Entwicklung einer Methode zu fundieren, wodurch der Nutzen dieser Arbeiten für die Disziplin des Software Engineering unklar bleibt.
  6. Software greift immer normativer in Lebensrealitäten ein. Softwareprodukte haben bereits heute institutionellen Charakter: Sie regeln und machen Vorgaben, allerdings oft ohne die Legitimation der üblichen Institutionen. Sie werden daher in Zukunft notwendigerweise zunehmend von staatlicher Seite reguliert. Dazu gehört insbesondere der Schutz personenbezogener Daten als essenzielle Komponente des Schutzes der Personen selbst.
  7. Der Umgang mit Software wirkt sich auch auf die Kognition und die Persönlichkeit der BenutzerInnen sowie auf die Gesellschaft als Ganzes aus. Diese Wirkungen sind heute zwar erkennbar, aber noch nicht wirklich abgeschätzt oder gar reflektiert bei der Entwicklung der Software.
- Mit der Industrialisierung und der Vergesellschaftung von Software und Daten einhergehend ist auch zu beobachten, dass immer mehr Menschen aktiv in die Entwicklung von Software eingebunden sind, sei es durch die Bereitstellung von Anforderungen, das Testen von Systemen im Feld oder die Teilnahme an der Softwareentwicklung selbst und dass mit immer kürzeren Innovationszyklen auch immer kürzere Entwicklungszyklen einhergehen. Konkret wird Software zur Laufzeit durch nachladbare Komponenten und Apps stark veränderlich, erweiter- und anpassbar. Der Mensch ist als Datenquelle heute (mehr passiv) Teil von Softwareökosystemen. Aber auch zur aktiven Konfiguration (z. B. der vielen einzelnen Geräte im zukünftigen E-Home) werden immer mehr Menschen die Fähigkeit benötigen, rudimentär Software zu programmieren („Programming as a Commodity“). Zudem rückt der Mensch als User immer mehr in den Fokus der Entwicklung, um durch neue Interfaces wie Sprachein- und -ausgabe oder Augmented Reality die User Experience zu optimieren. Software Engineering muss sich also in Zukunft nicht nur mit der Entwicklung von Software beschäftigen, sondern auch mit deren hoch-adaptiver Konfigurierbarkeit, Benutzerakzeptanz und der Qualitätssicherung von konfigurierter und durch Daten trainierter Software.
- Schon aus technischer Perspektive ergeben sich aus den obigen Beobachtungen neue Herausforderungen, die auch eine neue Standortbestimmung der nunmehr 50 Jahre alten Disziplin des Software Engineering [1–4] erfordern:
1. Software Engineering nimmt Regulationen und Werteverständnisse auf und versucht Verfahren, Algorithmen und deren Konfigurationsdaten sowie Architekturen zu entwickeln, um diese systematisch umzusetzen.
  2. Software Engineering verpackt Softwareansätze so, dass auch Nicht-SoftwaretechnikerInnen sie nutzen können. Als Beispiel und Vorbild können Datenbanksysteme gelten, die auch von Nicht-InformatikerInnen sinnvoll eingesetzt werden können. Die Nutzbarmachung wesentlicher Algorithmen, insbesondere des maschinellen Lernens, ist für andere Disziplinen eine weitere Schnittstelle, zugegebenermaßen nicht nur, aber auch zu den Sozial- und Gesellschaftswissenschaften.
  3. Software Engineering beschäftigt sich natürlich primär mit Software und den notwendigen Grundlagen ihrer Entwicklung. Aber auf beide Bereiche haben Menschen und Organisationen einen entscheidenden Einfluss. Die Entwicklung und Untersuchung von Software-Engineering-Artefakten bedarf deshalb die Einbeziehung des Entstehungs- und des Anwendungskontextes. Unter anderem deshalb ist die Anwendung von empirischen Forschungsmethoden und Theorien aus den Sozialwissenschaften wie Psychologie oder Soziologie notwendig, um menschliche und organisatorische Kontextfaktoren

geeignet in den Software-Engineering-Forschungsprozess weiter zu integrieren. Software Engineering hat in diesem Sinne nicht nur Züge von traditionellen Ingenieurwissenschaften wie Maschinenbau oder Elektrotechnik, sondern unterscheidet sich von diesen durch diesen zusätzlichen sozialwissenschaftlichen Charakter.

## Konsequenzen für das Software Engineering

Daraus lassen sich einige Konsequenzen für Software Engineering ableiten:

1. Eine der wesentlichsten Konsequenzen aus diesen Beobachtungen ist, dass Software bzw. die Handlungen, Vorschläge und Entscheidungen, die Software trifft oder ausführt, in Zukunft besser nachvollziehbar sein müssen. Dies gilt insbesondere bei adaptiver Software, bei lernender Software und bei Software, die in dem oben genannten Maß durch EndnutzerInnen modifizierbar sein soll. Solche Software zu erstellen ist natürlich auch für Software Engineering eine Herausforderung, da sowohl die Form der Erklärung für NutzerInnen einfach und gut verstehbar sein muss, als auch zum Beispiel bei adaptiver und lernender Software Erklärungen nicht notwendigerweise vorab bereits definiert und fixiert werden können.
2. Software Engineering drängt sich vermehrt in die Rolle des umfassenderen Systems Engineering. Durch die zunehmend dominierende Rolle von Software in technischen Systemen verändert sich der Zusammenhang von Software und Systems Engineering. Konnte man Software Engineering bisher als einen Teil des Systems Engineering betrachten, so bietet heute Software Engineering selbst oft die grundlegenden Methoden für die Entwicklung softwareintensiver technischer Systeme. Software Engineering entwickelt sich deshalb von einer „Nebenbeschäftigung“ des Systems Engineers zum primären Treiber der Entwicklung. Daraus lassen sich einige Konsequenzen ableiten, die vor allem Entwicklungsprozesse betreffen. Immer noch beißen sich der funktionsorientierte Softwareentwicklungsprozess mit dem vor allem geometrisch dekomponierenden Systementwicklungsprozess. Viele Methoden zur Systematisierung und Automatisierung der Software-Engineering-Aktivitäten bei Dekomposition, Synthese, Qualitätssicherung, aber auch im Management von Evolution und Varianten müssen noch in den Systementwicklungsprozess übertragen werden. Erst dann lassen sich auch die von vielen gewünschten agilen Vorgehensmethoden stärker und gewinnbringend in die Systementwicklung einbringen.
3. Software Engineering war es immer und wird es noch stärker werden: eine Integrationsdisziplin. Durch Software werden einzelne Produkte und Dienstleistungen vernetzt. Damit ergibt sich durch Software oft erst die Möglichkeit, innovative Szenarien umzusetzen, z. B. für Energieversorgung mit regenerativen Energieformen, Mobilität in der Kombination verschiedener Verkehrsträger oder zur komplexen Wertschöpfungsketten vernetzte Produktionsanlagen. Dadurch kommt den SoftwareingenieurInnen aber auch eine wesentliche Rolle in der „Findung“ oder sogar „Erfindung“ und Definition der eigentlichen Funktionalität des Systems-of-Systems zu. Während sich durch die Vernetzung die Produkte immer mehr integrieren, differenzieren sich die Rollen und Fähigkeiten der an einem Produkt beteiligten EntwicklerInnen immer weiter aus. Dies gilt sowohl für Produkte, als auch für die immer stärker vernetzte und digitalisierte Welt der Produktion. Dabei nicht zu vernachlässigen sind auch die immer komplexeren Softwarewerkzeuge, die zur Entwicklung selbst eingesetzt werden und aufgrund der Vernetzung ihrerseits die Verbindung zum ausgelieferten, aber beobachtbaren und aktualisierbaren Produkt halten werden.
4. Software wird datengetrieben adaptiv. Durch den Einsatz von Verfahren des maschinellen Lernens zur Erbringung von Softwarefunktionalität kann diese häufig nicht mehr zur Entwicklungszeit überprüft werden, da die Funktionalität nicht nur durch den Code, sondern auch durch (Trainings-)Daten festgelegt wird. Hier müssen wir verstehen lernen, unter welchen Bedingungen und inwieweit ein zu bauendes System noch zur Entwicklungszeit absicherbar ist, unter welchen Bedingungen eine Laufzeitüberwachung durch sogenannte „Monitore“ möglich ist, wann eine A-posteriori-Analyse von Fehlern noch zulässig ist oder auch wann ein System nicht gebaut werden darf, da es nicht mehr absicherbar ist. Und dies gilt sowohl dann, wenn das Training selbst bereits in der Entwicklungszeit abgeschlossen wird, als auch dann, wenn das System in Betrieb weiter lernt („life-long learning“).
5. Software muss normen- und gesetzessicher gebaut werden. Durch die notwendige zunehmende Regulierung softwarebasierter Produkte und Dienstleistungen gerade im Bereich des Datenschutzes und der Personensicherheit ergeben sich neue Anforderungen an die Software und ihre Entwicklungsmethodik. Bisher können Anforderungen wie der Schutz personenbezogener Daten gemäß sich wechselnder Einverständniserklärungen für verschiedene sich ändernde Arten der Datennutzung über den gesamten Lebenszyklus der Software nicht systematisch umgesetzt geschweige denn nachgewiesen werden.

Gemeinsam ist all diesen Herausforderungen, dass zum einen dadurch die Komplexität der Software weiter massiv ansteigen wird, zum anderen, dass immer mehr Menschen in verschiedenen Rollen mit Software und ihrer Entwick-

lung zu tun haben werden und von ihrer Funktionalität und von ihren Entscheidungen noch stärker als bisher abhängen werden. Insbesondere ist eine oben genannte Konsequenz daraus, dass auch der Bedarf an Nachvollziehbarkeit und Erklärbarkeit von Software steigen wird. Nur so wird auch die notwendige Akzeptanz beim Nutzer, bei Organisationen und in der Gesellschaft insgesamt erreichbar sein. Auch ist klar, dass es noch weniger als heute Personen geben wird, die ein Gesamtverständnis – oder auch nur einen detaillierten Überblick – haben werden. Die Konsistenzhaltung der verschiedenen Sichten auf ein System wird also immer wichtiger.

### Weiterentwicklung des Software Engineering

Im Zuge des Jubiläums „50 Jahre Software Engineering“ [1] – seit der NATO Konferenz 1968 – gibt es mehrere Diskussionen über deren Essenz und weitere Entwicklung des Software Engineering als Disziplin. Basierend auf der hohen praktischen Relevanz von Software-Engineering-Lösungen schlagen Basili und Briand [2] eine stärkere Kontextorientierung der Software-Engineering-Forschung vor, da die Anwendbarkeit und Skalierbarkeit von Software-Engineering-Lösungen zentral von Kontextfaktoren wie dem Menschen (etwa seines Persönlichkeitstyps und Wissenshintergrunds), der Organisation (etwa Kosten- und Zeitrestriktionen) oder der Domäne (wie etwa der Kritikalität oder der geforderten Compliance zu Standards) abhängt. In ihrem kontextgetriebenen Forschungsparadigma für das Software Engineering schlagen sie demnach vor, nicht mehr weiter primär top-down allgemeine Ansätze ohne Berücksichtigung von Kontextfaktoren zu entwickeln, sondern bottom-up in Kollaboration mit Praktikern innovative Lösungen zu entwickeln und dabei Zusammenhänge zu erkennen, Theorien zu entwickeln und wissenschaftlich vor allem durch den Einsatz empirischer Methoden zu evaluieren. Damit in Verbindung stehend hebt Broy [3] den integrativen Charakter des Software Engineering für alle etablierten Ingenieursdisziplinen hervor sowie die Notwendigkeit die Software-Engineering-Ausbildung aufgrund der strategischen und gesellschaftlichen Bedeutung von Software dahingehend zu erweitern, dass SoftwareingenieurInnen kompetent Entscheidungen von strategischer Tragweite treffen können. Booch [4] sieht Abstraktion, Separation of Concerns, Verteilung von Verantwortlichkeiten sowie Einfachheit zum Management von Komplexität als zentrale Fundamente des Software Engineering, die es zukünftig etwa auf KI-Systeme anzuwenden gilt, um Antworten auf zentrale Fragen in diesen Systemen, wie etwa nach ihrem Lebenszyklus, ihre Qualitätssicherung oder ihre Konfiguration, zufriedenstellend beantworten zu können.

Wir denken, die Weiterentwicklung des Software Engineering und insbesondere die integrative Anwendung des

Software Engineering in Kombination mit anderen Disziplinen ist in den nächsten Jahren essenziell. In den letzten 50 Jahren hat sich innerhalb des Software Engineering Wesentliches getan. Eine solide und große Sammlung an Methoden erlaubt uns, punktgenau Agilität mit der konstruktiven Entwicklung und Synthese der Software und der analytischen Qualitätssicherung zu verzahnen. Requirements Engineering ist seinem Wesen nach schon immer eine hochgradig an Innovationen interessierte Methodik. Softwarearchitektur erlaubt es, funktionsorientiert, aufgabenorientiert, orientiert an den physikalischen Gegebenheiten oder datenorientiert komplexe Herausforderungen zu zerlegen, zu organisieren und in robuste Lösungen umzusetzen. Modellbildung hat als Wesenszug zur Abstraktion und Darstellung der funktionalen Essenz eines Systems in der Softwareentwicklung unter anderem durch die Standards UML und SysML, aber auch durch domänenspezifische Sprachentwicklungen Einzug gehalten. Varianten- und Versionsmanagement befinden sich genauso in der Werkzeugkiste der SoftwareingenieurInnen wie Simulations-, Testautomatisierungs- und Analysewerkzeuge zur Qualitätssicherung sowie Messwerkzeuge verschiedenster Arten.

Eine der großen Herausforderungen für Software-Engineering-Forschungsergebnisse selbst bleibt allerdings ihre praktikable Umsetzbarkeit durch Werkzeuge. Werkzeuge entstehen häufig als Nebenprodukt wissenschaftlicher Forschung oder werden durch eine gemeinsame Community als Open-Source-Werkzeuge so weit vorangetrieben, wie es dieser Community möglich ist. Werkzeuge sind heute hochkomplex und benötigen sowohl einen guten Bedienungskomfort, als auch die relevante Funktionssicherheit und müssen auf große Projekte skalieren.

### Was hat Software Engineering auch für andere Disziplinen zu bieten?

Software Engineering ist zunächst wie jede Ingenieursdisziplin eine konstruktive Wissenschaft. In den 50 Jahren seit Bestehen der Disziplin wurde zunehmend gelernt, welche Konsequenzen sich aus der Besonderheit von Software ableiten, nicht materiell zu sein. Aktuell ist Software dabei, den Alltag von Individuen, Organisationen und letztlich der Gesellschaft in jeder Hinsicht so schnell wie kaum eine andere Disziplin zuvor zu verändern. Nahezu alle Disziplinen und Domänen sind in Begriff, sich zu digitalisieren. Für eine Standardbestimmung setzen wir deshalb das Software Engineering sowohl zu den anderen Ingenieurwissenschaften als auch den Sozialwissenschaften in Bezug.

## Bezug zu anderen Ingenieurwissenschaften

Wie einleitend, beschrieben wird der Bezug zu anderen Ingenieurwissenschaften gegenwärtig geprägt durch

- a. den steigenden Anteil von Software in vielen technischen Systemen,
- b. der Vernetzung dieser Systeme zu Systems-of-Systems durch Software,
- c. dem hohen Anteil an Software beim Innovationsgrad technischer Systeme sowie
- d. dem antizipierten Nutzen, wenn spezifische softwaretechnische Vorgehensweisen auch im Systems Engineering angewandt werden.

Letztlich bedingen diese Faktoren einander, sodass wir sie gemeinsam mit dem letzten beginnend ausführen.

Im Vergleich zu den Artefakten anderer Ingenieursdisziplinen ermöglicht die Eigenschaft von Software, nicht materiell zu sein, einen größeren Entwurfsraum, der kaum durch physische Materialeigenschaften eingeschränkt ist. Werkzeuge und Methoden sind unter dem Stichwort Agilität in den letzten Jahren intensiv weiterentwickelt worden, sodass schnelle Feedback- und Innovationszyklen in der Software üblich sind. Seit etwa 2000 wissen wir, dass die Time-to-Market im Internetzeitalter noch viel wichtiger geworden ist und im Internet „ein Jahr nur drei Monate“ dauert. Negative Auswüchse des schnellen Entwickelns, wie etwa der Bananensoftware, die erst beim Kunden reift, sind durch methodische Maßnahmen, wie etwa aktive Beta-Tester, testgetriebene Entwicklung, frühe Reviews (z. B. auch Pair-Programming) oder kontinuierliches Monitoring des Kundenverhaltens und damit auch der Kundenzufriedenheit abgefangen worden.

Wenn Software selbst keine physikalische Manifestation hat, ist ihre „Produktion“ reduziert auf den Build-Prozess, das Deployment und die Konfiguration. Da diese Vorgänge weitgehend automatisierbar sind, ist vor allem der Entwicklungsprozess, um den sich traditionell ja das Software Engineering kümmert, der limitierende Faktor. Dabei spielen die einzelnen entwickelnden Menschen, die Teamstruktur und -zusammensetzung sowie die Randbedingungen durch die Organisation eine größere Rolle als bei anderen Ingenieurwissenschaften. Sie prägen den Prozess der Produktentwicklung erheblich und beeinflussen damit letztlich auch Qualitätseigenschaften des Produkts selbst intensiv. Diese menschlichen und organisatorischen Faktoren sind deshalb ebenfalls ein wichtiger Einflussfaktor und damit Untersuchungsgegenstand des Software Engineering. Darüber hinaus bietet das Software Engineering als Disziplin eine Fülle an Techniken und Methoden, welche die Effizienz und Effektivität der menschlichen Interaktion im Kontext der Softwareentwicklung optimieren.

Dadurch ergeben sich für die Entwicklung softwareintensiver technischer Systeme eine Reihe von Möglichkeiten, Einsichten aus dem Software Engineering zu übertragen. Dazu gehören zum Beispiel Vorgehensmodelle, die nicht mehr von der Vorausplanbarkeit eines ganzen Systems ausgehen, sondern eine dezentrale Entwicklung von Systemen erlauben, die lose gekoppelt sind und keinem gemeinsamen Entwicklungsprozess unterliegen, obwohl sie Systemkomponenten und -schnittstellen teilen. Dazu gehören zum Beispiel auch agile Verfahren zur Unterstützung schneller Innovationszyklen. Da Software letztlich auch ein Modell der Realität mehr oder weniger explizit und ausführlich in sich trägt, sind Verfahren der Modellierung aus dem Software Engineering, wie zum Beispiel die UML, SysML oder Meta-Modellierung, sowie die Synthese, Analyse und Transformation von Modellen von besonderem Interesse für das Systems Engineering, zumal der Umgang mit Modellen und deren Analyse und Simulation ohnehin zum bestehenden Ingenieurvorgehen passt. In der Praxis zeigt sich aber, dass die Modelle der Software Engineering und des Systems Engineering bzw. die zugrunde liegenden Paradigmen nicht einfach vereint werden können und daher noch viel grundlegende Forschung notwendig ist.

Besonders sichtbar ist die Nutzung von Modellierungstechniken, wenn diese nicht nur zur Entwicklung, sondern auch während des Betriebs der Software im Einsatz sind. Traditionell sind das zum Beispiel explizite Datenmodelle oder Geschäftsprozessmodelle, die manchmal in Grenzen, aber öfter auch flexibel anpassbar sein sollen. In der Produktwelt sind das digitale Twins, also rein virtuelle, durch Modelle und Simulationen betriebene „Zwillinge“ physischer Artefakte, die auch Meta-Information enthalten und durch prädiktive Techniken zur Vorhersage von Eigenschaften, aber insbesondere zur Kontrolle und Steuerung ihrer physischen Zwillinge eingesetzt werden können. Die gemeinsame, weil eng verzahnte Entwicklung des physischen Produkts und seines virtuellen Zwillings erfordert neue Techniken. Dies ist auch deshalb notwendig, weil auch viele physische Produkte mit der Zeit ergänzt, erweitert, aktualisiert oder durch Ersatzteile modifiziert werden und ein digitaler Zwilling dies reflektieren und idealerweise sogar antizipieren muss. Hier wird das bestehende Verständnis von „Digital Engineering“ substanziell erweitert, indem nicht „nur“ bestehende Entwicklungsprozesse durch Software unterstützt werden, sondern nun auch softwaretechnische Methoden neue Entwicklungsprozesse ermöglichen. Eine Vision wäre die integrierte Modellierung und Analyse in einem gemeinsamen Entwurfsraum, im dem Software, aber auch physische Artefakte methodisch gemeinsam behandelt werden. Natürlich müssen diese Verfahren systematisch mit Fragen der unterschiedlichen Lebenszyklen von Software und physischen Artefakten umgehen und dabei ihre Konsistenz sicherstellen.

## Bezug zu den Sozialwissenschaften

Es ist wie immer im Software Engineering: Die Einführung neuer Systeme verändert die Verhaltensweisen und Aktivitäten (Geschäftsmodelle und -prozesse, Support, etc.) der NutzerInnen. Das muss so sein, denn sonst wäre die Software sinnlos. Die zurzeit massiv voranschreitende Digitalisierung wird daher starke Konsequenzen für Individuen, Organisationen, Unternehmen und die Gesellschaft haben, die durchaus mit denen der Industrialisierung im 19. Jahrhundert vergleichbar sind. Offensichtlich hat sich das Kommunikationsverhalten bereits massiv verändert. Untersuchungen zeigen aber auch Änderungen der menschlichen Kognition durch die allgegenwärtige Nutzbarkeit digitaler Geräte oder der Arbeitsweisen von Teams. Die Auswirkungen neu entstehender Geschäftsmodelle und ihrer gesellschaftlichen Auswirkungen können im sozialen und im Arbeitsleben immens sein, wenn die Wertschöpfung durch Automatisierung und dem damit auch verbundenen Wegfall traditioneller Arbeitsplätze zugunsten neu geschaffener digitaler Arbeitsplätze einhergeht. Dazu kommen Geschäftsmodelle, die aus personenbezogenen Daten Werte schöpfen und Social-Media-Anwendungen, die durch das permanente Feedback zu den Handlungen einzelner auch grundlegende Rechte wie Privatheit oder Gleichbehandlung zumindest neu austarieren.

Die Erforschung dieser Effekte auf Einzelne, Organisationen und die Gesellschaft insgesamt ist in den Sozialwissenschaften als Technologiefolgenabschätzung bereits im Gange und beeinflusst auch das Software Engineering.

Daher gibt es mehrere Schnittstellen des Software Engineering zu den Sozialwissenschaften, die auch deshalb relevant sind, weil viele Möglichkeiten der Digitalisierung und die daraus folgenden Verwendungsformen aktuell noch nicht umgesetzt sind, sondern höchstens angedacht werden. Dazu gehören sowohl Techniken der Speicherung und Verarbeitung personenbezogener Daten im Bereich Data Science als natürlich auch die Methoden der künstlichen Intelligenz, die im aktuellen Hype-Zyklus einige weitere Probleme lösen wird, aber auch dieses Mal alle nicht Probleme, zu deren Lösung Intelligenz notwendig ist, in den Griff bekommen dürfte. Software Engineering steht demnach zu den Sozialwissenschaften in folgenden Wechselwirkungen:

1. Software Engineering kann Szenarien liefern, die verständlich machen, welche Softwarefunktionalitäten in der nächsten Zukunft realisierbar sind oder realisierbar werden können. Hier sind durchaus auch sowohl Szenarien interessant, die das Wohl einzelner oder das Gesamtwohl der Menschen verbessern, aber auch Szenarien beschreibbar, die nach dem aktuellen Werteverständnis zwar möglich, aber nicht wünschenswert sind. Dadurch können Untersuchungen über die langfristigen Konsequenzen und Diskussionen über das, was gesellschaftlich wünschenswert ist, ausgelöst und faktenorientiert geführt werden.
2. Software Engineering nimmt Regulationen und Werteverständnisse auf und versucht, Verfahren, Algorithmen und Architekturen zu entwickeln, um diese systematisch umzusetzen. Dieser Punkt ist gewissermaßen das Gegenstück zum vorherigen Punkt, wo das Software Engineering Szenarien liefert; hier nimmt es solche von den Sozialwissenschaften auf.
3. Software Engineering unterstützt Softwareentwicklungsansätze mit Methoden und Werkzeugen, sodass auch Nicht-SoftwaretechnikerInnen sie nutzen können. Als Beispiel können die bereits genannten Datenbanksysteme gelten oder auch das Enduser-Computing, das in verschiedensten Formen weitere Verbreitung findet. Dazu gehören einfache und intuitive Konfigurationssprachen, wie sie etwa im Bereich der Home-Automatisierung angeboten werden, oder auch Wizards für bestimmte partikulare Probleme. Darüber hinaus trägt das Software Engineering auch zur Nutzbarmachung wesentlicher Algorithmen bei, insbesondere im Bereich des maschinellen Lernens von Zusammenhängen aus Datenmengen, wodurch den Sozialwissenschaften neue quantitative Methoden effektiv zur Verfügung stehen.
4. Mit der Durchdringung aller Lebensbereiche mit softwarebasierten Produkten und Dienstleistungen rückt der Mensch als Nutzer, dessen User Experience es zu optimieren gilt, immer mehr in den Fokus der Entwicklung. Solche Usability-Aspekte können nur mit sozialwissenschaftlichen Methoden, insbesondere aus der Psychologie, adäquat adressiert werden. Die Bedeutung der User Experience für den Erfolg von softwarebasierten Lösungen hat zusätzlich durch eine Vielzahl neuer Benutzerschnittstellen wie etwa für die Sprachein- und -ausgabe oder Augmented bzw. Virtual Reality stark zugenommen.
5. Wie bereits besprochen haben Menschen und Organisationen einen entscheidenden Einfluss auf das Software Engineering. Die Entwicklung und Untersuchung von Software-Engineering-Artefakten bedarf deshalb der Anwendung von empirischen Forschungsmethoden und Theorien aus den Sozialwissenschaften wie der Psychologie oder Soziologie, um menschliche und organisatorische Kontextfaktoren geeignet in den Software Engineering Forschungsprozess integrieren zu können. Software Engineering hat in diesem Sinne nicht nur Züge von traditionellen Ingenieurwissenschaften wie Maschinenbau oder Elektrotechnik, sondern unterscheidet sich von diesen durch diesen ausgeprägteren sozialwissenschaftlichen Charakter.

Eigentlich war es schon immer eine Aufgabe des Software Engineering, sicherzustellen, dass Software nachvollziehbar ist. Allerdings steigt die Komplexität von Software, die aus immer umfangreicheren Technologie-Stacks sowie aus immer mehr und stärker vernetzten Anwendungskomponenten entsteht, weiter deutlich an. Es werden immer häufiger selbstlernende Komponenten, aber auch traditionell programmierte intelligenter („smarte“) Komponenten zur Kontrolle immer kritischerer und mit immer mehr Sensorik behafteter und daher unsicherer Systeme eingebaut werden. Machine-Learning-Komponenten komplizieren dies weiter. Die Verstehbarkeit von Software, also insbesondere die Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen und Kontrolle, die Software trifft bzw. ausübt, wird daher in der nächsten Zeit deutlich wichtiger. Dabei ist Nachvollziehbarkeit während der Nutzung aber auch „post mortem“, zum Beispiel zur Verbesserung der Software oder für gerichtliche Klärungen, notwendig. Sollte das nicht nachhaltig gelingen, werden roboterpsychologische Analysen für das Verhalten intelligenter Maschinen im Sinne von Asimovs notwendig.

Während die anderen Ingenieurwissenschaften im Wesentlichen die Naturwissenschaften und die Mathematik als Grundlagenwissenschaften nutzen, sind dies für das Software Engineering vor allem die Mathematik, aber auch die Sozialwissenschaften, weshalb eine Befruchtung in beide Richtungen (zwischen Software Engineering und Sozialwissenschaften) sinnvoll und notwendig ist.

## Was macht moderne Software-Engineering-Forschung aus und welche Themen müssen diskutiert werden?

Um aktuelle und zukünftige Forschungsbeiträge des Software Engineering abzustecken und den Bezug zu anderen Wissenschaften zu präzisieren, ist es notwendig, die moderne Software-Engineering-Forschung im Zeitalter der Digitalisierung zu charakterisieren.

Abb. 1 zeigt die Kernbereiche der Software-Engineering-Forschung und ihre Wechselbeziehungen zu Anwendungsdomänen und zu Grundlagenwissenschaften. Im Sinne der oben genannten Kontextorientierung des Software Engineering [2] und der Durchdringung aller Lebensbereiche mit Software liefern Anwendungsdomänen wie die Produktion, die Logistik, das Gesundheitswesen, aber auch Wissenschaftsdisziplinen selbst (insbesondere auch die Informatik) den Kontext, d. h. Daten und Problemstellungen aus einem bestimmten Sachzusammenhang, für die Software-Engineering-Forschung. In der Software-Engineering-Forschung werden Artefakte (etwa Werkzeuge oder Entwicklungsmethoden) und Evidenz, d. h. empirisch oder formal fundierte Einsichten, bereitgestellt, um die Problemstellung im Anwendungskontext zufriedenstellend zu adressieren.

Als Ingenieursdisziplin greift die Software-Engineering-Forschung dabei neben eigenen Forschungsansätzen auf Grundlagenwissenschaften wie Mathematik, Informatik, andere Ingenieurwissenschaften oder Sozialwissenschaften zurück. Diese liefern Algorithmen und Theorien und unterstützen dabei das Design von Lösungen und die Wissensgewinnung im Software Engineering. In den folgenden Abschnitten behandeln wir den Kern des Software Engi-

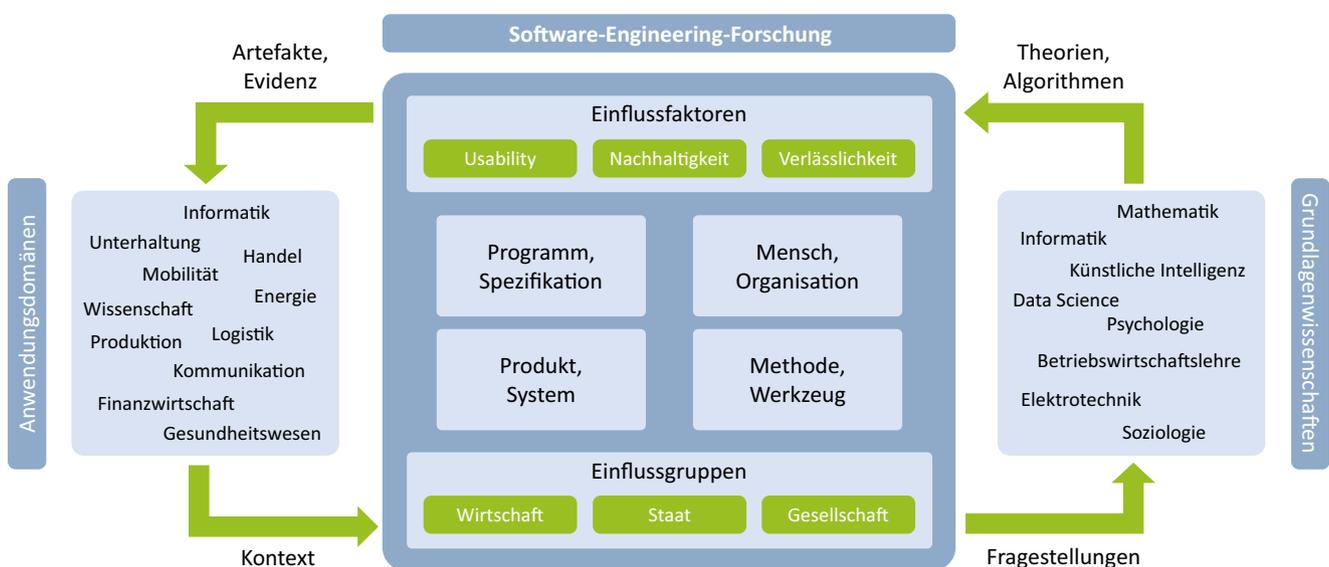


Abb. 1 Software-Engineering-Forschung sowie Verbindung zu Anwendungsdomänen und Grundlagenwissenschaften

neering, also auch den Bezug zu Anwendungsdomänen und Grundlagenwissenschaften ausführlich.

### Kern der Software-Engineering Forschung

Software Engineering und die zugehörige Forschung sind seit langem klar definiert, daran ändern auch aktuelle Diskussionen wie hier oder im Zuge von 50 Jahre Software Engineering [1] nichts. Die folgende, bereits 1990 im IEEE Glossary of Software Engineering Terminology [5] vorgewommene Definition ist auch heute noch gültig und muss aus Sicht der Autoren nicht adaptiert werden:

1. The application of a systematic, disciplined, quantifiable approach to the development, operation, and maintenance of software; that is, the application of engineering to software.
2. The study of approaches as in (1).

Sie definiert das Software Engineering als Ingenieursdisziplin („application of engineering to software“) mit einer eigenen Methodik („systematic, disciplined, quantifiable approach“), angewendet auf alle Phasen des Lebenszyklus von Software („development, operation, and maintenance of software“). Der zweiteilige Aufbau der Definition bringt auch die enge Verzahnung von Software Engineering (1) und Software-Engineering-Forschung (2) zum Ausdruck. Die Grenzen zwischen beiden verschwimmen bisweilen. In der Software-Engineering-Forschung ist auf alle Fälle die systematische Reflexion deutlich ausgeprägter und der angestrebte Nutzen sowie die Generalisierbarkeit der Ergebnisse jenseits einzelner Projekte deutlich größer. Eine scharfe Trennung kann jedoch nicht gezogen werden, da zum Beispiel die Entwicklung eines Frameworks, Werkzeugs oder Meta-Modells gleichzeitig sowohl Anwendungs- als auch Forschungscharakter haben kann.

Klassischerweise differenziert sich Software-Engineering-Forschung selbst in die spezifische Betrachtung der unterschiedlichen Aktivitäten im Softwarelebenszyklus. Diese sind Analyse, Design, Implementierung, Testen, Deployment und Wartung. Hinzu kommen Querschnittsaktivitäten wie Projektmanagement, Qualitätsmanagement, Modellierung und Modellierungssprachen oder Variantenmanagement, die ebenfalls Teil der Software-Engineering-Forschung sind. Den zentralen Untersuchungsgegenständen in all diesen Kern- und Querschnittsaktivitäten des Softwarelebenszyklus können vier Bereichen zugeordnet werden:

1. Das Programm (der Code oder dessen Ausführung) und die Spezifikation (das informelle Diagramm, das formale textuelle oder grafische Modell, die natürlichsprachliche Anforderung)

2. Der Mensch (als Entwickler, Anwender oder in einer der vielen weiteren Rollen) und die Organisation (Entwicklungsteam, Integration in eine Gesamtorganisation)
3. Das Produkt (etwa die softwaregetriebene Innovation, die Qualität, die Softwarelogistik) oder System (etwa die Integration von Software mit Hardware oder die Integration von Systemen)
4. Die Methode (das Verfahren, die menschliche Aktivität, der automatisierte Bearbeitungsalgorithmus im Werkzeug, Prozessmodelle) oder das Werkzeug zur Unterstützung aller Phasen des Softwarelebenszyklus (etwa Modellierungs- oder Testwerkzeuge)

Als Ingenieursdisziplin folgt das Software Engineering sinnvollerweise einem Design-Science-Ansatz, bei dem Artefakte sich auf alle vorhin genannten Untersuchungsgegenstände des Software Engineering beziehen können. Der Begriff „Artefakt“ ist dabei relativ breit angelegt und schließt Werkzeuge, zum Beispiel automatisierende oder unterstützende Algorithmen etwa zur Testfallgenerierung, Templates zur Dokumentation von Anforderungen oder eine Methodik für die Aufwandsschätzung von Softwareprojekten mit ein. Mit der Durchdringung diverser Produkte und Dienstleistungen mit Software nimmt neben der systematischen Konstruktion von Artefakten die kreative Innovation eine immer bedeutendere Rolle ein und wird auch zunehmend durch Ansätze wie das Design Thinking oder Continuous Experimentation unterstützt. Werkzeuge spielen eine herausragende Rolle im Software Engineering, da sie die entwickelten Artefakte für die praktische Nutzung zugänglich machen. Erst die Existenz bestimmter Arten von Werkzeugen haben moderne Entwicklungsmethoden, wie zum Beispiel agile Entwicklung, möglich gemacht. Extreme Programming wäre ohne leichtgewichtige Testinfrastruktur, schnelle Generatoren und Übersetzer sowie Entwicklungsumgebungen mit integrierten Refactoring-Werkzeugen undenkbar. Der Komfort von spezifischen Editoren für Programmiersprachen (typspezifische Autovervollständigung, Highlighting, Refactoring im Editor) hat die Programmierweise der Entwickler massiv verändert. Hätten wir solche Werkzeuge auch in den früheren Phasen, wären auch Requirements Engineering, Architektur und Design wesentlich effizienter. Auch fehlen uns gute Werkzeuge zur Nachverfolgung von Anforderungen und Designentscheidungen, die man dringend benötigt, um den Impact von Änderungen zu antizipieren.

Software Engineering bzw. die Anwendung in konkreten Projekten beinhaltet typischerweise eine ausgeprägte Reflexion, die sowohl zur Optimierung innerhalb des Projekts als auch zur Weitergabe von projektübergreifendem Wissen genutzt werden. Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass ein Teil der Software-Engineering-Forschung notwendigerweise im industriellen Kontext vorgenommen werden muss

und es deshalb des Einsatzes empirischer Methoden bedarf, um im industriellen Kontext Evidenz abzuleiten, etwa um Entscheidungen zu unterstützen, welches Prozessmodell in welcher Adaptierung in welchem Kontext am effektivsten funktioniert. Das „Manifest für Agile Softwareentwicklung“ [7] etwa wurde 2001 auf einem Treffen von Praktikern formuliert und von diesen in die Praxis der Softwareentwicklung getragen. Die Aufgabe der Software-Engineering-Forschung ist es, in diesem Zusammenhang die Methoden wissenschaftlich fundiert weiterzuentwickeln und deren praktischen Einsatz kritisch und empirisch fundiert zu hinterfragen und zu bewerten, um sie dadurch abhängig vom Anwendungskontext durch die Bereitstellung von Evidenz zu optimieren.

Aufgrund der Anwendungsorientierung und der durch Software getriebenen Digitalisierung spielen auch Einflussfaktoren und Einflussgruppen für die Software-Engineering-Forschung eine große Rolle. Zu den Einflussfaktoren gehören die Verlässlichkeit („Dependability“), die Nachhaltigkeit („Sustainability“) und die Benutzerfreundlichkeit („Usability“). Verlässlichkeit ist traditionell stark vom Einsatz softwarebasierter Systeme in kritischen Domänen wie der Luftfahrt beeinflusst und umfasst Attribute wie Zuverlässigkeit („Reliability“), Sicherheit („Safety“), Verfügbarkeit („Availability“ und damit letztlich auch Performanz), Wartbarkeit („Maintainability“) und Informationssicherheit („Security“), aber zunehmend auch Nachvollziehbarkeit und Erklärbarkeit, speziell im Kontext moderner datengetriebener Anwendungen. Ausgehend vom ökologisch geprägten schonenden Umgang mit Ressourcen beinhaltet die Nachhaltigkeit auch ethische Aspekte wie die Fairness von Entscheidungsalgorithmen. Usability steht für die Benutzerfreundlichkeit oder Gebrauchstauglichkeit eines softwarebasierten Produkts oder eine Dienstleistung und gewinnt insbesondere mit neuen Benutzerschnittstellen zunehmend an Bedeutung.

Als Einflussgruppen spielen die Wirtschaft, der Staat und die Gesellschaft eine große Rolle, etwa indem sie den rechtlichen Rahmen für die Entwicklung und den Einsatz von Software abstecken, wie zum Beispiel durch die Datenschutzgrundverordnung in Bezug auf die Verarbeitung personenbezogener Daten.

### **Relation des Software Engineering zu ihren Grundlagenwissenschaften**

Als Ingenieurwissenschaft ist das Software Engineering wie andere Ingenieurwissenschaften auch auf die Erkenntnisse von Grundlagenwissenschaften angewiesen. Für die anderen Ingenieurwissenschaften sind im Wesentlichen die Naturwissenschaften und die Mathematik die Grundlagenwissenschaften, im Software Engineering ist die Situation durch den immateriellen und den immanent humanen

Charakter komplexer. Natürlich sind die Informatik, die etwa genetische Algorithmen für das Search-Based Software Engineering oder die damit verwandte künstliche Intelligenz bereitstellt, und das Data Science als Datenwissenschaft wichtige Grundlagendisziplinen für das Software Engineering. Mit der zunehmenden Bedeutung der cyberphysikalischen Systeme sind auch andere technische Wissenschaften wie die Elektrotechnik oder der Maschinenbau bzw. die Physik als deren Grundlage wichtige Grundlagendisziplinen. Wie bereits erwähnt sind aber auch die Wirtschafts- und Sozialwissenschaften wie die Betriebswirtschaftslehre, die Soziologie oder die Psychologie wichtige Grundlagenwissenschaften für die Software-Engineering-Forschung. Wenn demnächst biologische Informationsverarbeitung stärker eine Rolle spielt, wie das heute Human-Brain-Projekte oder Modellierung biologischer Systeme mit Informatikmethoden andeuten, werden auch Biologie und Chemie als Grundlage noch relevanter.

Der enge Bezug des Software Engineering zu Grundlagenwissenschaften ist bereits im Software Engineering Body of Knowledge (SWEBoK) [6] sichtbar, in dem eigene Kapitel Computing Foundations, Mathematical Foundations und Engineering Foundations im Wesentlichen auf die Grundlagenwissenschaften Informatik, Mathematik und Ingenieurwissenschaften verweisen.

In der Software-Engineering-Forschung entstehen dabei bestimmte Fragestellungen, die mithilfe der Grundlagenwissenschaften adressiert werden. Diese stellen Algorithmen oder Theorien bereit, die formal-mathematischer, physikalischer oder sozialwissenschaftlicher Natur sein können, die im Forschungsprozess des Software Engineering in die Entwicklung und Evaluierung von Lösungen einfließen und die als Artefakte und Evidenz wieder in die Anwendungsdomänen zurückfließen können.

Je nach betrachtetem Untersuchungsgegenstand kann Software Engineering daher sehr mathematiknah und analytisch formal sein, zum Beispiel, um formale Modelle oder Programme zu behandeln, aber auch sehr empirisch und experimentell, um etwa spezifische Hypothesen über den menschlichen Faktor bei der Entwicklung und der Nutzung zu untersuchen. Die dritte große Säule des Erkenntnisgewinns, die Simulation, ist im Software Engineering als Test bereits intensiv im Einsatz und wird bei integrierter Qualitätssicherung von Software (beispielsweise durch Architektur- oder Verhaltenssimulation) in einem komplexen System wie etwa einer Smart City auch in anderen Formen noch intensiver eine Rolle spielen. Im Software Engineering fehlen aber immer noch Eigenschaften klassischer Ingenieursdisziplinen, wie der durchgängigen modellbasierten Simulation vor der Realisierung zur frühen Qualitätsbewertung. Abgesehen von einzelnen Ansätzen (wie Software-Architektursimulation) ist allerdings auch unklar, ob eine solche frühe Simulation auf Modellbasis zur Qualitätsbe-

wertung von den klassischen Ingenieursdisziplinen auf das Software Engineering direkt übertragbar ist, da ja Software selbst im Gegensatz zu physischen Artefakten wie Brücken einen immanenten Modellcharakter hat.

Software und damit auch das Software Engineering ist seit jeher eine Integrationsdisziplin. Dies gilt natürlich für Produkte ganz besonders, die typischerweise aus Subsystemen und Komponenten integriert werden. Dies gilt aber auch für Entwicklungsmethoden, in denen je nach Art des Subsystems unterschiedlichste Methoden anderer Informatikteilidisziplinen zum Einsatz kommen. SoftwareingenieurInnen sind daher Generalisten. Demgegenüber gibt es praktisch für jeden Teilaspekt der Software jeweils eigenständige Spezialistenrollen. Dies ist so im Bereich der Netzwerke, der Betriebssysteme, der Datenbanken, der eingebetteten Systeme, der Cloud, des Übersetzerbaus, des Entwickelns von (domänenspezifischen) Modellierungssprachen, der Nutzerinteraktion und natürlich auch der Sprach- und Bilderkennung mit statistischen Methoden oder maschinellem Lernen. Software Engineering greift deshalb nicht nur auf Grundlagendisziplinen wie die Informatik zu, sondern erweitert und bereichert diese auch. Aus diesem Grund sind die Informatik im Speziellen und Wissenschaft im Allgemeinen auch als Anwendungsdomänen in Abb. 1 angeführt.

### Relation des Software Engineering zu ihren Anwendungsdomänen

Die großen Problemstellungen und Herausforderungen der Softwareentwicklung und damit auch der Software-Engineering-Forschung sind heute stark von der Anwendungsdomäne beeinflusst. Der Begriff Anwendungsdomäne kann dabei relativ breit gefasst werden und umfasst klassische Domänen wie Finanzen, Gesundheitswesen, Mobilität wie Automotive oder Avionik, Logistik, Unterhaltung, Handel oder Produktion. Darüber hinaus kann aber auch jede wissenschaftliche Disziplin wie die Informatik oder jede Sozial-, Ingenieurs- oder Naturwissenschaft, in denen heute größere Softwaresysteme im Einsatz sind, als Anwendungsdomäne verstanden werden.

Die Anwendungsdomänen stellen den Kontext, d. h. Daten und Problemstellungen aus einem bestimmten Sachzusammenhang, für die Software-Engineering-Forschung bereit. In der Software-Engineering-Forschung werden Artefakte (etwa Werkzeuge oder Entwicklungsmethoden) und/oder Evidenz, d. h. empirisch oder formal fundierte Einsichten bereitgestellt, um die Problemstellung im Anwendungskontext zufriedenstellend zu adressieren.

Mittlerweile ist klar, dass zwar die Fragestellungen für die Softwareentwicklung in allen Domänen sehr verwandt sind, aber die Antworten häufig sehr unterschiedlich ausfallen müssen. Sichtbar wird dies unter anderem bereits an den sehr heterogenen Technologie-Stacks und den verwendeten

Programmiersprachen. Dementsprechend gibt es für viele Domänen jeweils eigene Ausprägungen des Software Engineering und damit sinnvollerweise auch der Software-Engineering-Forschung. Domänenspezifisches Software Engineering bedeutet immer auch intensive Zusammenarbeit mit den Domänenexperten.

## Wo geht die Reise hin?

### Digitalisierung des Software Engineering und des Systems Engineering

Die aktuell stattfindende Digitalisierung praktisch aller Domänen erfordert domänenspezifische, effektive Verfahren, Software schnell zu erstellen und wiederverwendbar weiterzuentwickeln. Zu viele Domänen sind heute noch getrieben von den dort üblichen Entwicklungsmethoden, die typischerweise in Konflikt zur Softwareentwicklungsmethodik stehen und daher in Projekten regelmäßig Friktionen produzieren. Dies gilt insbesondere für die klassischen Ingenieursdomänen wie Maschinenbau, Bauingenieurwesen oder Elektrotechnik. Solange die Maschine das dominante Element des Produkts ist, muss natürlich der Entwicklungsprozess entlang der Maschine und ihrer Komponenten definiert werden und daher typischerweise geometrische Dekomposition anbieten. Da aber immer mehr die Softwarefunktionalität ansteigt und die Software der Innovationstreiber wird, ist es sinnvoll, über eine Neuverhandlung der Entwicklungsprozesse nachzudenken, die eine funktionale Dekomposition entlang der Softwarefunktionalität stärker in den Fokus nehmen. Die heute üblichen Softwareentwicklungsmethoden, wie etwa das V-Modell oder agile Methoden, sind jedoch auch nicht direkt auf andere Disziplinen übertragbar, obwohl die beobachtbare und durchaus berechtigte Hoffnung besteht, dass eine Generalisierung von Software-Engineering-Methoden für andere Domänen funktionieren dürfte. Es ist eine herausragende Aufgabe des Software Engineering in Kooperation mit den traditionellen Ingenieursdisziplinen, integrierte, ganzheitliche Entwicklungsmethoden und darauf aufbauende Werkzeuge zu entwickeln. Allerdings ist die Entwicklung eines Werkzeugs, das von Praktikern zur Anwendung genommen wird, heute keineswegs trivial. Explizite Werkzeugforschung ist notwendig, um den Bau industriell nutzbarer Werkzeuge überhaupt zu ermöglichen, denn moderne und damit oft auch intelligente Werkzeuge könnten die Softwareentwicklung weit jenseits des heutigen Standes unterstützen. Dies gilt allerdings nur, wenn solche Werkzeuge einerseits eine gewisse Reife besitzen und andererseits durch explizit offene Schnittstellen und Modularisierungstechniken Erweiterbarkeit sowie projektspezifische Anpassbarkeit ermöglichen. Das Systems Engineering und speziell

der Einsatz von Modellierungs- und Simulationstechniken, speziell in der Qualitätssicherung, ist dabei eine wesentliche Herausforderung, um die Zeit zur Marktreife sowie die Entwicklungskosten innovativ weiterentwickelter Produkte deutlich zu verkürzen. Dies ist gerade in Hochlohn-Ländern essenziell, um die Innovationsfähigkeit nicht zu verlieren.

### Das Verhältnis des Software Engineering zu Daten

Natürlich erhalten auch Daten, die immer mehr domänen-spezifische Information in sich tragen, in der Funktionalität von Software eine immer größere Rolle. Bisher wurden Daten zwar als Gegenstand der Softwarefunktionen verarbeitet, sie haben aber nicht selbst wesentlich die Funktionalität bestimmt, wie das zunehmend in modernen datenintensiven Systemen der Fall sein wird. Das ändert sich nun durch Verfahren des maschinellen Lernens. Dadurch entfällt die Möglichkeit, die Software zur Entwicklungszeit vollumfänglich zu analysieren oder zu testen. Deshalb sind Verfahren zur Absicherung selbstlernender, hoch adaptiver Software notwendig, die klären, unter welchen Bedingungen Systeme noch zum Entwurfszeitpunkt analysierbar sind, Verfahren zur Laufzeitabsicherung und Verfahren zur A-posteriori-Fehleranalyse. Darüber hinaus spielen Daten noch eine weitere Rolle als „first class entities“ bei der Modellierung von Privatheitsanforderungen und allgemeiner Zugriffsregelungen.

Die zunehmende Verfügbarkeit von Daten bietet auch für die Software-Engineering-Forschung eine große Chance, um Hypothesen empirisch zu prüfen. Allerdings birgt die beinahe beliebige Verfügbarkeit bestimmter Arten von Daten etwa aus Open Source Repositories und die sehr schwierige Erhebung anderer Datenarten etwa im Industrie 4.0-Kontext im Software Engineering auch Gefahren für den Forschungsprozess. Zu häufig werden Daten etwa aus Software-repositories oder durch Umfragen generiert und publiziert, ohne diese durch eine Theorie, eine genaue Kontextdefinition oder eine Vision zu fundieren, wodurch der Nutzen dieser Arbeiten für die Disziplin des Software Engineering unklar bleibt. Mit Blick auf die Naturwissenschaften bringt der Philosoph Karl R. Popper mit seiner Aussage „Alle Erkenntnis ist theoriegetränkt, auch unsere Beobachtungen“ [8] zum Ausdruck, dass Experimente zur Erhebung von Daten gemäß einer zu prüfenden Hypothese aufgebaut sein sollen und diese Hypothese aus einer Theorie folgt. Eine Datenerhebung ohne zugrundeliegende Theorie mag zwar der initialen Phase eines Forschungsprozesses als explorative Studie durchaus berechtigt sein, um daraus Hypothesen abzuleiten. Diese sind dann aber durch weitere empirische Studien zu evaluieren. Dazu kommt, dass die Verfügbarkeit von vielen Open-Source-Repositories den Blick

darauf verstellt, dass Software nicht nur auf Code-Artefakten beruht.

### Qualität: Verlässlichkeit, Nachvollziehbarkeit, Erklärbarkeit...

Verlässlichkeit (Dependability), also der Grad, in dem darauf vertraut werden kann, dass ein System zugesicherte Leistungen erbringt bzw. zugesicherte Eigenschaften hat, gewinnt in Bezug auf Zuverlässigkeit, Security und Safety von Systemen eine immer größere Bedeutung. Gleichzeitig wird es aber für stark vernetzte, komplexe und autonome Systeme immer schwieriger, Verlässlichkeit und darüber hinaus Nachvollziehbarkeit und Erklärbarkeit von Systemen (etwa auf zur gesellschaftlich notwendigen Klärung von Haftungsfragen bei schädigendem Verhalten autonomer Systeme, was als Nachhaltigkeitsaspekt verstanden werden kann) sicherzustellen. Vielversprechende Ansätze, um dieses Problem zu adressieren, sind Abstraktionstechniken basierend auf Modellen, die helfen, die Komplexität, Vernetztheit, Autonomie und Nachvollziehbarkeit beherrschbar zu machen. Modellbasierte Ansätze sollen dabei sowohl generierende Modelle, beispielsweise für das modellbasierte Testen, als auch prädiktive Modelle, basierend auf maschinellem Lernen, integrieren. Diese Abstraktionstechniken sollten es dann ermöglichen, etwa relevante Eigenschaften des Verhaltens von High-Frequency-Trading-Techniken in der Finanzwirtschaft abzubilden, um das Zusammenwirken von mehreren dieser Algorithmen auf einem offenen Markt mit zugehörigen Analysetechniken zu untersuchen. Eine Herausforderung ist hierbei, wie man zum einen von den konkreten Details der Algorithmen soweit abstrahieren kann, dass Geschäftsgeheimnisse gewahrt werden und die Analyse noch skaliert, aber zum anderen noch aussagekräftige Analyseergebnisse gewonnen werden können, die ein Mensch die Ergebnisse noch nachvollziehen kann. Das Beispiel High-Frequency-Trading aus der Finanzwirtschaft zeigt auch nochmals die Rolle der Domäne.

Anwendungsdomänen entwickeln immer eine Eigendynamik und erfordern jeweils eigene Ausprägungen des Software Engineering und damit sinnvollerweise auch der Software-Engineering-Forschung.

### Konkrete Fragestellungen des Software Engineering

Aus den bisherigen Betrachtungen ergeben sich viele konkrete Fragestellungen, welche die Software-Engineering-Forschung adressieren soll, um das Software Engineering und deren Forschung voranzubringen. Beispiele für konkrete Fragestellungen sind etwa:

- Nachvollziehbarkeit und Erklärbarkeit von Software: Wie können auch bei nichtdeterministischen datenin-

tensiven Softwaresystemen Ergebnisse plausibel erklärt werden?

- Security als ganzheitliches Thema: Wie können Security-Aspekte geeignet im Softwarelebenszyklus berücksichtigt werden? Wie kann etwa eine Brücke aussehen zwischen abstrakten Sicherheitsmodellen mit formalen Nachweisen und realer Software, die in dynamischen und offenen Umgebungen evolviert sind?
- Software Engineering und Nachhaltigkeit: Welche Software-Engineering-Methoden werden benötigt, um Ressourcenmanagement zu steuern und verstehen zu können?
- Forschungsmethodik im Software Engineering: Was können empirische und formale Methoden im Forschungsprozess leisten? Welche Rolle nehmen Kontextfaktoren (insbesondere auch menschliche und organisatorische Faktoren) ein und welche Theorien benötigt das Software Engineering und wie sehen diese aus? Welche Instrumente können Design Science im Software Engineering am besten unterstützen?
- Automatisierung durch Werkzeuge: Das in der Softwareentwicklung noch sehr viel mehr automatisiert werden kann ist unstrittig. Dadurch steigen die Effizienz der EntwicklerInnen und die Qualität der Produkte. Wie kann das schlummernde Potenzial besserer und automatisierter Unterstützung gehoben werden? Welche Werkzeuge sind besonders hilfreich? Wie können die Werkzeuge gestaltet werden, damit die Einstiegshürde möglichst gering ausfällt? Wie können Forschungsprototypen zu kommerziell einsetzbaren Werkzeugen weiterentwickelt werden?
- Qualitätssicherung für datenintensive Systeme: Mit welchen Methoden kann die Qualität von Softwaresystemen, deren Verhalten durch Daten und die Umgebung bestimmt wird und das zur Entwicklungszeit noch nicht feststeht, geeignet sichergestellt werden? Wie können Simulation, modellbasierte Softwareentwicklung, Runtime-Monitoring sowie statische Analyse und dynamisches Testen dabei geeignet integriert werden?
- Software in Systems-of-Systems: Wie geht man in Entwicklungsprozessen damit um, dass es keine zentrale Organisation mehr für Anforderungen und Entwicklungskoordination gibt? Was bedeutet Konsistenz in solchen Systemen und wie kann man sie wiederherstellen? Wie bringt man unterschiedliche Lebenszyklusmodelle und Updategeschwindigkeiten in Einklang? Wie integriert man die lebenslange Verbindung (Messung, Update) zwischen dem produzierten und ausgelieferten Produkt sowie seinem Nutzer und Hersteller?
- Umgang mit immer komplexeren Entwicklungs- und Laufzeitumgebungen: Wie kann man bei steigender Funktionalität EntwicklerInnen das methodische Wissen an die Hand geben, um solche Elemente einzusetzen bzw. zu entwickeln und zu pflegen?

## Herausforderungen des Software Engineering

Das Software Engineering ist keine Natur-, sondern eine Ingenieurwissenschaft mit starkem Fokus auf die vier Säulen aus Abb. 1:

1. Programm und Spezifikation,
2. Mensch und Organisation,
3. Produkt und System sowie
4. Methode und Werkzeug.

Diese Säulen heben das Software Engineering von den traditionellen Ingenieurwissenschaften ab. Gerade wegen der am Entwicklungsprozess beteiligten Menschen treten anstelle von naturwissenschaftlichen Theorien oft Hypothesen, die sich aus Methodenvorschlägen ergeben und insbesondere auch menschliche und organisatorische Kontextfaktoren berücksichtigen. Diese Hypothesen über die Eigenschaften einer neu vorgeschlagenen Methode müssen dann empirisch geprüft werden, etwa durch kontrollierte Experimente oder Fallstudien. Um eine neu vorgeschlagene Methode im Software Engineering sinnvoll anwendbar zu machen und der empirischen Überprüfung zu unterziehen, ist es meistens notwendig, diese ganz oder teilweise in Werkzeugen zu implementieren. Nur so kann der Automatisierungsgrad der Methode, der durch ein Werkzeug ermöglicht wird, in Fallstudien eingebracht und empirisch validiert werden. Werkzeugbau ist daher eine notwendige und wichtige die Forschung begleitende Tätigkeit. Dass so zumindest auch Prototypen für Werkzeuge in der Softwareentwicklung entstehen, ist für die Industrialisierung neuer Software-Engineering-Methoden zumindest hilfreich und müsste auch politisch mehr unterstützt werden.

Es ist eine zentrale Aufgabe des Software Engineering, neue Visionen zu entwickeln und diese in Methoden und Werkzeugen zu gießen und begleitend deren Nützlichkeit, Effektivität und Effizienz empirisch zu evaluieren. Nur so ist es möglich, die tragende Rolle des Software Engineering für Wirtschaft und Gesellschaft im Zeitalter der Digitalisierung zu halten und weiter auszubauen. Gemäß der Aussage des Automobilfabrikanten Henry Fords „Wenn ich meine Kunden gefragt hätte, was sie wünschen, hätten sie gesagt: schnellere Pferde“, ist es notwendig, Visionen in praxistauglichen Methoden und Werkzeugen umzusetzen.

Dabei ist die Methodenweiterentwicklung gerade im Zusammenhang mit dem beschriebenen Wandel der Rolle des Software Engineering und ihrer stärkeren Verzahnung mit anderen Disziplinen (insbesondere dem Systems Engineering) außerordentlich spannend. War bisher die Entwicklung von Software ein Teilschritt im übergeordneten Systems Engineering, so wandelt sich dieses Verhältnis bei der enorm zunehmende Rolle von Software bei fast jeder technischen Innovation. Diese zunehmend zentrale Rolle der Software wird sich aus Sicht der Autoren auch in den

Methoden zur Systementwicklung niederschlagen – diese werden softwarezentrierter. Gemäß dieser neuen Rolle von Software bei Innovationen wird das Produkt durch seine Software getrieben, die elektrischen oder mechanischen Komponenten sind entweder Commodity oder werden entwickelt entsprechend der Anforderungen aus der Software. Dies bietet eine einzigartige Chance für das Software Engineering, als wichtiger Treiber im Systems Engineering aufzutreten. Diese Chance kann man nur nutzen, wenn sich Software-Engineering-Forscher ihrer Rolle als Ingenieurswissenschaftler und Innovatoren bewusst sind, deren Forschung Visionen für neuen Methoden hervorbringt.

**Danksagung** Unser herzlichster Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen der Softwaretechnik und angrenzender Fachgebiete, deren Einschätzungen und Kommentare unter anderem auf den letzten Tagungen des Fachbereichs hier eingeflossen sind. Wir danken insbesondere (in alphabetischer Reihenfolge) Sven Apel, Jürgen Börstler, Michael Goedicke, Lars Grunske, Willi Hasselbring, Udo Kelter, Stefan Leue, Florian Matthes, Barbara Paech, Ina Schäfer, Klaus Schmid, Matthias Tichy, Walter Tichy und Stefan Wagner.

**Funding** Open access funding provided by University of Innsbruck and Medical University of Innsbruck.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Literatur

1. Erdogmus H et al (2018) 50 years of software engineering. *IEEE Softw* 35(5):20–24. <https://doi.org/10.1109/MS.2018.3571240>
2. Booch G (2018) The history of software engineering. *IEEE Softw* 35(5):108–114. <https://doi.org/10.1109/MS.2018.3571234>
3. Basili V et al (2018) Software engineering research and industry. *IEEE Softw* 35(5):44–49. <https://doi.org/10.1109/MS.2018.290110216>
4. Broy M (2018) Yesterday, today, and tomorrow. *IEEE Softw* 35(5):38–43. <https://doi.org/10.1109/MS.2018.290111138>
5. IEEE (1990) IEEE standard glossary of software engineering terminology
6. Bourque P, Fairley R (2014) SWEBOK V3.0 guide to the software engineering body of knowledge
7. Beck K, Beedle M, van Bennekum A, Cockburn A, Cunningham W, Fowler M, Grenning J, Highsmith J, Hunt A, Jeffries R, Kern J, Marick B, Martin R, Mellor S, Schwaber K, Sutherland J, Thomas D (2002) Agile manifest. <https://agilemanifesto.org/iso/de/manifesto.html>. Zugegriffen: 3. November 2020
8. Popper KR (1974) Objektive Erkenntnis. Ein evolutionärer Entwurf, 2. Aufl.