

Roadmap Complex Systems

Komplexe IKT-Lösungen beherrschen

Endbericht

Wien, Juli 2014

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundes (BMVIT) vertreten durch die Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG durchgeführt.

VERFASSER DES BERICHTS:

Erich Prem (eutema GmbH)

Sascha Ruhland (KMU Forschung Austria)

UNTER MITWIRKUNG VON:

Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Pree (Universität Salzburg)

Dipl.Ing. Christian Wögerer (Profactor GmbH)

Die vorliegende Studie wurde nach allen Maßstäben der Sorgfalt erstellt.

eutema GmbH und KMU Forschung Austria übernehmen jedoch keine Haftung für Schäden oder Folgeschäden, die auf diese Studie oder auf mögliche fehlerhafte Angaben zurückgehen.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Art von Nachdruck, Vervielfältigung, Verbreitung, Wiedergabe, Übersetzung oder Einspeicherung und Verwendung in Datenverarbeitungssystemen, und sei es auch nur auszugsweise, ist nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Auftraggebers der Studie gestattet.

Inhalt

Zusammenfassung.....	1
Summary.....	5
1. Einleitung	9
2. Das Themenfeld	10
2.1. Motivation	10
2.2. Charakterisierung	11
2.3. Komplexität von Systemen	13
Unnötige Komplexität in IKT-Systemen	15
2.4. Relevante Forschungsgebiete.....	16
2.5. Spannungsfeld Innovation – Wissenschaft	18
2.6. Internationale Perspektive	19
EU-Programme	19
US-Initiativen	20
Deutschland	21
3. Anwendungsfelder.....	22
Fertigung.....	22
Kommunikation	23
Fahrzeugbau.....	23
Energietechnik	24
Robotersysteme	25
Transport	26
Weltraumtechnik	27
Medizin	27
Automatisierung.....	28
Sicheres Leben im Alter	29
4. Situation in Österreich	30
4.1. Wirtschaftsstruktur.....	30
4.2. IKT Wertschöpfung.....	32
4.3. Wissenschaftlich-technisches Know-how in Österreich.....	33
4.3.1. Frühere Studien	33

4.3.2.	Auswahl relevanter wissenschaftlicher Forschungsgruppen	34
5.	Technologie-Roadmap	38
5.1.	Aktuelle Trends im Bereich Computing und sozio-ökonomische Trends	38
5.2.	Österreichische Roadmap „Komplexe IKT-Lösungen beherrschen“	42
5.2.1.	Autonome Systeme	43
5.2.2.	Adaptive Systeme	45
5.2.3.	Rigoroser Systementwurf	45
5.2.4.	Verlässlichkeit und Stabilität	46
5.2.5.	Systemevolution	47
5.2.6.	Plattformen, Standardisierung, Regulierung und Infrastruktur	47
5.2.7.	Gesamtdarstellung	48
6.	Empfehlungen	51
6.1.	Strategische Ebene	52
6.1.	Operative Ebene	54
7.	Anhang	57
7.1.	Literaturverzeichnis	57
7.2.	Explorative und validierende Interviews	58
7.3.	Workshops	60
7.4.	Verzeichnis der ExpertInnen	61

Zusammenfassung

IKT-Systeme finden sich nicht nur im Alltag in Mobiltelefonen, Unterhaltungsgeräten oder im Büro, sie steuern zunehmend auch unsere Infrastruktur, unterstützen die Lenkerinnen von Kraftfahrzeugen, überwachen Energienetze und lenken Flugzeuge. Die zunehmende Komplexität dieser Systeme stellt die IKT vor technische und grundlegende wissenschaftliche Probleme, die direkte wirtschaftliche sowie soziale Auswirkungen haben. Vor diesem Hintergrund stellt die vorliegende Roadmap den Akteuren der österreichischen FTI-Politik, d.h. insbesondere der FFG sowie dem BMVIT, eine Basis für die FTI-politische Gestaltung des Themenfelds der komplexen IKT-Systeme zur Verfügung.

Die genaue Definition und Eingrenzung komplexer IKT-Systeme ist schwierig und auch innerhalb der Wissenschaften umstritten. Komplexität liegt vor, wenn die Eigenschaften bzw. das Verhalten eines Systems nicht einfach aus den Eigenschaften bzw. Verhalten der Systemteile vorhergesagt werden kann. Es gibt einen massiven Trend zur Vernetzung verschiedener (d.h. heterogener) Systeme. Dies führt unter anderem zu schwer zu beherrschender Gesamtdynamik. Dennoch ist in vielen Anwendungsbereichen die Integration heterogener Komponenten nicht mehr wegzudenken und der Trend zu zunehmend komplexen „Systemen von Systemen“ unumkehrbar. Die folgenden informatischen Forschungsgebiete sind als zentral für die Weiterentwicklung komplexer IKT-Lösungen anzusehen: Echtzeitsysteme, adaptive Systeme, autonome Systeme und rigorose Entwurfsmethoden.

Komplexe IKT-Systeme finden sich in zahlreichen, äußerst unterschiedlichen Lebens-, Industrie- und Wirtschaftsbereichen. Sie leisten einen wichtigen Beitrag zu Erhaltung und zum Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit und Exporttätigkeit österreichischer Hochtechnologie-Unternehmen aber auch zur Dynamisierung traditioneller Branchen. Aufgrund der großen Bedeutung vor allem des Maschinen- und Anlagenbaus für die österreichische Volkswirtschaft bieten insbesondere komplexe IKT-Systeme eine Möglichkeit, Österreich mittelfristig und dauerhaft als Technologiegeber zu etablieren bzw. diese Position zu stärken. Darüber hinaus stellen sie technologische Lösungen für gesellschaftliche Herausforderungen in den Bereichen alternde Gesellschaft und Gesundheit, Mobilität, Erneuerung der Energiesysteme etc. bereit. Vor allem vor dem Hintergrund anhaltender sozioökonomischer Trends wie Urbanisierung, Mobilität, Energiewende usw. werden komplexe IKT-Systeme mehr und mehr zu einem globalen Fortschrittsstreiber und *Enabler*.

Die zentralen Forschungsfelder und (technologischen) Meilensteine einer Roadmap komplexer IKT Systeme für Österreich, d.h. den existierenden Forschungs- und Industrieschwerpunkten entsprechend, stellen sich wie folgt dar:

- Autonome Systeme
 - autonome, d.h. selbstgesteuerte Systeme (selbstgesteuerte Fahrzeuge, aber auch in Teilaspekten wie z.B. Aufbauten und Zubehör)
 - selbstgesteuerte, mobile Robotersysteme, Produktionsrobotersysteme, kollaborative Robotersysteme
 - Systeme, die vorausschauend gewartet werden können bzw. die autonom ihre eigenen Wartungsbedarf überwachen (*predictive maintenance*)
 - autonome Korrektur von Drift, Kalibrierung oder allgemeiner Selbstheilung (z.B. als Reaktion auf Abnutzung oder Teilausfall von Komponenten)
 - fortgeschrittene Serviceroboter
 - digitale Assistenten
 - *advanced mixed signal devices*
 - *energy-efficient processors and memories*
 - *autonomic data centres*
 - *self-programming software*
- Adaptive Systeme
 - natürliche Mensch/Maschine-Schnittstellen
 - immersive (also sensorisch reichhaltige) bzw. intelligenten Benutzerschnittstellen
 - adaptive Kontrollsysteme, auch als Vorstufe zu komplexeren, intelligenten und vernetzten *cyber-physical systems*
 - smart networked *cyber-physical systems* und massiv parallele *cyber-physical systems*
- Rigoroser Systementwurf
 - kontinuierliche Verifikation
 - effiziente Nutzung von Multicore-Systemen
 - Zertifizierung von Teilsystemen sowie die Zusammenführung von teilsertifizierten Systemen zu Gesamtsystemen mit zertifizierbaren Eigenschaften

- Modellierung und Simulation (vor allem Echtzeitfähigkeit, Nutzung von Cloud-Ressourcen sowie deren Kombination und neue Algorithmen für die Echtzeitinteraktion)
- Verlässlichkeit und Stabilität
 - speziellen Methoden und Werkzeuge im Bereich des *security testing*
 - Beherrschung mehrerer Security-Ebenen
 - Systeme, die gegen Cyber-Attacken geschützt sind
 - Anbindung an die Cloud für Echtzeitsysteme
 - implantierbare und tragbare Rechensysteme
- Systemevolution
 - Wartung von Altsystemen
 - intelligente Sensoren (zunehmende Intelligenz, d.h. Anpassungsfähigkeit, Verarbeitungskomplexität etc. der Sensorsysteme)
 - offene Schnittstellen

Neben diesen technologischen Forschungsfeldern und Meilensteinen wurden einige Handlungsfelder mit Querschnittscharakter identifiziert, die nichtsdestotrotz zentral für die Unterstützung der österreichischen Unternehmen im Bereich komplexer IKT-Lösungen sind: z.B. die Entwicklung und Etablierung von Technologieplattformen (etwa im Bereich *home automation* oder autonome Fahrzeuge), die Berücksichtigung technologischer Trends und Entwicklungsmeilensteine in Standardisierung, Regulierung sowie die Schaffung von entsprechender Forschungsinfrastruktur.

Die Erreichung dieser Meilensteine und die Generierung damit verbundenen Wettbewerbsfähigkeit bzw. -vorteile bedürfen zusätzlich zur Bereitstellung von entsprechend Fördermitteln im IKT der Zukunft Programm weiterer (nicht nur) FTI-politischer Maßnahmen. Insbesondere die Stärkung der Forschergruppen an Hochschulen und Forschungseinrichtungen bezüglich Personal- und Mittelausstattung ist eine wesentliche Voraussetzung, Österreich an den möglichen Gewinnen technologischen Fortschritts im Bereich komplexer IKT Systeme langfristig zu beteiligen. Des Weiteren sollte die Rolle des Staates als Nachfrager stärker in den Fokus einer entsprechenden Innovationspolitik gerückt werden, auch da viele Anwendungsbereiche komplexer IKT Lösungen direkt die öffentliche Verwaltung oder andere staatliche Leistungsbereiche selbst innovativer machen würden.

Die bestehende Förderlandschaft wird im Allgemeinen als sehr umfassend und passfähig beurteilt. Gleichzeitig könnte eine Reduktion der Anzahl von Programmen und deren Komplexität den Zugang für Forschungseinrichtungen und Unternehmen erleichtern und somit den Wirkungsbereich der staatlichen Förderung erweitern. Dazu zählt auch die Einrichtung gemeinsamer Ausschreibungen von verschiedenen Programmen wie etwa IKT der Zukunft und Produktion/Haus/Energie der Zukunft, die den Querschnittscharakter von IKT im Allgemeinen und komplexer IKT Lösungen (insbesondere im Bereich Produktion) ausnutzen.

Um zu verhindern, dass top-down Vorgaben von Forschungsthemen die Attraktivität von Fördermaßnahmen schmälern, sollte weiterhin die Möglichkeit der Einrichtung von österreichischen Technologieplattformen etwa als *public private partnerships* geprüft werden. Diese könnten mehrjährige, spezifisch österreichische Forschungs- und Entwicklungsstrategien entwickeln und entsprechend als Leitlinien oder sogar in Form von Ausschreibungen auf die Förderprogramme anwenden. Auch die Einrichtung von so genannten Leuchtturmprojekten (z.B. im Bereich *smart cities* oder autonome Fahrzeuge) könnte durch diese Plattform(en) geprüft und gegebenenfalls konzipiert werden. Ergänzend sollten die Einrichtung einer interdisziplinären Begleitforschung geprüft werden, die etwa gesellschaftliche Herausforderungen näher analysiert oder Akzeptanzprobleme (und damit Hemmnisse für die nationale Nachfrage) untersucht.

Der vorliegende Bericht gliedert sich in 5 Hauptkapitel. Kapitel 2 und 3 beschreiben einerseits das Themenfeld komplexe IKT-Lösungen und andererseits entsprechende Anwendungsfelder, soweit sie von österreichischen Unternehmen adressiert werden. Kapitel 4 bildet die allgemeine Grundlage, auf der die eigentliche Roadmap zu lokalisieren ist, ab, d.h. den spezifisch österreichischen Kontext hinsichtlich Bedeutung zentraler, forschungsintensiver Wirtschaftsbereiche, existierender IKT-Wertschöpfungsnetzwerke und relevanter Forschergruppen. In Kapitel 5 werden die zentralen Themen und Meilensteine der Roadmap beschrieben. Daran anschließend werden in Kapitel 6 Empfehlungen auf strategischer und operativer Ebene diskutiert, deren Umsetzung als wesentlich für die optimierte Unterstützung österreichischer Unternehmen im Bereich komplexer IKT-Systeme gilt.

Summary

ICT systems can be found not only in everyday life in mobile phones, entertainment equipment or in the office, they increasingly control our infrastructure, support the drivers of motor vehicles, monitor energy networks and control aircraft. The increasing complexity of these systems creates technical and fundamental problems for ICT that have direct economic and social impacts. Against this background, the present roadmap provides the actors of the Austrian RTI policy, i.e. in particular the Austrian Research Promotion Agency (FFG) and the Federal Ministry of Transport, Innovation and Technology (BMVIT), with a foundation for RTI policy-making in the specific field of complex ICT systems.

The exact definition and classification of complex IT systems is difficult and even within the sciences controversial. Complexity occurs when the properties or behavior of a system cannot be easily predicted from the properties or behavior of the system components. There is a massive trend for networking different (i.e., heterogeneous) systems. Among other things this leads to difficulties in controlling the overall system dynamics. Nevertheless, in many applications the integration of heterogeneous components has become indispensable and the trend towards increasingly complex "systems of systems" is irreversible. The following areas of computer science research are to be regarded as central to the development of complex ICT solutions: real-time systems, adaptive systems, autonomous systems and rigorous design methods (rigorous systems engineering).

Complex ICT systems are found in many, very different areas of life, and of industrial and economic sectors. They make an important contribution to maintaining and increasing the competitiveness and export performance of Austrian high-tech companies. They also contribute to creating new dynamics in traditional industries. Due to the great importance especially of machine and plant construction for the Austrian economy, complex ICT systems provide a way to establish Austria in the medium term and permanently as a technology provider or to strengthen this position. In addition, they provide technological solutions to societal challenges in the areas of aging society and health, mobility, renewing the energy systems etc. Especially against the background of ongoing socio-economic trends such as urbanization, mobility, energy policy, etc. complex ICT systems are becoming more and more a global progress driver and enabler.

The central research fields and (technological) milestones of a roadmap for complex ICT systems for Austria, i.e. in line with the existing research and industry priorities, are as follows:

- Autonomous systems

- Autonomous, i.e. self-driven systems (self-driving vehicles, but also in partial aspects such as machinery and equipment)
- Self-guided, mobile robotic systems, production robots, collaborative robots
- Systems, that can be maintained predictively, i.e. that can control their own maintenance needs autonomously (*predictive maintenance*)
- Autonomous correction of drift, calibration or general self-healing (e.g. in reaction to abrasion or partial failure of components)
- Advanced service robots
- digital assistants
- *advanced mixed signal devices*
- *energy-efficient processors and memories*
- *autonomic data centres*
- *self-programming software*
- Adaptive systems
 - Natural man/machine interfaces
 - immersive (i.e. sensory rich) or smart user interfaces
 - adaptive control systems, also as a step to more complex, smart and networked *cyber-physical systems*
 - smart networked *cyber-physical systems* and massively parallel *cyber-physical systems*
- rigorous system engineering
 - continuous verification
 - efficient utilization of multicore systems
 - certification of components and combining of partially certified systems to complete systems with certifiable properties
 - modelling and simulation (in particular real-time properties, utilization of cloud resources and their combination and new algorithms for real-time interaction)
- reliability and stability

- specific methods and tools for *security testing*
- mastery of several layers of security
- cyber-attack proof systems
- cloud connectivity for real-time systems
- implantable and portable computing devices
- system evolution
 - maintenance of legacy systems
 - smart sensors (increasing intelligence, i.e. adaptability, computing complexity etc. of the sensor systems)
 - open interfaces

Next to these technological and research fields, the study also identified fields of action that are interdisciplinary. These are nevertheless crucial for the support of Austrian companies in the field of complex systems, e.g. the development and implementation of technology platforms, the consideration of technological trends and development milestones in standards and regulation as well as the creation and maintenance of research infrastructure.

The achievement of these milestones and the associated advance in competitiveness require (not only) RTI policy measures in addition to the provision of appropriate funding in future ICT programmes. In particular, the strengthening of research groups at universities and research institutions concerning personnel and other resources is essential for sustainably harvesting the possible gains of technological progress in the field of complex ICT systems for Austria. Furthermore, it is necessary to focus more on the role of the state as a consumer in innovation policy; in particular as many areas of application of complex ICT solutions would directly make the public administration or other state services more innovative.

The existing funding landscape is generally judged to be very wide and stable base. At the same time a reduction in the number of programs and their complexity could facilitate access for research institutions and enterprises, thus extending the impact of government funding. This includes the establishment of joint tenders for various programs such as ICT and production/building/energy programmes utilizing the cross-cutting nature of ICT in general and complex ICT solutions (especially in production).

To prevent top-down targets of research topics from reducing the attractiveness of funding measures, setting up of Austrian technology platforms such as public-private partnerships should be examined. These initiatives could develop multi-

annual, specifically Austrian research and development strategies, and apply them accordingly as guidelines or even in the form of invitations to tender to the funding programs. The establishment of so-called lighthouse projects (e.g. in the area of smart cities or autonomous vehicles) could be examined and potentially implemented through these platforms. In addition, the establishment of an interdisciplinary accompanying research should be studied to investigate societal challenges or acceptance problems (and thus barriers for national demand).

The report at hand is structured into 5 main chapters. Chapters 2 and 3 describe on the one hand the field of complex systems and applications already in development and available to the market by Austrian companies on the other. Chapter 4 analyses the background for the roadmap itself by discussing the specific Austrian context of complex systems, i.e. analyzing the importance of crucial, research intensive economic sectors, existing ICT-related value chains and through the identification and description of especially relevant groups of researchers. In chapter 5, the study describes the complex systems roadmap and its main components and milestones. Building on the roadmap, chapter 6 discusses recommendations on both the strategic and operational level whose implementation are considered vital for the optimization of companies engaged in the field of complex systems.

1. Einleitung

Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) stellen einerseits einen eigenständigen hochdynamischen und relevanten Wirtschaftssektor mit starkem Wachstumspotenzial und intensivem Gründungsgeschehen dar und tragen andererseits in vielfacher Hinsicht (als Anwendungen, Schlüsselkomponenten, Systemintegratoren, „Enabler“ etc.) wesentlich zu Innovationen in anderen Technologie- und Industriesektoren bei. IKT-Systeme finden sich nicht nur im Alltag in Mobiltelefonen, Unterhaltungsgeräten oder im Büro, sie steuern zunehmend auch unsere Infrastruktur, unterstützen die Lenker von Kraftfahrzeugen, überwachen Energienetze und lenken Flugzeuge. Diese letztgenannten technischen Anwendungen stellen große Herausforderungen an die Entwickler, da sie sicher funktionieren müssen.

Die zunehmende Komplexität dieser Systeme stellt die IKT vor technische und grundlegende wissenschaftliche Probleme, die direkte wirtschaftliche sowie soziale Auswirkungen haben. Insbesondere aufgrund der sich verändernden Ausrichtung des FTI-politischen Systems hin zu einer stärkeren Betonung von Innovation, dem Bestreben der FTI-Strategie der österreichischen Bundesregierung folgend, Österreich von einem *Innovationsfolger* zum *Innovationsführer* zu machen, wird es zunehmend essenziell, FTI-politische Maßnahmen planvoll entlang von Strategien zu gestalten, die technologische Entwicklungen und gesellschaftliche Herausforderungen kombinieren.

Vor diesem Hintergrund soll die vorliegende Roadmap den Akteuren der österreichischen FTI-Politik, d.h. insbesondere der FFG sowie dem BMVIT, eine Basis für die FTI-politische Gestaltung des Themenfelds der komplexen IKT-Systeme zur Verfügung stellen. Ziel des Projektes ist es auch, den Auftraggebern auf Basis der zu entwickelnden österreichisch-spezifischen Technologie-Roadmap handlungsleitende Empfehlungen für das Design und die Implementierung von FTI-politischen Fördermaßnahmen (etwa spezielle Projektformen wie so genannte Leuchtturmprojekte) innerhalb des aktuellen Förderprogramms „IKT der Zukunft“ und darüber hinaus zur Verfügung zu stellen.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden zunächst die zentralen Elemente der Technologieentwicklung im Bereich der komplexen Systeme auf Basis einer intensiven Literaturrecherche ermittelt und anschließend systematisiert. Zu Komplettierung der Roadmap, weiteren Entwicklung der Technologiefelder, Identifikation der beteiligten Wertschöpfungsketten sowie Erarbeitung möglicher Anwendungsszenarien wurde ein interaktiver Prozess der Erarbeitung und Validierung implementiert. Dies schloss Interviews mit in- und ausländischen Expertinnen sowie drei Workshops mit Akteuren aus Österreich ein.

2. Das Themenfeld

2.1. Motivation

Die zunehmende Komplexität der Systeme stellt die IKT vor technische und grundlegende wissenschaftliche Probleme, die direkte wirtschaftliche sowie soziale Auswirkungen haben. Bereits vor fast 20 Jahren verdeutlichte die Explosion der Ariane-5 Rakete im Jahre 1996 drastisch die Konsequenzen von Softwarefehlern. Der Plan, mit der Weiterentwicklung der Ariane-4 die Führung im Weltraumfrachtgeschäft zu erlangen, erlitt mit diesem Schadensfall im Ausmaß von über 500 Millionen US Dollar einen schweren Rückschlag. Grund für die Explosion war ein Zahlen-Konvertierungsfehler, dessen Bedeutung und Konsequenz aufgrund der Komplexität des Systems von den Ingenieuren nicht vorhergesehen wurde. Derartige katastrophale Konsequenzen numerischer Rechenfehler sind nicht selten.

Jüngere Beispiele sind ein Flug der australischen Fluglinie Qantas, bei der ein Computerfehler bzw. eine fehlerhafte Messdaten-Interpretation für 115 Verletzte an Bord verantwortlich sein dürfte.



Fehlerhafte Computerprogramme waren im Jahr 2013 auch für einen Verlust

von US\$ 440 Mio. der Knight Capital verantwortlich. Innerhalb einer Stunde haben fehlerhafte Kauf/Verkauf-Entscheidungen eines Handelssystems zu hohen Schäden für zahlreiche Anteilseigner geführt.

Was auf den ersten Blick wie einfache Programmierfehler wirkt, wurzelt jedoch häufig tief in fundamentalen Problemen der Informatik, für die es heute oft nur unzureichende bzw. unbefriedigende Lösungen gibt. Systeme, die in der Lage sind, auch bei Störungen und Veränderungen der Umwelt ihre grundlegende Organisationsweise zu erhalten, anstatt in einen qualitativ anderen Systemzustand überzugehen bieten eine bedeutende Perspektive für zukünftige technologische Systeme.

Abbildung 1 Ariane 5 Rakete vor dem Start und Explosion der Rakete durch Auslösung der Selbstzerstörung. Quelle: <http://estb.msn.com>

2.2. Charakterisierung

Mit steigender Komplexität von Computersystemen steigt auch die Herausforderung, ihre Korrektheit (z.B. durch strikte Systementwürfe) sicherzustellen. In solchen Systemen können durch die Interaktion zwischen Komponenten auf Systemebene neue, emergente Eigenschaften entstehen, die auf der Ebene der individuellen Komponenten nicht vorhanden sind. Ein einfaches Beispiel sind Speicherlaufwerke, wie sie in großer Zahl in Serverfarmen stehen. Prinzipiell sollten die Laufwerke unabhängig voneinander funktionieren. Laufwerke stehen jedoch oft in einem gemeinsamen Regal und können unter Umständen durch Vibrationen einander störend beeinflussen.¹ Andere bekannte Beispiele finden sich in Kommunikationsproblemen durch einander störende Komponenten eines Ethernet-Systems. Derartige Phänomene zeichnen sich oft dadurch aus, dass sie erst nach Inbetriebnahme des Systems sichtbar werden. Weder eine Simulation noch eine Analyse der einzelnen Komponenten deutet auf mögliche Probleme hin.

Dies macht die gemeinsame Betrachtung von IKT-System und Umwelt als Gesamtsystem notwendig, weil sich emergente Eigenschaften oft durch das Zusammenspiel und die Interaktion von IKT-Komponenten und Komponenten der Umwelt ergeben.

Die bereits genannten Herausforderungen stellen sich in der Praxis besonders häufig dort, wo verschiedene Systeme zu Systemen zusammengefasst werden, d.h. in der Systemintegration. Es gibt einen massiven Trend zur Vernetzung verschiedener (d.h. heterogener) Systeme. Dies führt unter anderem zu undeutlichen (Sub-)Systemgrenzen, zu

unklaren Verantwortlichkeiten in Gesamtsystemen, Fehlerfortpflanzung und schwer zu beherrschender Gesamtsystemdynamik. Dennoch ist in vielen Anwendungsbereichen – von Freizeit bis Industrie – die Integration heterogener Komponenten nicht mehr wegzudenken und der Trend zu zunehmend komplexen „Systemen von Systemen“ unumkehrbar.

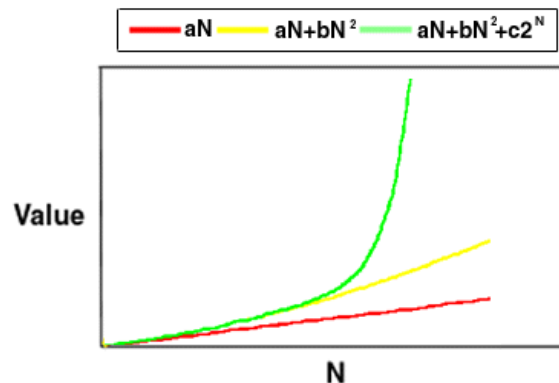


Abbildung 2 In gruppenbildenden Netzen steigt die Anzahl der Verbindungen – und damit der Wert des Netzes – exponentiell. (www.reed.com)

¹ Jeffrey C. Mogul, *Emergent (Mis)behavior vs. Complex Software Systems*. HP Laboratories, Palo Alto. <http://www.hpl.hp.com/techreports/2006/HPL-2006-2.pdf>

Die angesprochene Vernetzung von Teilsystemen ist ein besonderer Komplexitätstreiber. Dies gilt zum einen ganz praktisch, weil häufig viele verschiedene Systeme mit unterschiedlichsten Schnittstellen integriert werden müssen. Dazu kommt aber noch die Vernetzung mit dem Internet und mit der menschlichen Benutzerin. Es ist bekannt, dass die Anzahl der Verbindungen zwischen allen Komponenten eines Systems quadratisch mit der Anzahl der Komponenten steigen. In gruppenbildenden Netzwerken (z.B. auch in vielen sozialen Netzen), kommt es aber auch zur Kommunikation zwischen Systemgruppen (d.h. unterschiedlich organisierten Systemen von Teilsystemen). Die Anzahl der möglichen Verbindungen steigt hier exponentiell. In vielen Anwendungen (z.B. Telekommunikation, soziale Netze) steigt der Wert eines Netzes mit der Anzahl der (möglichen) Verbindungen.²

Die entsprechenden (technologischen) Herausforderungen im Themenbereich komplexer Systeme sind u.a.:

- rapide wachsende Vernetzung der IKT-Systeme in Verbindung mit immer kürzeren Entwicklungszyklen (Hardware und Software)
- Anforderungen und Aufgabenstellungen an vernetzte IKT-Systeme
- IKT-Systeme für spezifische und eng abgegrenzte Einsatzzwecke stoßen an ihre Grenzen
- Systeme, die in der Lage sind, sich an wechselnde Umgebungen anzupassen und weiterzuentwickeln
- Korrektheit adaptiver Systeme
- Erfüllung nicht-funktionaler Anforderungen wie Echtzeitfähigkeit und Fehlertoleranz
- Erforschung neuartiger Methoden und Tools zu Fehlertoleranz, Verifikation, Validierung, formaler Modellierung und Korrektheit
- durch Vernetzung und Interaktion adaptiver und autonomer Systeme untereinander entstehen neue Eigenschaften im Gesamtsystem
- biologische und mathematische Modelle und Simulationen, um neue Erkenntnisse zu gewinnen

² Nach dem Gesetz von Metcalfe

2.3. Komplexität von Systemen

Die genaue Definition und Eingrenzung komplexer IKT-Systeme ist schwierig und auch innerhalb der Wissenschaften umstritten. So spricht man z.B. auch in der Biologie von komplexen Systemen. Dazu kommt, dass es auch innerhalb der IT Systeme gibt, die oft „komplex“ genannt werden – obwohl sie nicht ganz der hier gewählten Charakterisierung entsprechen können. Dies gilt für umfangreiche Bankenapplikationen ebenso wie für mathematische Software, die über Jahrzehnte entwickelt wurde. Diese Art von Software lässt sich allerdings besser mit dem Begriff „kompliziert“ beschreiben, was im Folgenden näher ausgeführt wird.³

„Komplex“ lässt sich am besten mit „vielschichtig“ umschreiben, vor allem, um es von „kompliziert“ abzugrenzen. Ein kompliziertes Problem ist schwer zu überblicken, kann aber letztlich gelöst werden – oft durch Zerlegung in Teilprobleme. Ein komplexes Problem entzieht sich dieser Zerlegung. Komplexität liegt vor, wenn die Eigenschaften bzw. das Verhalten eines Systems nicht einfach aus den Eigenschaften bzw. Verhalten der Systemteile vorhergesagt werden kann. Komplexität lässt sich in der Anzahl der unterschiedlichen nicht-trivialen Beschreibungen eines Systems messen. Je mehr unterschiedliche Sichten auf ein System möglich sind, desto größer ist seine inhärente Komplexität.

Komplexe Systeme weisen zumindest mehrere der folgenden Eigenschaften auf:

- Sie bestehen aus Komponenten, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Wechselwirkungen zwischen Systemteilen wirken sich auf das Gesamtsystem aus.
- Sie weisen nichtlineare Wirkungszusammenhänge auf.
- Das Gesamtsystem zeigt emergente Eigenschaften, d.h. Phänomene die sich nicht auf Komponentenebene beschreiben lassen, sondern für die ein Wechsel der Beschreibungsebene auf das Gesamtsystem nötig ist.
- Sie sind häufig offene Systeme, die mit ihrer Systemumwelt in Kontakt stehen.
- Ihr Verhalten ist pfadabhängig, d.h. das Verhalten hängt nicht nur vom Zustand, sondern auch von der Geschichte des Systems ab.

Übertragen auf IKT-Systeme lassen sich die folgenden Treiber von Komplexität identifizieren:

³ Die Unterscheidung komplex-kompliziert hat vor allem in der Systemtheorie eine längere Tradition. Wichtige Beiträge stammen u.a. von Autoren wie J.L. Casti oder P. Cilliers. Vgl. z.B. Casti (1986) *On system complexity: identification, measurement and management*. In J. L. Casti & A. Karlquist (Eds.), *Complexity, Language and Life: Mathematical Approaches* (pp. 146-173). Berlin: Springer-Verlag.

- Interaktion mit der physischen Welt (cyber-physical systems)
- Dynamische Interaktion mit Menschen (Mensch/Maschine-Schnittstelle)
- Zugriff auf und Interaktion mit dem Internet
- Echtzeitanforderungen
- Sicherheits- und Verlässlichkeitsanforderungen
- Vernetzungsgrad bzw. Verteilung der Systemkomponenten
- Hohe Dynamik der Umweltinteraktion
- Anzahl unterschiedlicher Systemteile
- Heterogenität der Systemkomponenten

Vor allem die beiden letztgenannten Aspekte führen zum Begriff des „Systemsystems“, oder Englisch „System-of-systems“. In solchen (oft verteilten) Systemen kommt es zu Delegation von Aufgaben vom eigentlichen Problemsteller an andere autonome Systemteile, sog. Konstituentensysteme. Systems-of-systems sind häufig geographisch verteilt, sie bestehen aus Komponenten heterogener Technologie, die unter unterschiedlicher Management-Kontrolle operieren.

Beispiele für typische komplexe IKT-Systeme:

- Autonome Roboter
- Steuerungen für Produktions- und Fertigungsanlagen
- Smart Grid Überwachungs- und Regelungssysteme
- Intelligente Transportsysteme

Vor allem die letzten drei Beispiele erfüllen auch häufig den Charakter eines Systems-of-systems, in dem unterschiedliche Komponenten verschiedener Hersteller zusammenarbeiten bzw. kontrolliert werden müssen.

Im österreichischen Kontext verstehen wir das Thema allerdings auch stark im Sinne der Weiterführung jahrelanger thematischer F&E-Schwerpunkte im Bereich von „Embedded Systems“. ⁴ Diese Interpretation orientiert sich auch an österreichischen Stärkefeldern in Wissenschaft und Industrie.

⁴ Insbesondere im IKT-F&E-Programm „FIT-IT“ und der Programmlinie „Embedded Systems“.

Unnötige Komplexität in IKT-Systemen

Ein bisher wenig beachtetes Phänomen von IKT-Systemen ist die Tatsache, dass unnötige Kompliziertheit oder auch Komplexität enthalten ist. Diese Art von Komplexität entsteht sowohl bei Systemen, die über lange Zeit weiterentwickelt worden sind als auch bei neuen Systemen. Die Ursachen dafür sind vermutlich mannigfaltig, obwohl es dazu wenig wissenschaftlich fundierte Analysen gibt. Eine mögliche Ursache besteht darin, dass sich in den letzten Jahrzehnten die IKT-Ressourcen (Rechengeschwindigkeit, Speicher) exponentiell verbessert haben, umgekehrt proportional zum Preis. Dadurch ist im Gegensatz zu herkömmlichen Ingenieurdisziplinen eine Situation entstanden, die den möglichst gut überlegten Umgang mit diesen IKT-Ressourcen scheinbar obsolet gemacht hat. Programmierer arbeiten vielfach nach dem Prinzip "Hauptsache es funktioniert", egal ob die Lösung elegant und vor allem verstehbar ist. Diese Einstellung wird auch dadurch gefördert, dass Software als Artefakt nicht sichtbar ist. Ein Benutzer interagiert lediglich über die Benutzerschnittstelle mit einem Softwaresystem, sieht aber nicht wie bei einem physischen Objekt die Größe beziehungsweise Komplexität.

Welche Konsequenzen hat das? Wie groß ist der Anteil an unnötiger Komplexität? Das lässt sich nicht allgemein beantworten und ist nur in einigen wenigen Fällen bisher analysiert worden. Beispielsweise konstatiert die Automobilindustrie, dass die Software in einem modernen Fahrzeug etwa 10 Mio. Zeilen Quelltext umfasst. Das ist etwa auch die Größe des Windows-Betriebssystems in den 1990er Jahren gewesen. Niklaus Wirth (ETH Zürich) war einer der wenigen Forscherpersönlichkeiten, der in seiner aktiven Zeit an der ETH Zürich der Frage nachging, welche Komplexität für eine bestimmte Funktionalität wirklich nötig ist. So implementierte er in den 1980er Jahren ein Betriebssystem, das am Informatik-Departement der ETH Zürich über ein Jahrzehnt lang im Einsatz war, mit ca. 30.000 Zeilen Quelltext, der in einem 600 Seiten umfassenden Buch⁵ gut verstehbar dokumentiert wurde. Wenn auch die Funktionalität von Windows und Oberon damals nicht identisch war, zeigt dieses Beispiel doch grob auf, um welchen Faktor Komplexität eventuell verringert werden könnte. In diesem Beispiel ist es ein beachtlicher Faktor von 300. Hier reiht sich ein Zitat von Alan Eustace (Google Vice President) im Wall Street Journal (Oktober 2006) ein, der behauptet, dass für Google ein ausgezeichneter Softwareentwickler 300 mal soviel Wert ist wie ein durchschnittlicher

⁵ Ursprünglich als bei Addison-Wesley publiziertes Buch Project Oberon erschienen; heute auf projectoberon.com; Anmerkung: das Betriebssystem samt den gängigen Anwendungen (Textverarbeitung, Erstellen von Präsentationen und Grafiken, Programmierumgebungen, Web-Browser, etc) wurde erst vor kurzem von Niklaus Wirth um das Hardware-Design vervollständigt. Somit ist ein komplettes Computersystem nach der Wirth-Philosophie "so einfach wie möglich aber nicht einfacher" publiziert und studierbar.

Softwareentwickler. Ein ausgezeichneter Softwareentwickler ist in der Lage, Komplexitätsfallen zu erkennen und von vorne herein zu vermeiden.

Obiges bedeutet, dass einzelne Systeme, die als solche heute als komplex eingestuft werden, vermutlich wesentlich vereinfacht werden könnten und dann eventuell nicht mehr als komplex eingestuft würden. Andererseits könnten sich durch die Interaktion solcher vereinfachten Teilsysteme dennoch komplexe Gesamtsysteme ergeben. Die Vision und Hoffnung ist, dass durch radikale Komplexitätsreduktion im obigen Sinne die Gesamtsysteme (Systemsystems) überhaupt erst einigermaßen für den menschlichen Verstand beherrschbar werden.

2.4. Relevante Forschungsgebiete

Die Vermutung, dass die meisten IKT-Systeme unnötige Komplexität aufweisen, hat diverse Konsequenzen: Zum einen könnte ein neues Grundlagenforschungsgebiet entstehen, um diese Hypothese zu verifizieren oder falsifizieren und auch um festzustellen, wie stark Komplexität quantitativ (z.B. gemessen in Zeilen Code oder ähnlichen Metriken) und qualitativ reduziert werden könnte. Es handelt sich dabei voraussichtlich vorerst um Grundlagenforschung, da Firmen die bestehenden Systeme nur in sehr seltenen Fällen neu entwickeln könnten. Meist sprechen die hohen Investitionen und die bestehenden Installationen dagegen. Trotzdem könnte sich diese Art von Grundlagenforschung bald als sehr anwendungsorientiert herauskristallisieren: wenn sich zum Beispiel herausstellt, dass eine bestimmte Funktionalität um den Faktor 100 vereinfacht werden kann, könnte es ökonomisch Sinn machen, eine Neuentwicklung durchzuführen. Radikal vereinfachte Systeme reduzieren nicht nur signifikant die Wartungskosten, sondern gleichzeitig den Aufwand für eventuell nötige Zertifizierungen (z.B. nach dem SIL-Standard).

Diese Art von Grundlagenforschung gibt es nach unseren Recherchen weltweit bisher nicht. Es gibt sehr wohl Bemühungen, in Anwendungsbereichen sogenannte Referenzarchitekturen zu etablieren. Eine Architektur ist allerdings nur ein Aspekt eines Systems. Zudem stellt sich oft heraus, dass viele der publizierten Referenzarchitekturen bereits unnötig komplex sind. Ein Beispiel ist die jüngst am Ende des deutschen eEnergy-Großprojektes publizierte Referenzarchitektur für Smart-Grids.

Es geht bei der vorgeschlagenen Forschungsrichtung darum, *Referenzsysteme* zu realisieren, deren *Design, Architektur und Implementierung* publiziert werden, idealerweise *als Open Source, und die von der Scientific Community auf Eleganz und Einfachheit geprüft werden*.

Zusätzlich zur neuartigen Grundlagenforschung zur radikalen Reduktion der Komplexität, gilt es, Methoden bereit zu stellen, die es erlauben, komplexe IKT-

Lösungen zu entwerfen und zu implementieren – die Komplexität, die durch die Integration von Teilsystemen entsteht bleibt bestehen. Diese Methoden und Werkzeuge werden in unterschiedlichen Teilgebieten der Informatik erarbeitet. Dies reicht von streng formalen Ansätzen im Bereich der Verifikation zu Hardware-nahen Aspekten intelligenter Sensortechnik und reicht im Bereich der Entwurfsmethoden in das Gebiet Software-Engineering. Weitere angesprochene Teildisziplinen entstammen der Artificial Intelligence, etwa im Bereich autonomer, adaptiver Systeme und Software-Agenten. Traditionell ist natürlich vor allem die technische Informatik zu nennen, die sich seit langem mit Echtzeitsystemen beschäftigt und dem Gebiet von Cyber-Physical Systems.

Die folgenden informatischen Forschungsgebiete, von denen vor allem die ersten drei als etablierte IKT-Teilgebiete angesehen werden können - wurden bereits im Vorfeld⁶ dieser Studie als zentral für die Weiterentwicklung komplexer IKT-Lösungen angesehen:

- Echtzeitsysteme dienen der unmittelbaren Steuerung und Abwicklung von Prozessen, wobei vorher definierte Zeitintervalle eingehalten werden. Dieses Teilgebiet der technischen Informatik ist vor allem für die Steuerung von Produktionsanlagen, für Motorsteuerungen, Gerätetechnik, Signalanlagen, Luft- und Raumfahrttechnik sowie in der Energietechnik besonders wichtig.
- Adaptive Systeme in Form komplexer Netzwerke aus verteilten Agenten sind in der Lage, sich an veränderte Bedingungen anzupassen. Die Kontrolle eines derartigen Systems ist dezentral und Entscheidungen bzw. Ergebnisse sind das Resultat einer Interaktion zwischen einzelnen Agenten. Für Aufgaben, bei denen menschlicher Einsatz aus Gründen des Risikos nicht möglich oder aus Gründen der anfallenden Kosten nicht sinnvoll ist, kommen autonome Systeme zum Einsatz, z.B. Robotik, Produktionsanlagen.
- Autonome Systeme sind in der Lage, Aufgaben selbstständig durchzuführen und ihr Verhalten während der Durchführung an unerwartete Situationen oder Ereignisse anzupassen. Häufig verfügen sie über ein Bild von sich und der Welt, z.B. autonome Fahrzeuge.
- Im Forschungsgebiet rigorose Entwurfsmethoden geht es um die Erforschung neuartiger Methoden und Tools zu den Themen Fehlertoleranz, Verifikation, Validierung, formale Modellierung und formale Korrektheit.

In der Diskussion mit den Expertinnen sowie Vertretern der Industrie wurden diese Forschungsfelder präzisiert. Neben den Teilgebieten „Adaptive Systeme“, „Autonomie Systeme“ und „rigorose Entwurfsmethoden“ (wie oben) wurden die Bereiche „Systemevolution“, und „Verlässlichkeit und Stabilität“ (Dependability) hinzugefügt. Außerdem wurde noch der nicht-Forschungsbereich „Standardisie-

⁶ S. Ruhland, E. Prem, *Re-Design des IKT-Forschungsportfolios des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie. Endbericht. Wien, Mai 2012.*

ung/Infrastruktur“ hinzugefügt (aber nicht in der Roadmap-Darstellung abgebildet, vgl. Abschnitt 5.2).

2.5. Spannungsfeld Innovation – Wissenschaft

Ein wichtiger Punkt für die zukünftige strategische Ausrichtung der FTI-Politik im Bereich der Entwicklung von Methoden für die Ermöglichung komplexer IKT-Systeme ist die gegenwärtige Spannung zwischen Innovation und Wissenschaft. Die Inhalte jüngerer EU-Ausschreibungen und die Reaktion der industrienahen Community auf diese Ausschreibungen zeigen wie groß das Potenzial für relativ anwendungsnahe Neuerungen ist. Dazu gehören Werkzeuge für den Software-Entwurf, aber auch Referenzsysteme, Tools zur Verbesserung der Interoperabilität, Standards, etc. Es besteht Bedarf an praxisorientierten Methoden für sichere Echtzeitsysteme, Entwurf und Test verteilter Systeme.

In vielen dieser Bereich gibt es wissenschaftliche Ansätze, die zum Teil sogar sehr weit fortgeschritten sind. Aber aus verschiedenen Gründen haben diese Methoden den Weg in die industrielle Praxis noch nicht gefunden. Einer dieser Gründe ist, dass die Konzepte zu wenig an alltagspraktische Anforderungen der Industrie angepasst sind. Zusätzlich gibt es gravierende praktische Probleme, die bisher überhaupt noch relativ wenig von einer breiten wissenschaftlichen Community erforscht werden.

Dies legt nahe, FTI-Programme in diesem Bereich stark kooperativ anzulegen, aber auch der Wissenschaft eigenen Raum zu geben, Probleme der Industrie mit völlig neuartigen Konzepten zu beforschen. Hier sollte nicht nur die übliche Kooperation von Industrie und Wissenschaft in Projekten im Mittelpunkt stehen, sondern auch die intersektorale (d.h. zwischen Wissenschaft und Industrie) Kommunikation von Problemen und Lösungen.

In folgenden Themenfeldern besteht eine besonders gravierende Diskrepanz zwischen industriellem Stand der Technik und dem Stand – bzw. den neuesten Resultaten der Wissenschaft:

- Frameworks: derzeit wird in der Industrie und in Unternehmen viel Arbeit in Frameworks, Tools etc. gesteckt, um den Softwareentwurf für komplexe Systeme in der Praxis besser zu unterstützen. Aus wissenschaftlicher Sicht bieten viele dieser Ansätze nur wenig neue Erkenntnisse.
- Parallelisierung; die Nutzung von Multicore Rechensystemen ist nach wie vor äußerst ineffektiv und mit hohem Programmieraufwand verbunden - obwohl parallele Rechensysteme seit über 30 Jahren erforscht und kommerziell betrieben werden

- Standards: es mangelt an Standards, die z.B. Teilsysteme zertifizierbar machen würden; andererseits sind Standards zum Beispiel aufgrund verfrühter Standardisierung oder aufgrund von Kompromissen zwischen Firmeninteressen unnötig komplex
- Tests: wegen der großen Zustands- und Inputräume stoßen Datentests schnell an ihre Grenzen. Neue Testverfahren werden benötigt, ganz besonders im Securitybereich.
- Altsysteme: dieses Feld wird fast gar nicht in der Wissenschaft beforscht,⁷ stellt aber in der Praxis einen ganz wichtigen Bereich dar; das reicht von kommerzieller Software (Banken, Versicherungen, etc) bis hin zur Luftfahrt.

2.6. Internationale Perspektive

EU-Programme

Bereits in der Vergangenheit (7. EU Forschungsrahmenprogramm) hat die Europäische Kommission Forschung im Bereich Systems-of-Systems gefördert.⁸ Die letzte EU-Ausschreibung im aktuellen Rahmenprogramm adressierte in der Programmlinie ICT-1 insbesondere „cyber-physical systems (CPS)“, die eng mit dem hier erläuterten Begriff der Systems-of-Systems bzw. der komplexen Systeme verbunden sind. Ausgeschrieben waren insbesondere Modellierungs- und Integrations-Werkzeuge, intelligente und kooperative CPS. Im Innovationsbereich waren vor allem Plattformen und Ökosysteme ausgeschrieben. Die Themen der Ausschreibung verdeutlichen, wie sehr der Bereich insgesamt noch über einen Mangel an Ansätzen, Methoden und vor allem Werkzeugen zur Systementwicklung verfügt.

Man kann daran auch ablesen, dass der Stand der Technik im Entwurf von CPS noch recht weit von anderen Disziplinen des IKT-Entwurfs entfernt ist. Vor allem die Unterstützung der Integration heterogener Systemkomponenten, die ein wesentliches Element der Komplexitätsbeherrschung darstellt, ist heute nur unzureichend bis überhaupt nicht gelöst. Dies gilt vor allem bei sicheren Systemen bzw. Echtzeitsystemen.

⁷ Eine Ausnahme stellen z.B. die Arbeiten der Business Informatics Group am Institut für Softwaretechnik und interaktive Systeme der TU Wien dar. Im Projekt ARTIST werden neue Konzepte für die Migration von Altsoftware erforscht (<https://www.big.tuwien.ac.at/projects/17>).

⁸ Insbesondere im strategischen Ziel IST-2013.3.3 „New paradigms for embedded systems, monitoring and control towards complex systems engineering“ mit dem Fokus auf Design und Entwicklung von Systemsystemen.

Auch die Technologieplattformen ARTEMIS/ENIAC bzw. nunmehr ECSEL haben sich stark den Themen CPS, Systemintegration, Entwurfswerkzeuge u. ä. gewidmet und setzen diese Programminhalte auch weiterhin ins Zentrum ihrer Aktivitäten. Die diesen Programmen zugrundeliegenden Strategiepapiere enthalten in wesentlichen Teilen Themen, wie sie in der vorliegenden Studie angesprochen sind.

Allerdings sind diese Programme oft sehr deutlich industriell ausgerichtet, was sich z.B. an der starken Betonung des Themas „Werkzeuge, Frameworks“ etc. zeigt. Vor allem die aus der Technologieplattform ARTEMIS übernommenen Schwerpunkte sprechen die hier erwähnten Themen sichere, integrierte Systeme, Systems-of-Systems, autonome und adaptive Kontrollsysteme etc. an.⁹

US-Initiativen

Eine Reihe von US-amerikanischen Initiativen hat in der Vergangenheit das Thema *Cyber Physical Systems* zum Gegenstand gehabt.

Große Universitäten widmen sich dem Thema komplexe Systeme auch aus Anwendungsperspektive. So hat z.B. die University of California Berkeley eine große Initiative im Bereich Smart Cities gestartet. Am Smart Cities Research Center in Berkeley werden fortgeschrittene quantitative Modelle urbaner Systeme entwickelt. Hier geht es neben der Analyse großer Datenmengen auch um verteilte, intelligente Kontrollsysteme, intelligente Verkehrssysteme – aber auch um computerorientierte Sozialwissenschaften.

Große internationale Aufmerksamkeit konnten die DARPA Grand Challenge Wettbewerbe erlangen. Von 2004 bis 2007 wurden von der Technologieabteilung Defense Advanced Research Projects Agency des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums Wettbewerbe für unbemannte Landfahrzeuge gesponsert. 2012 gab es eine Variante des Wettbewerbs für humanoide Robotersysteme.

DARPA ist im Zusammenhang mit komplexen Systemen überhaupt ein besonders wichtiger Förderer von Lösungsansätzen für komplexe IKT-Systeme. So schreibt das Strategic Technology Office¹⁰ immer wieder Themen im Bereich Systems-of-systems bzw. verteilte Systeme aus. Der Schwerpunkt liegt hier natürlich auf militärischen Anwendungen.

⁹ http://www.artemis-ia.eu/publication/download/publication/993/file/ARTEMISIA_2014_ECSEL_MASRIA_Part_C.pdf

¹⁰ http://www.darpa.mil/Opportunities/Solicitations/DARPA_Solicitations.aspx#STO

Im zivilen Bereich in den USA gab es vor allem eine Ausschreibung der *National Science Foundation*¹¹ mit dem Schwerpunkt *Konstruktion komplexer Systeme (Building Engineered Complex Systems)*. Dieses Programm setzte einen wesentlichen Schwerpunkt in der theoretischen Fundierung von Systemen, die aus Komponenten bestehen und emergente Eigenschaften zeigen. Einige der bereits seit 2010 geförderten Projekte laufen noch. Die Projekte sind stark grundlagenwissenschaftlich orientiert, d.h. vor allem mathematisch, aber auch chemisch und physikalisch ausgerichtet. Der überwiegende Schwerpunkt der Förderungen liegt in Kalifornien mit 78 Projekten gefolgt von Massachusetts mit 36.

Deutschland

Auch in Europa haben sich einige Staaten und Regionen dem Thema komplexe IKT-Systeme gewidmet. Bayern hat 2009 einen Entwicklungsschwerpunkt für „komplexe informationstechnische und elektronische Systeme“ im Rahmen des Programms Bayern 2020 eingerichtet.

Auf Bundesebene hat das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung 2013 ein Programm zur Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet "adaptive, lernende Systeme - für eine verständliche Interaktion zwischen Mensch und komplexer Technik" gestartet.¹²

¹¹ http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503431

¹² <http://www.bmbf.de/foerderungen/22836.php>

3. Anwendungsfelder

Komplexe IKT-Systeme finden sich in zahlreichen, äußerst unterschiedlichen Lebens- Industrie- und Wirtschaftsbereichen. Sie leisten einen wichtigen Beitrag zu ökonomischen Herausforderungen wie z.B. Wettbewerbsfähigkeit, Export, Dynamisierung traditioneller Branchen, aber auch gesellschaftlichen Herausforderungen in den Bereichen alternde Gesellschaft und Gesundheit, Mobilität, Erneuerung der Energiesysteme. Im Folgenden sind einige Beispiele für Anwendungsfelder und einzelne ausgewählte österreichische Beiträge zu diesen Feldern angeführt.

Die Anwendungsfelder wurden so ausgewählt, dass sie einen Querschnitt über in Österreich wirtschaftlich relevante Themenbereiche darstellen, in denen Heterogenität von IKT-Komponenten zunehmend eine wichtige Rolle spielt und wo Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden müssen. Die gewählten Projektbeispiele bieten einen beispielhaften Überblick über Forschungsarbeiten bzw. Innovationen österreichischer Unternehmen.

Fertigung

Im Bereich der industriellen Produktion und Fertigung liegen zahlreiche komplexe Systeme vor, die viele der oben erwähnten Charakteristika aufweisen, z.B. Echtzeitanforderungen, Sicherheitsaspekte, heterogene Komponenten, Zertifizierung etc. Es ist zu erwarten, dass der Trend weiter in Richtung Integration unterschiedlicher Komponenten – insbesondere auch mobiler Geräte und neuartiger Interfaces gehen wird.

KNAPP entwickelt in Zusammenarbeit mit AVL List, evolaris next level, Infineon Technologies Austria, Paris-Lodron-Universität Salzburg, Research Studios Austria Forschungsgesellschaft und XiTrust Secure Technologies derzeit ein intelligentes Assistenzsystem, das mit Hilfe von mobilen



Abbildung 3 KiSoft Vision
(www.knapp.com)

Endgeräten wie Tablets, Smartphones oder Datenbrillen eine geführte Wartung ermöglicht. Im Zuge des FFG-geförderten Forschungsprojekts Assist 4.0 werden insgesamt sechs Anwendungsfälle konzipiert, umgesetzt und evaluiert, die auf Basis spezieller Anforderungen der Industriepartner erhoben wurden. Bei einer Projektlaufzeit von rund 2,5 Jahren soll es bis Ende 2015 einen Prototyp geben. Ein zentrales Softwaresystem in Kombination mit modernen Endgeräten wie Tab-

lets, Smartphones oder Datenbrillen soll das Servicepersonal situationsangepasst mit Informationen und visualisierten Daten unterstützen, um Servicefälle besonders effektiv und effizient abzuwickeln.

Kommunikation

Kommunikationssysteme sind ein weiterer Bereich mit hoher Komplexität. Gestiegene Anforderungen liegen vor allem in den Bereichen Ausfallsicherheit, Integration über Herstellergrenzen, Sicherheit (auch Abhörsicherheit, Unverfälschtheit), neue Benutzerschnittstellen und Endgeräte.

Ein Beispiel sind Leitstände, wie sie z.B. vom österreichischen Unternehmen eurofunk Kappbacher geliefert werden. Für eine erfolgreiche Einsatzbearbeitung benötigt jede Leitstelle eine Software, welche dem Disponenten (Hilfeleister in der Leitstelle) eine sinnvolle und unmittelbare Unterstützung bietet. Auf diese Weise können im Ernstfall wertvolle, häufig lebensrettende, Sekunden eingespart werden. ELDIS (Electronic Dispatching and Information System) ist eine bewährte Einsatzleit- und Managementsoftware von eurofunk. Sie dient zur raschen Einsatzerfassung, Disposition von Einsätzen und Einsatzmitteln, deren Alarmierung sowie der Nachbearbeitung von Einsätzen.



Abbildung 4 Leitstand (www.eurofunk.com)

Derartige Systeme finden in zivilen Notfalleinrichtungen ebenso Verwendung, wie in Flughäfen oder in der Industrie.

Fahrzeugbau

In der Automobilindustrie wird derzeit massiv an Systeme gearbeitet, um KFZ sicherer zu machen (unfallfreies Fahren). Aber auch umweltfreundlichere Steuerungen (Emissionsreduktion), flexiblere KFZ-Plattformen (e-drive, e-brake etc.) und autonomes Fahren sind wichtige Bereiche aktueller Forschung und Entwicklung im Bereich komplexer IKT-Systeme. Gerade in der KFZ-Industrie sind die Sicherheits-

anforderungen sehr hoch. Es liegt aber auch ein hoher Kostendruck vor. Zudem müssen Systeme leicht zu warten und erweiterbar sein, werden zum Teil zertifiziert und von unterschiedlichsten Herstellern integriert.

Magna Powertrain bietet Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme an, die Technologien wie Kamera-Systeme, Ultraschall- und Radarsysteme sowie deren Funktionen kombinieren, um dem Fahrer in unterschiedlichsten Situationen die Orientierung zu erleichtern und damit die Sicherheit zu erhöhen, wie ein 360° Panorama, Erfassung des Fahrumfelds sowie Erkennung von Objekten und Hindernissen. Die Systeme werden von OEMs auf mehreren Plattformen in verschiedenen Märkten weltweit angewendet, um vor allem Auffahrunfälle und Unfälle aufgrund Spurverlassens zu vermeiden.

Für die Warnung vor unbeabsichtigtem Spurverlassen wird z.B. eine Videokamera hinter der Windschutzscheibe mit einem Bildverarbeitungsprozessor gekoppelt, der Fahrbahnmarkierungen automatisch erkennt. Das System ist darüber hinaus in der Lage, die Absicht des Fahrers bezüglich Fahrmanövern, die



ein Verlassen der Fahrspur bedingen, zu erkennen und entsprechend zu reagieren.

Abbildung 5 Fahrerassistenzsystem
(www.magnapowertrain.com)

Die Kollisionswarnung des Systems arbeitet in einer ähnlichen Weise. Der Fahrer kann die Distanz für die Warnungen vom System ausgegeben werden, selbst beeinflussen.

Energietechnik



Abbildung 6 Virtual Power Plant
(www.energymanagertoday.com)

Ein zunehmender Anteil der erneuerbaren Energiequellen, die Alterung der Energieinfrastruktur und langwierige, anspruchsvolle Raum- und Umweltgenehmigungsverfahren führen zu erheblichen Herausforderungen und Kosten für die Netz-Betreiber in den kommenden Jahren. Hinzu kommt, dass sich die schwierige Berechenbarkeit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auch auf Übertragungskapazitäten auswirkt. Smart grids erfordern eine Systemlösung,

die schnell umgesetzt werden kann, ohne die Notwendigkeit für den Bau neuer Stromleitungen oder Kraftwerken.

cyberGRID der gleichnamigen cyberGRID GmbH ist ein Demand Response System mit Fokus auf virtueller Kraftwerkstechnologie, das Automatisierungstechnik mit intelligenter Kommunikationstechnologie vereint. Es integriert bestehende Energiemanagementsysteme und/oder einzelne Aggregate der Endkunden. cyberGRID ist in der Lage, eine beliebig große Client-Anzahl von verteilter Erzeugung, Lasten und Verbrauchern zu managen und zu steuern inklusive der Einbindung von fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen (wie Wind oder PV). Das Ergebnis ist die Bereitstellung/ von zusätzlicher Regelenergie (z.B. tertiäre Reserve), Ausgleichsenergie oder die Reserve, die zum Zweck des Engpassmanagements (redispatch, countertrade) genutzt werden kann.

Robotersysteme

Überaus komplexe Systeme finden zunehmend als flexible Robotersysteme, Alltagsroboter, oder unbemannte Luftfahrzeuge völlig neue Anwendungsbereiche. Neben militärischen Anwendungen (z.B. Entminung, Aufklärung) gilt dies vor allem auch in einer breiten Palette von zivilen Anwendungen, die bis in die Landwirtschaft und Unterhaltungsindustrie reichen.

Ein bekanntes österreichisches Beispiel für Innovation im Bereich unbemannter Luftfahrzeuge stellt das Unternehmen Schiebel dar. Das unbemannte Hubschraubersystem CAMCOPTER® S-100 von Schiebel absolviert definierte Flugrouten ohne Eingriff eines Piloten und ist sowohl für den Betrieb auf als auch an Land nach den Normen der bemannten Luftfahrt konzipiert. Die Flugsicherheit des S-100 wurde von der Austrian AustroControl GmbH und der European Aviation Safety Agency zertifiziert. Es kann Missionen automatisch abfliegen, aber auch jederzeit während des Flugs umprogrammiert werden. Das S-100 wird per Mausklick auf einer grafischen Benutzeroberfläche gesteuert. Die Bilder der Nutzlast (z.B. Infrarot-Kameras, Radar, Transponder oder Container) werden in Echtzeit übertragen. Die Reichweite beträgt bis zu 200km. Die gesammelten Daten werden sicher und jederzeit über Ethernet übertragen.



Abbildung 7
CAMCOPTER® S-100
(www.schiebel.com)

Transport

Verkehrssysteme sind klassische Beispiele für hochgradig vernetzte Systeme, die zugleich auf verschiedenen Ebenen beschrieben werden können und die einander beeinflussen. Viele zukünftige Entwicklungen liegen in den Bereichen verbesserte Integration von Verkehrssystemen; sichere Systeme, Smart City, sowie smarte Logistik.

Ein Unternehmensbeispiel in Österreich liefert die Fa. MIA Systems und Software GmbH.



Sie wurde 2007 zur Implementierung und Vermarktung intelligenter Lösungen für komplexe Logistikprozesse gegründet und hat inzwischen mehrere internationale Auszeichnungen für ihre Logistikanwendungen gewonnen (z.B. den Schweizer Logistik Preis 2013, den Innovationspreis IT 2013 der deutschen IT-Initiative Mittelstand und Vorarlbergs beste KMU Preis 2012). Die wesentlichen Features des mobilen Lagerverwaltungssystems mia.Logistics der 2007 gegründeten sind:

Abbildung 8 Lieferkette (www.mia-systems.at)

- Barcode-Scanning ermöglicht eine gesicherte Qualitätskontrolle und führt zu weniger Fehlern bei Kommissionierung und Verpackung.
- Waren werden als A-, B- und C-Artikel klassifiziert. Daraus ergibt sich eine klare Einlagerungs- und Kommissionierstrategie, die z.B. kürzere Wege und eine bessere Nutzung der Lagerkapazitäten garantiert.
- Kommissionieraufträge können einfach priorisiert werden.
- Die Nutzung mobiler Endgeräte und Staplerterminals ermöglicht eine parallele Bearbeitung von Aufträgen, die die Durchlaufzeiten verkürzt.
- Leere Kommissionierplätze und damit verbundene Unterbrechungen im Ablauf gehören der Vergangenheit an. Der Nachschub erfolgt automatisiert.
- Bei automatischen Lagerprozessen übernimmt mia.Logistics die Steuerung von Transportrobotern oder von führerlosen Transportsystemen.

Mit mia.Analytics sind Auswertungen über historische und aktuelle Daten problemlos und ohne Verlangsamung des Systems möglich. Alle Analysen werden in nutzerfreundlicher, grafischer Form dargestellt und können zur weiteren Bearbeitung

beliebig exportiert werden. Kennzahlen wie etwa Wareneingangs-, Kommissionier- und Verpackungsleistung, Durchlaufzeit der Kommissionierung, Lieferbereitschafts- sowie Lagerfüllgrad sind somit laufend abrufbar.

Weltraumtechnik

Weltraumtechnik ist ein interessanter Bereich, weil man hier traditionell eigentlich vermeidet, komplexe Systeme zu konstruieren. Im Gegenteil, Systeme für die Weltraumfahrt müssen besonders robust, sicher, langlebig sein und werden oft in sehr kleiner Stückzahl gefertigt. Dennoch stellen sich auch hier besondere Anforderungen der Sicherheit, Echtzeit-Reaktion – und in Zukunft auch der Integration heterogener Komponenten etc.

TTTech hat im Rahmen des ISAACC-Projekts (Integrated Safety-Critical Advanced



Abbildung 9 Integrated Safety-Critical Advanced Avionics Communication and Control
(www.tttech.com)

Avionics Communication and Control) eine Avionik-Architektur für die Steuerung und Überwachung bemannter Raumfahrzeuge für die NASA entwickelt. ISAACC besteht aus einem neuen Kommunikations- und Steuerungsprotokoll kombiniert mit intelligenten Komponenten wie Sensoren, Antriebssteuerungen und Leistungsschaltern, um eine moderne Kommunikations- und Steuerungssystem zu schaffen. Der Kern des Systems umfasst das Datenkommunikationsprotokoll TTP. Damit können alle Module in einem System jederzeit auf alle Daten zugreifen bei gleichzeitig verbessertem Datenfluss- und Redundanzmanagement.

Medizin

Auch in der Medizin gibt es zahlreiche Anwendungsbereiche, bei denen die klassischen Aspekte sicherer Systeme, heterogene Komponenten – aber auch dynamische Benutzer-Interaktion zu äußerst komplexen Anforderungen und IKT-Systemen führen. Die hohen Kosten, die heute



Abbildung 10 TruConnect (www.trumpf.com)

mit der Konstruktion derartiger Systeme nötig wären, verhindern zum Teil sogar ihren praktischen, kommerziellen Einsatz.

In enger Abstimmung mit Ärzten und Klinikpersonal hat TRUMPF einen neuen Ansatz in der OP-Integration entwickelt: Über das Managementsystem TruConnect lassen sich viele Abläufe im OP sicherer und intuitiver gestalten – und personelle sowie wirtschaftliche Potenziale voll ausschöpfen. Basis dafür sind innovative Konzepte wie Realtime-Objektlokalisierung, eine IP-basierte Infrastruktur sowie ein flexibles App-Konzept.

Über den Touchscreen lassen sich die integrierten Geräte exakt steuern. Das System integriert

- OP-Tisch: 3D-Visualisierung, grafische Touch-and-Move-Bedienung sowie eine dynamische Komponentenerkennung
- OP-Leuchten: alle Einstellungen sind zentral steuer- und einstellbar (Helligkeit, Farbtemperatur, Schattenmanagement oder Feldgröße)
- OP-Kamera: Steuerung von Live-Bildern sowie Bilddokumentationen sowie Darstellung auf einem Handheld-Gerät
- Musik im OP: Anschluss und drahtlose Steuerung von Endgeräten
- Video-Tutorials

Automatisierung

Die Maximierung der Produktivität ist die zentrale Herausforderung im heutigen wirtschaftlichen Umfeld. Innovative Steuerungstechnik hat sich deshalb in der Baustoffaufbereitung zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor entwickelt. Sie beeinflusst neben der Produktivität wesentlich die Qualität der produzierten Baustoffe und die Verfügbarkeit der Anlagen.



Abbildung 11 as1 - Leit-system für Asphalt- und Betonanlagen
(www.ammann-group.at)

Die Ammann Group Weltweit nutzt für ihrer as1 Anlagensteuerungen erprobte Verfahrenstechnik, gepaart mit optimierter Steuerungstechnik und einer entsprechenden Informatik-Plattform. Auf Basis einer Plattform, die dem Benutzer auf die Beherrschung der Verfahrenstechnik ermöglicht, werden weitere Geschäftsprozesse, wie Auftragsverwaltung, Produktionsplanung oder Qualitätssicherung, modular integriert.

Sicheres Leben im Alter

Die zunehmende Lebenserwartung ist eine der Ursachen für den gestiegenen Bedarf an Unterstützungssystemen für ältere Menschen. Viele FTI-Projekte fokussieren z.B. auf den Bereich sicherer und intelligenter Wohnungsumgebungen, die einzelne Charakteristika komplexer Systeme wie Sicherheit, Integration, intelligente Benutzerschnittstellen etc. aufweisen.

Das Projekt „NovaHome – Know-how und Kompetenz-Aufbau im Bereich Smart Homes für sicheres und energieeffizientes Wohnen“ wurde von AIT Austrian Institute of Technology GmbH initiiert und von AIT und dem Land NÖ unter Kofinanzierung seitens des EFRE finanziert. Darüber hinaus bringen die Firmenpartner Eaton GmbH und ELK Fertighaus AG Bar- und In-



kind-Leistungen in das Projekt ein.

Das Projekt war Preisträger des TecNet-Calls „Intelligentes Bauen“ und

Abbildung 12 Nova Home Viewer
(www.novahome.at)

ist Gewinner des GENIUS Awards 2009. Das Herzstück von NovaHome bzw. eines der zentralen Ergebnisse ist das Softwaresystem HOMER (HOME Event Recognition), das modular in einem Java OSGi Framework mit internen standardisierten Schnittstellen aufgebaut ist und die zentrale Intelligenz und Steuerung darstellt. Im Bereich Sensoranbindung wurde auf Kompatibilität und Interoperabilität Wert gelegt. Es werden zum Großteil Funksensoren von Eaton (z.B. PIR-Bewegungsmelder, Energiemesssensoren) und die dazugehörigen Kommunikationsschnittstellen zur Anbindung an die modulare Analysesoftware verwendet. Im HOMER-System wurde besonders auf die Benutzerfreundlichkeit und in weiterer Folge die Unterstützung innovativer Benutzerschnittstellen geachtet, z.B. mittels Touch-Displays.

4. Situation in Österreich

4.1. Wirtschaftsstruktur

Die Entwicklung von Handlungsempfehlungen muss sich auch an der Frage nach bestehenden wirtschaftlichen Stärken Österreichs orientieren. IKT im Sinne einer *enabling technology* ist ein essenzielles Element der zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit ganzer Wirtschaftsbereiche und damit eben auch solcher, für die komplexe IKT Lösungen entwickelt werden bzw. auf deren Anforderungen und Probleme Forschung zu komplexen IKT Lösungen regiert. Zusätzlich zur Identifikation relevanter Anwendungsbereiche komplexer IKT Lösungen auch im Sinne der bestehenden Leistungsfähigkeit ist für die Maximierung des ökonomischen Hebels von Forschungs- und Innovationsförderung mittels öffentlicher Finanzierungen von Bedeutung, welche Sektoren inwieweit die notwendige Kapazität zur Absorption, d.h. Aufnahme und Verwertung von entsprechenden Forschungsergebnissen haben.

Die folgende Tabelle bietet, basierend auf den verfügbaren Daten der Statistik Austria, einen Überblick über Stärkefelder der österreichischen Wirtschaft einerseits sowie deren entsprechender eigener Forschungsleistung (als Annäherung an die Frage der Absorptionskapazität) und damit einen ersten Eindruck jener Sektoren mit hoher Relevanz für die marktgetriebene IKT Forschung im Bereich komplexer Systeme. Die ausgewählten Sektoren wurden einerseits entsprechend ihres Bedarfs an IKT-getriebenen Innovationen gefiltert und unterliegen andererseits den datenschutzrechtlichen Bestimmungen der Statistik Austria, so dass z.B. der Bankensektor mangels veröffentlichter Informationen in dieser Darstellung nicht berücksichtigt werden konnte.

	Anzahl der Unternehmen	Beschäftigte insgesamt	Umsatzerlöse in 1.000 EUR	Investitionen insgesamt in 1.000 EUR	Ausgaben für F&E insgesamt in 1.000 EUR	Kopffahlen für F&E insgesamt	F&E durchführende Erhebungseinheiten	Anteil Grundlagenforschung	Anteil angewandte Forschung	Anteil experimentelle Entwicklung	F&E Beschäftigte pro F&E durchführende Erhebungseinheit	Anteil F&E durchführende Erhebungseinheiten an allen Unternehmen
H.v. Papier/Pappe und Waren daraus <C17>	142	16.679	6.266.362	227.528	23.586	248	30	6,6	58,2	35,2	8,3	21,1
H.v. chemischen Erzeugnissen <C20>	335	17.568	13.614.742	440.843	214.528	1.628	73	2	42,8	55,1	22,3	21,8
H.v. pharmazeutischen Erzeugnissen <C21>	88	11.514	3.981.375	164.316	170.302	1.031	30	0,4	55,8	43,8	34,4	34,1
H.v. Gummi- und Kunststoffwaren <C22>	609	28.684	6.158.961	274.441	131.000	1.650	102	5,1	40,4	54,5	16,2	16,7
H.v. Datenverarbeitungsgeräten <C26>***	561	19.557	4.931.055	340.894	200.826	2.343	131	3,5	25,2	71,3	17,9	23,4
H.v. elektrischen Ausrüstungen <C27>	469	45.360	11.716.959	423.673	735.757	5.845	115	2,2	23	74,8	50,8	24,5
Maschinenbau <C28>	1.322	72.900	19.439.366	534.054	679.763	6.647	301	3,5	31,2	65,3	22,1	22,8
H.v. Kraftwagen und -teilen <C29>	318	30.389	13.591.098	425.513	406.897	2.971	47	3,4	19,2	77,4	63,2	14,8
Sonst. Fahrzeugbau <C30>	80	6.003	2.390.043	32.824	116.631	976	17	4,5	45,2	50,2	57,4	21,3

Abbildung 13 Wirtschaftliche F&E-Stärkefelder Österreich (Quelle: Statistik Austria 2014, eigene Darstellung)

Insgesamt wird darin deutlich, dass, wenig überraschend, ein Großteil der relevanten Unternehmen und Beschäftigten im Bereich des Maschinenbaus (sowie im weiteren Sinne auch des Anlagenbaus), des Kraftfahrzeugbaus sowie der chemischen, pharmazeutischen Industrie und Papierherstellung zu finden sind. Insbesondere der Maschinenbau verfügt mit mehr als 1.300 Unternehmen, 72.900 Beschäftigten und Umsatzerlösen von mehr als € 19 Milliarden über eine ökonomische Basis, die ihn zu einem der absoluten Stärkefelder Österreichs machen. Gleiches gilt für den Kraftfahrzeug- und sonstigen Fahrzeugbau (wenngleich die Anzahl der Beschäftigten hier deutlich niedriger ausfällt).

Was allen Sektoren gemein ist, sind weiterhin die relativ hohen Investitionssummen sowie die hohen Ausgaben für F&E. Dementsprechend gehören diese Wirtschaftsbereiche auch zu jenen mit den durchschnittlich höchsten Konzentrationen von so genannten F&E durchführenden Erhebungseinheiten, d.h. Unternehmen oder Unternehmensteilen, die eigene Forschung durchführen (zwischen 15 und 34% der Unternehmen führen eigene Forschung im Sinne der entsprechenden Erhebungen der Statistik Austria durch). Die, im Durchschnitt, größten forschenden Unternehmen finden sich im Bereich der Herstellung von elektrischen Ausrüstungen, im Kraftwagen- und sonstigen Fahrzeugbau (51, 63 bzw. 57 Mitarbeiterinnen im Schnitt). Was ebenfalls deutlich wird, ist die hohe Relevanz von anwendungsnaher oder sogar anwendungsspezifischer (d.h. so genannter experimenteller)

Forschung und Entwicklung. Insbesondere der gesamte Bereich des Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbaus wird deutlich von letzterem dominiert.

4.2. IKT Wertschöpfung

Einen weiteren wichtigen Aspekt für die Ableitung von Handlungsempfehlungen stellt die Frage nach jenen Teilen der Wertschöpfungsnetze dar, die in Österreich liegen. Die folgende Grafik verdeutlicht am Beispiel der Mikroelektronik und einzelner, ausgewählter Unternehmen einen Teil der Wertschöpfungskette für komplexe IKT-Lösungen.¹³

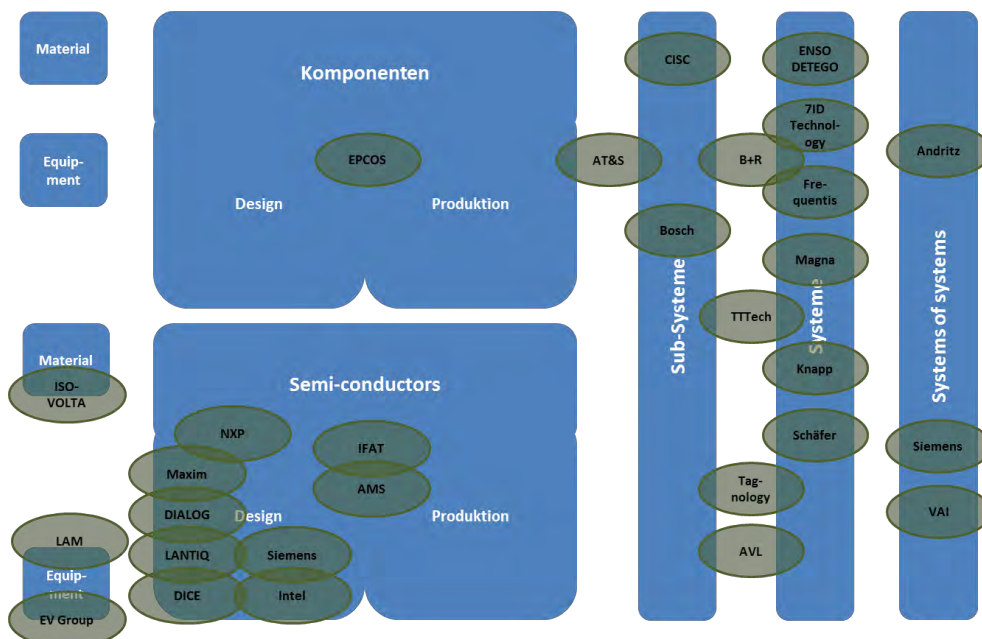


Abbildung 14 Wertschöpfungsnetzwerk komplexe IKT Lösungen (Industrie). Quelle: eutema Technology Management und KMU Forschung Austria 2014

Dieser Ausschnitt aus dem Wertschöpfungsnetz verdeutlicht, dass in beinahe allen Wertschöpfungsstufen, d.h. vom Equipment-Bereich bis zum integrierten Gesamtsystem, österreichische Unternehmen vertreten sind. Dies ist eine sehr gute Ausgangsposition für das Themenfeld, da hier natürlich auch an vielen Stellen bedeu-

¹³ Eine Gesamtanalyse österreichischer Wertschöpfungsverflechtungen im Mikroelektronikbereich oder anderen Teilbereichen der IKT in Österreich war nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

tende und zum Teil über viele Jahre etablierte Anknüpfungspunkte an FTI-Akteure aus Wissenschaft und Forschung bestehen.

Für ein relativ kleines Land wie Österreich ist besonders bemerkenswert, dass auch der Bereich der frühen Wertschöpfungsstadien (Equipment, Design) stark durch Unternehmen besetzt ist. Wichtig ist auch anzumerken, dass die Systemhersteller natürlich sehr unterschiedliche Charakteristika aufweisen und von eher kleinen bis zu mittelständischen Unternehmen reichen, die zumeist auf spezielle Branchen spezialisiert sind.

Die Arbeiten zur vorliegenden Studie haben aber auch gezeigt, dass der Kenntnisstand über diese Wertschöpfungsnetze bzw. über die unterschiedlichen Marktteilnehmer noch ausbaufähig ist. Während größere, bzw. in der FTI-Politik aktive Unternehmen über eine hohe Sichtbarkeit verfügen, sind viele andere Unternehmen in der Community und ggf. auch in der FTI-Landschaft nur schwach vernetzt und wenig sichtbar.

4.3. Wissenschaftlich-technisches Know-how in Österreich

4.3.1. Frühere Studien

Ältere Analysen der IKT-Szene in Österreich zeichnen bereits ein recht klares Bild über die Stärken der Wissenschaft aber auch der IKT-Industrie in Österreich.¹⁴ Zu den größeren thematischen Stärkefeldern der heimischen IKT-Forschung in Industrie oder Wissenschaft gehörten in diesen Studien insbesondere die Bereiche Embedded Systems, Mobilkommunikation, Visual Computing, Artificial Intelligence und semantische Systeme, Elektronik, sowie im Grundlagenbereich vor allem die Mathematik und elektronischen Grundlagendisziplinen gehören.

Es zeigte sich, dass nur wenige Bereiche sowohl im Grundlagenbereich als auch in den anwendungsorientierten Indikatoren als ausgeprägte Stärken erscheinen, z.B. der Bereich Embedded Systems. Zwischen einigen der Stärkefelder bestehen Überlappungen und starke Synergiepotenziale, dies gilt z.B. für die Bereiche Mikroelektronik, Embedded Systems und Mobilkommunikation.

Obwohl diese Daten bereits älter sind, kann davon ausgegangen werden, dass spezifische österreichische Stärken in den folgenden Themenfeldern bestehen:

- Echtzeitsysteme

¹⁴ Prem et al. *Grundlagen einer IKT-Forschungsstrategie für Österreich*, eutema, Wien 2007. Erbschwendtner et al. *IKT in Österreich*, IWI und JR, Wien, 2003.

- Security
- Mikroelektronik
- Formale Verifikation
- Artificial Intelligence
- Mathematische und logische Grundlagen

Im nächsten Abschnitt beschreiben wir eine Auswahl von Forschungsgruppen in den für den Bereich komplexe IKT-Systeme relevanten Themenfeldern.

4.3.2. Auswahl relevanter wissenschaftlicher Forschungsgruppen

Österreich verfügt über eine hohe Konzentration von wissenschaftlichen Forschungsgruppen in für das Themenfeld komplexe IKT Lösungen relevanten Forschungsfeldern (z.B. fault tolerance, real-time systems, pervasive systems, verification, model-driven development, software agents, adaptive systems, Fehlerdiagnose, security und Quantenkryptographie).

Im Folgenden werden einige der Gruppen kurz dargestellt. Die kurze Übersicht zeigt, dass das Themenfeld in Österreich grundsätzlich geeignet ist, in der nötigen Breite und Tiefe behandelt zu werden.¹⁵

Die Forschungs- und Lehraktivitäten des *Embedded Computing Systems-Gruppe am Institut für Technische Informatik an der TU Wien* (unter der Leitung von Prof. Ulrich Schmid und Prof. Andreas Steininger) konzentrieren sich auf vernetzte embedded systems in kritischen Anwendungen. Die Forschung ist in erster Linie fehlertoleranten Algorithmen, Echtzeit-Systemen, zuverlässigen on-chip-Systemen und asynchronem, digitalem Design gewidmet. Das Spektrum der auf diese Probleme angewandten Methoden reicht von formal-mathematischen Analysen bis zur Auswertung der experimentellen Implementierungen von Prototypen.

Die *Cyber-Physical-Systems Research Group an der TU Wien* wurde 2012 gegründet und ist der Nachfolger der Real-Time-Systems group, die eine Schlüsselrolle für embedded systems gespielt hat. Auf diesem Fundament ist die Forschergruppe mit den Grundlagen der Auslegung und den Design-Entwürfen für die nächste Generation von embedded systems und vernetzten embedded systems (cyber-physical systems) beschäftigt. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei auf der Spezifikation (z.B. Raum-Zeit-Logik), dem Design (z.B. probabilistische Hybrid-

¹⁵ Hier sind nicht alle österreichischen Gruppen erfasst. Die hier genannten wurden in den Diskussionen der Industrieworkshops öfter als Forschungsspartner genannt und haben eine gute internationale Sichtbarkeit.

systeme), der Analyse (z.B. symbolisches und stochastisches Model-Checking) und der Steuerung (z.B. PID).

Die *Real-time Systems Gruppe* (Leitung: Prof. Eugen Brenner) des *Instituts für technische Informatik an der Technischen Universität Graz* beschäftigt sich mit der Untersuchung von Computer-Architekturen für integrierte Echtzeitsysteme.

Das *Institut für Pervasive Computing an der Johannes-Kepler-Universität Linz*, unter der Leitung von Prof. Alois Ferscha, fokussiert auf Forschung in den Bereichen Software für die mobile, ubiquitäre und embedded systems Architekturen, Koordination und Interaktion (formale Methoden, verteilte Rechen- und Kommunikationsmodelle), Entwicklung verteilter und embedded systems Software, drahtlose Kommunikationssysteme und Kommunikationssoftware, Performance-Analyse und Simulation.

Die *Forschungsgruppe um Prof. Bernhard Rinner an der Universität Klagenfurt* (pervasive computing) konzentriert sich auf die Theorie und Anwendung der verschiedenen Aspekte des Pervasive Computing, insbesondere auf verteilte intelligente Kameras, Sensornetze, Sensorfusion und Embedded-Signalverarbeitung Architekturen.

Der *Forschungsschwerpunkt Computational Intelligence an der TU Wien* (Koordination: Prof. Helmut Veith) beschäftigt sich mit der Entwicklung von Methoden, Wissen formal zu repräsentieren und daraus auf "intelligente" Weise Problemlösungen zu berechnen. Eine Schlüsselrolle kommt dem automatisierten Erwerb, der geeigneten Repräsentation und der automatischen Manipulation von Wissen, sowie den wissensbasierten Mensch-Maschine Schnittstellen zu. Zentrale Themengebiete beinhalten Grundlagen von Datenbanken und Informationssystemen, Wissensrepräsentation und Logik, Hard- und Software Verification (CAV), Semantic Web und Intelligente Agenten, Algorithmen, Komplexität und Optimierung sowie Natural Computing.

Intelligent Software Agents and New Media Group des Österreichischen Instituts für künstliche Intelligenz (ÖFAI) beschäftigt sich unter anderem mit kognitiven Systemen, Softwareagenten und Emotion.

Die *Forscherguppe um Dr. Thomas Henzinger (Präsident des IST Austria)* beschäftigt sich mit mathematischen Methoden zur Verbesserung der Qualität von Software, formaler Verifikation und rigorosen Systementwürfen.

Secure & Correct Systems (TU Graz, Prof. Roderick Bloem) konzentriert sich auf das Design, die Implementierung und Verifikation von sicheren und korrekten Systemen. Sie untersucht drei Hauptthemen:

- Trusted Computing: bewertet und verbessert die Sicherheit eines Systems mit kryptographische Mechanismen in verschiedenen Umgebungen wie Java, virtualisierte Plattformen, mobile Endgeräte und Hardware-Sicherheitsmodule.
- Sicherheitseigenschaften von Advanced Computer Networks. Dazu gehören sichere P2P-Routing und Angriffserkennung.
- Formale Methoden für Entwurf und Verifikation. Dazu gehören Modellprüfung und automatische Synthese von Systemen aus einer in einer zeitlichen Logik gegebenen Spezifikation.

Die Gruppe *Secure Entities for Smart Environments (TU Graz, Prof. Stefan Mangard)* konzentriert sich auf die Gestaltung von sicheren RFID-, embedded- und mobilen Systemen, insbesondere Kryptographie, Seitenkanal -und Fehlerangriffe, Sicherheitsarchitekturen, sowie effiziente Hardware- und Software-Implementierungen von Sicherheitsmechanismen.

Austrian Institute of Technology (AIT) – Business Unit Quantenkryptographie: Im Rahmen der Quantenkryptographie liegt in diesem, von Dr. Martin Stierle geleitetem, Geschäftsfeld der Schwerpunkt auf der Entwicklung von informationstheoretisch hochsicheren Kommunikationsnetzwerken, bei welchen die Gesetze der Quantenphysik für Verschlüsselungsverfahren genutzt werden. Dabei beschäftigen sich die Forscherinnen sowohl mit Algorithmen, die auf Konzepten der theoretischen Quantenphysik basieren, als auch mit hoch-integrierten optischen Bauelementen für die Quanteninformatik. Die wirtschaftliche Anwendbarkeit von quantentechnologisch absolut abhörsicherem Datenaustausch bei öffentlichen Einrichtungen oder Firmen mit mehreren Standorten stellt die Zielsetzung der Forschungstätigkeiten dar.

Die *Software Engineering Gruppe an der Universität Salzburg (Prof. Wolfgang Pree)* erforscht und entwickelt Konzepte, Methoden und Werkzeuge, die in der Konstruktion von Lean Software helfen. Dies umfasst alle Aspekte der Software-Entwicklung, insbesondere Software-Design und Implementierung, Software-Wiederverwendung und Komposition und Programmiermethodik. Derzeit liegt der Fokus der Forschungsarbeiten auf cyber-physical systems, insbesondere im Zusammenhang mit der Verringerung von Treibhausgasemissionen. Davor lag der Schwerpunkt auf der Unterstützung von autonomen Zügen auf freier Strecke.

Die *Industrial Informatics - model-based Architectures Gruppe der TU Graz* entwickelt Modelle von Software in Projekten, die die Komplexität von Anwendungsdomänen beherrschen sollen. Es werden in erster Linie Forschungsprojekte in der modell-basierten Software-Architekturen Gruppe durchgeführt, die folgende Anwendungen untersuchen: generative Ansätze zur Lösung der Probleme auf dem Forschungsgebiet von Software-Produktion, Interpretation von Ansätzen für Software-Architekturen für mobile Grid (und Cloud) Computing.

Die Forschungsgruppe für *Komplexe Dynamische Systeme am Institut für Automatisierungs- und Regeltechnik an der TU Wien (Leitung: Prof. Andreas Kugi)* beschäftigt sich mit der Modellierung, Simulation, Analyse, Optimierung, Steuerung und Regelung komplexer dynamischer Systeme. Die Ziele der Forschung sind in erster Linie Verbesserungen des Systemverhaltens hinsichtlich der dynamischen Eigenschaften, der Genauigkeit, der Robustheit, der Zuverlässigkeit und der Flexibilität. Außerdem werden eine Erhöhung der Produktivität und Ressourceneffizienz (Energie- und Rohstoffeinsatz) sowie eine Minimierung der Kosten beispielsweise durch Einsparung von Sensoren angestrebt. Die Aktivitäten der Gruppe sind darauf fokussiert, dass im Gegensatz zur bloßen Aneinanderreihung von optimierten Teilsystemen der Entwurf eines komplexen dynamischen Gesamtsystems ein durchgängiges 'Denken in Systemen' erfordert. Daher sind eine systematische Analyse und ein umfassendes Verständnis der Wechselwirkungen von der Konstruktion über die Aktorik und Sensorik bis hin zur informations- und automatisierungstechnischen Umsetzung integraler Bestandteil unserer Forschungsaktivitäten.

Die *Forscherguppe um Prof. Christian Bettstetter (Universität Klagenfurt und Lakeside Labs)* und sein Team erforschen die Gestaltung, Modellierung und Analyse von vernetzten Kommunikationssystemen, mit einem Fokus auf mobile und drahtlose Vernetzung. Aktuelle Projekte befassen sich mit kooperativer Weiterleitung und Dynamik Störungen in drahtlosen Netzwerken, selbstorganisierende Synchronisation und Kommunikation und Koordination für fliegende Roboter.

5. Technologie-Roadmap

5.1. Aktuelle Trends im Bereich Computing und sozio-ökonomische Trends

IK-Technologie entwickelt sich aufgrund globaler Trends, ist aber dabei auch selbst Treiber dieser Trends. Dies gilt sowohl für makroökonomische als auch für soziale Entwicklungen. Auch österreichische Unternehmen sind eng mit diesen globalen Trends verbunden. Die IKT-Märkte sind besonders globalisiert. Sie sind im hier angesprochenen Themenfeld von besonderer Bedeutung, weil aufgrund der hohen Kosten die IKT-Industrie bemüht ist, Lösungen für komplexe IKT-Systeme möglichst weltweit zum Einsatz zu bringen. Umgekehrt bedeutet dies natürlich, dass Lösungen für diese Bereiche auch weltweit Chancen für Österreichs Unternehmen eröffnen.

Ein wichtiger globaler Trend¹⁶, der vor allem in den großen Ballungszentren in Asien, Amerika und Afrika deutlich wird, ist die zunehmende *Urbanisierung*. Immer mehr Menschen leben in Städten. Damit steigen einerseits die Möglichkeiten zum effizienten Zusammenwirken von Menschen in Unternehmen und nicht-kommerziellen Organisationen, sie bedürfen aber auch einer Unterstützung durch Infrastruktur. Dies betrifft Transportsysteme, aber auch Kommunikationsnetze, Energienetze, einfach alle Systeme, die das Leben in der Stadt ermöglichen. Das Schlagwort von „Smart Cities“ ist dabei besonders wichtig geworden, weil der intelligente Umgang mit Ressourcen eine wichtige Bedingung für Nachhaltigkeit ist. IKT-Systeme unterstützen diese Intelligenz vor allem im Bereich der Infrastruktur, können aber auch auf individueller Ebene das Zusammenleben der Menschen erleichtern. Komplexe IKT-Systeme sind daher nicht nur in der kritischen Infrastruktur, sondern auch in sozioökonomischen Systemen zu finden.

Eng mit der Urbanisierung ist auch das steigende Bedürfnis nach *Mobilität* verbunden. Immer mehr Menschen und Güter müssen innerhalb und zwischen Städten transportiert werden. Zahlreiche neue Hochgeschwindigkeits-Zugverbindungen belegen diesen Bedarf ebenso wie hochentwickelte Logistik-Systeme, die immer mehr Waren in immer kürzerer Zeit an eine steigende Zahl von Empfängern liefern. Der Revolution des Einkaufens im Internet stehen auch auf Unternehmensseite viele neue Dienste gegenüber, die dafür sorgen, dass Unternehmen rechtzeitig und „just-in-time“ mit Waren, Ersatzteilen, Zubehör, Bauteilen und Rohstoffen versorgt werden. Einige dieser Prozesse sind bereits heute vorausschauend und

¹⁶ Vgl. z.B. Frost & Sullivan, *Mega Trends, Asia Pacific Market Insights*, 2011.

adaptiv gestaltet und vernetzen vor allem Maschinen, um rechtzeitig einen auftauchenden Bedarf abzudecken.



Abbildung 15 Wichtige sozio-ökonomische Trends (Quelle: eutema 2014)

Dass diese Entwicklungen einen Anstieg des Energiebedarfs zur Folge haben, liegt auf der Hand. Steigende Energiepreise und politische Entscheidungen haben dazu geführt, dass viele Länder ihre Energiepolitik stärker auf alternative Energiequellen ausgerichtet haben. Dies bedarf allerdings eines dramatischen Umbaus der Energienetze in Richtung bidirektionaler, intelligenterer Netzwerke, sogenannter *Smart Grids*. Diese können zusätzlich auch einer verbesserten Kontrolle des Verbrauchs, aber auch der Produktion dienen. Zahlreiche Komponenten, Teilnetze, neue Dienste und Produkte stellen komplexe Systeme dar, von denen die meisten auch sicherheitskritisch sind. Dieser Bereich ist daher von steigender Bedeutung für das Themenfeld und zugleich Treiber wie auch Enabler.

Die Nutzer der IKT-Systeme der Zukunft werden *heute junge Generationen von Menschen* sein, die den Umgang mit digitalen Systemen, dem Internet, Apps und einer beinahe allzeit verfügbaren Konnektivität seit ihrer Geburt gewöhnt sind. Sie haben hohe Anforderungen an IKT-Systeme und –Dienste, sowohl als Privatnutzer wie auch als Mitarbeiter oder Leiterinnen von Unternehmen. Sie sind als Kunden oder Auftraggeber häufig Ursache des Trends zu heterogener Systemintegration, z.B. zur Anbindung mobiler Endgeräte auch an Altsysteme.

Dieselbe Generation von Nutzerinnen ist es auch, die es immer mehr gewohnt wird, Produkte nicht im Eigentum zu erwerben, sondern für die Nutzungsdauer zu mieten. Dies ist heute vor allem im Tourismus und in der Mobilität zu beobachten, wo genau aber in Zukunft die Grenzen zu ziehen sein werden ist offen. Gemeinsam mit dem Trend zu sinkenden Grenzkosten der Produktion durch die allgemeine Effizienzsteigerung in der Produktion, aber auch durch neue Produktionstechnologien wie z.B. 3D-Drucker, lässt sich in Teilbereichen der Wirtschaft schon heu-

te eine *Ökonomie des Überflusses* beobachten.¹⁷ Die Auswirkungen sind im IKT-Bereich schon länger bekannt, weil Software zu den ersten Produkten mit Null-Grenzkosten gehört. Es bleibt abzuwarten, in wie vielen Wirtschaftsbereichen diese Ökonomie Platz greift und wie sie sich auswirkt. In vielen traditionellen Branchen wie z.B. der Musikindustrie und im Buchhandel hat die Digitalisierung von Gütern, deren Verkauf und Zustellung über das Internet sowie der online-Handel konventioneller Güter jedenfalls bereits dramatische Veränderungen herbeigeführt.

Zuletzt ist auch noch darauf hinzuweisen, dass die *Vernetzung unserer Gesellschaft* massiv voranschreitet. Es sind nicht nur immer mehr Menschen in sozialen Netzen und durch mobile Geräte untereinander verbunden, sondern Millionen von technischen Geräten sind ebenfalls über das Internet oder andere Technologien miteinander und mit den Menschen verbunden. Dieses gigantische Netzwerk ist jedenfalls ein komplexes System, dessen verlässliches Management, seine Sicherung und dessen Nutzung zum Wohl der Gesellschaft eine der vielleicht größten Herausforderungen der Zukunft darstellt. Dies schließt auch den Umgang mit der von Menschen und Maschinen genierten Datenflut – Stichwort Big Data – ein.

Neben diesen sozioökonomischen Trends, sind aber auch die Entwicklungslinien innerhalb der IKT ein wichtiger Technologietreiber.

Ein wichtiger Trend im Grundlagenbereich ist *“more with less“*, d.h. der Versuch immer mehr Leistung mit immer weniger Ressourcen zu erzielen. Dies hat einerseits mit gestiegenen Kosten für den Energieverbrauch von Rechensystemen zu tun, andererseits auch mit der Knappheit anderer Ressourcen (z.B. Rohstoffe). Der gegenwärtige Trend besteht in der Nutzung von multicore-Technologie oder im Gebrauch von Beschleunigern wie z.B. GPUs¹⁸, um energieeffiziente Systeme zu erzielen. Ein dritter Ansatz ist die Kombination dieser beiden Methoden (heterogene Methoden). Dieser Wechsel von seriellen zu vermehrt parallelen Rechnern ist allerdings ein fundamentaler Paradigmenwechsel, der mit zahlreichen theoretischen und praktischen Problemen verbunden ist. Auch in den nächsten Jahren werden daher effizienter Entwurf und die Programmierung von Multicore-Systemen große Herausforderungen bleiben. Diese Herausforderungen liegen in der Entwicklung von Bibliotheken und Werkzeugen, neuen Programmiermodellen, besser skalierbaren Algorithmen und Laufzeitumgebungen sowie im Bereich fehlertoleranter Systeme. Im Bereich der Hardware sind vor allem neue Materialien, neue Methoden des Datentransfers (z.B. Photonik) und neue Herstellungsverfahren zu erwarten.

¹⁷ Jeremy Rifkin in seinem Vortrag zu *Vision 2050 – Chancen für Österreich im Parlament im Mai 2014*. Vgl. auch J. Rifkin, *Die dritte industrielle Revolution: Die Zukunft der Wirtschaft nach dem Atomzeitalter*, campus Verlag, 2011.

¹⁸ *Graphical Processing Units*

Günstigere Hardware, die Verbreitung des Internet und von mobilen Geräten hat auch Design, Produktion und Vertrieb von Software verändert. User erwarten heute extrem performante Systeme, die zuverlässig und anpassbar funktionieren. Der Trend geht weiter in Richtung einer *breiten Verfügbarkeit von Software-Komponenten* und einer Aufteilung auf kleine, spezialisierte Anwendungen. Dies führt zu steigender Komplexität beim User, aber auch beim Entwickler: die Zertifizierung wird wichtiger, aber schwieriger und die Zusammenarbeit zwischen Software-Komponenten bedarf neuer Mechanismen. Der Trend geht hier langfristig zu semantischer Interoperabilität.

Offene und Selbstbau-Ansätze werden auch im Software Design immer wichtiger. Zukünftige Methoden werden in Bezug auf die verwendeten Modelle und Sprachen viel flexibler als heute sein müssen – und zwar über einen breiten Bogen von formal bis halb-formal. Der Trend zu verteilten Entwicklerteams wird sich fortsetzen, was den Bedarf für die Unterstützung von Komponenten-Ansätzen erhöht. Dies stellt nicht nur hohe Anforderungen an Entwurfsumgebungen bis hin zu integrierten Werkzeugen, die auch testen unterstützen, sondern hat auch Konsequenzen im Bereich der Zertifizierung, der Standardisierung von Schnittstellen oder der Verfolgbarkeit von Komponenten.

Cloud computing und hybride Ansätze werden auch weiterhin zunehmen. Der Bedarf nach Auslagerung von Rechendienstleistung an die Cloud ist ungebrochen stark, weil diese Dienste eine Reihe von klaren Vorteilen versprechen: sie sind nach Bedarf abrufbar bzw. erweiterbar; sie können auch nach Bedarf zugekauft werden – ohne große Infrastruktur oder Software erwerben und warten zu müssen; sie sind meist ohne großen Aufwand skalierbar und können dem Bedarf auch dynamisch angepasst werden; sie dienen der optimalen Ressourcennutzung und ermöglichen ortsunabhängigen Zugang. Wichtige Trends sind auch hier zunehmende Interoperabilität, nahtlose Elastizität und die Möglichkeit, Ressourcen unter verschiedenen Usern aufzuteilen (Multi-Tenancy).

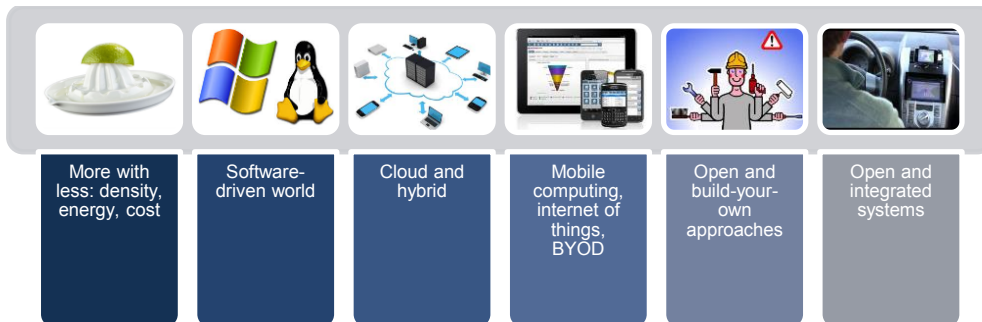


Abbildung 16 Wichtige IKT-Trends (Quelle: eutema 2014)

Durch den Preisverfall bei mobilen Geräten und die breite Verfügbarkeit von mobilem Internet wird auch der Trend zu IT-Mobilität fortschreiten und viel stärker als bisher auch im beruflichen Alltag und sogar in der Industrie eine Rolle spielen. Der Trend zur Konvergenz von Hard- und Software wird sich fortsetzen. Im zukünftigen Netz von Milliarden Endgeräten werden diese Grenzen endgültig verschwimmen. Derartige Systeme benötigen Werkzeuge und Methoden im Bereich der System-Simulation, der Überwachung und damit der vorausschauenden Wartung sowie der Performanz-Überwachung. In derartigen Systemen sind Daten-getriebene Softwaretests beinahe unmöglich. Auch wird es nötig sein, neben harten Echtzeitsystemen auch gemischte Hard/Soft-Realtime Ansätze zu verfolgen.

5.2. Österreichische Roadmap „Komplexe IKT-Lösungen beherrschen“

Die aktuellen gesellschaftlichen Trends sowie die Entwicklungslinien im Bereich der IKT setzen den Rahmen für die österreichische Roadmap für das Themenfeld „Komplexe IKT-Lösungen ermöglichen“. Die Roadmap ist als am Ende dieses Abschnitts dargestellt. Sie orientiert sich der Zielsetzung dieser Studie gemäß stark an den Bedürfnissen der österreichischen Industrie. Sie wurde in enger Abstimmung mit Vertretern österreichischer Unternehmen entwickelt und von Experten aus Wissenschaft und Forschung validiert.

Die Roadmap beleuchtet das Themenfeld aus dem Blickwinkel der Teilthemen

- Autonome Systeme
- Adaptive Systeme
- Rigoroser Systementwurf
- Verlässlichkeit und Stabilität

- Systemevolution
- Plattformen, Standardisierung, Regulierung und Infrastruktur

Der gewählte Zeitraum für die Roadmap enthält sowohl kurzfristig wichtige Meilensteine (ab 2015) als auch langfristige Ziele (bis 2030 und darüber hinaus). Diese Meilensteine sind als Projektionen zu verstehen, um das Ziel „komplexe IKT-Lösungen beherrschen“ zu erreichen. Diese Meilensteine werden heute zum Teil bereits erforscht, bedürfen aber weiterer F&E-Aktivitäten, um zu industriell einsetzbaren, befriedigenden Lösungen zu kommen. Sie stellen somit für die österreichische Industrie und IKT-Forschung wichtige F&E-Teilthemen dar, die im Einzelnen auch in weiterführenden Projekten genauer erarbeitet werden müssen. Die Roadmap-Komponenten sind in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

5.2.1. Autonome Systeme

Der starke Automotive-Schwerpunkt der österreichischen Industrie sowie der starke industrielle und wissenschaftliche Produktions-Schwerpunkt bedeuten ein nahe liegendes strategisches Interesse an autonomen, d.h. selbstgesteuerten Systemen.

Im Automotive-Bereich stellen damit zunächst selbstgesteuerte Fahrzeuge einen wichtigen F&E-Schwerpunkt dar, der auch zunehmend für die Zulieferindustrie von großer Bedeutung ist. Autonomie bzw. Teilautonomie findet sich aber auch in Teilaspekten wie z.B. Aufbauten und Zubehör (z.B. Kräne). Das Gebiet ist sowohl für die traditionellen KFZ-Zulieferer interessant, soll aber auch im Sinne von Schienenfahrzeugen, Luftfahrzeugen etc. verstanden werden. Teilautonomie (z.B. autonome Abstandskontrolle ist heute schon serienmäßig realisiert, aber noch nicht perfektioniert). Daher ist das Thema mit einem relativ frühen Zeithorizont (Jahr 2020) positioniert.

Autonomie spielt naturgemäß in der Robotik eine besonders prominente Rolle. Für selbstgesteuerte, mobile Robotersysteme ist die Autonomie traditionell wichtig, aber auch Produktionsrobotersysteme werden zunehmend autonom. Noch einen Schritt weiter gehen kollaborative Robotersysteme, die autonom zur Erreichung eines gemeinsamen Ziels zusammenarbeiten.

Im Bereich des Maschinenbaus, bzw. allgemeiner in der Produktion steigt der Bedarf nach Systemen, die vorausschauend gewartet werden können, bzw. sogar autonom ihre eigenen Wartungsbedarf überwachen. Erste einfache Konzepte für predictive maintenance existieren bereits. Es ist aber zu erwarten, dass hier sowohl (technisches) Angebot als auch Nachfrage deutlich zunehmen. Eine wichtige Herausforderung besteht auch in der autonomen Korrektur von Drift, Kalibrierung

oder allgemeiner Selbstheilung (z.B. als Reaktion auf Abnutzung oder Teilausfall von Komponenten).

Auch innerhalb von Forschung und Entwicklung wird mittelfristig mit einem noch stärkeren Einsatz von Robotersystemen, z.B. durch fortgeschrittene Serviceroboter zu rechnen sein. Dies betrifft sowohl industrielle Umgebungen (z.B. in der Produktion oder im Labor) als auch den Pflegebereich (in Pflegeeinrichtungen und zu Hause). Hier liegen allerdings noch große Herausforderungen, weshalb die Roadmap einen Zeithorizont von 2025 und danach aufweist.

Im Management- aber auch im privaten Bereich sind hier vor allem leistungsfähige digitale Assistenten zu erwarten. Diese stellen sich nicht auf die Präferenzen ihrer Systemumgebung und Nutzer ein, sondern können einen Teil ihrer Aufgaben selbstständig ausführen. Dazu gehört auch das selbständige Erforschen von Problemlösungen (z.B. durch Internet-Recherche). Diese Systeme werden in so unterschiedlichen Gebieten wie Reiseplanung, Termin- und Aufgabenmanagement oder Übersetzung eingesetzt und miteinander kombiniert. Auch hier gibt es ein potenziell breites Einsatzgebiet und z.T. erste in eingeschränkten Domänen gut funktionierende Lösungen. Dennoch erwarten die Experten mächtigere digitale Assistenten hoher Autonomie erst ab ca. 2020-2025.

Eine wichtige nicht-technische Voraussetzung für einen entsprechenden Markterfolg besteht neben akzeptierten Standards auch in einem klaren regulatorischen Rahmen. Auch wenn zu erwarten ist, dass hier vieles im internationalen Kontext entworfen und umgesetzt wird, sind Regelung und Standardisierung auch aus österreichischer Perspektive wichtig. Dies gilt sowohl für österreichische Binnenstandards als auch für Beeinflussung internationaler Standards und Regeln. In der Roadmap sind die entsprechenden Meilensteine zeitlich hoch priorisiert (ab 2015), weil sie aus Sicht der Industrie wichtige Vorbedingungen für erfolgreiche Innovation darstellen.

Insgesamt wird vor allem das Thema autonomes Fahren auch zu Investitionen im Bereich der Verkehrsinfrastruktur führen. Dies gilt zunächst für den Straßenverkehr, aber auch für andere Verkehrsmittel, z.B. Schienenfahrzeuge.

An technischen Voraussetzungen für autonome Systeme sind vor allem zu nennen:

- Fortgeschrittene Geräte im gemischt analog/digitalen Bereich
- Energie-effiziente Prozessoren und Speicher
- Autonome Datenzentren

Als besonders langfristiges Ziel gehört dazu auch Software, die autonom entsteht, z.B. nur aus vorhandenen Beispielen oder durch Feedback-Signale lernt. Obwohl

dieses Thema schon seit längerer Zeit Gegenstand von Forschungsarbeiten ist, bleibt es ein langfristiges und schwieriges Gebiet (mit Zeithorizont nach 2030). In eingeschränkten Domänen könnte es aber schon davor wichtige industriell relevante Ansätze geben (z.B. Robotik-Programmierung).

5.2.2. Adaptive Systeme

Systeme, die sich ihren Umweltbedingungen anpassen, sind kurzfristig vor allem im Bereich von natürlichen Mensch/Maschine-Schnittstellen zu erwarten. Diese Systeme sind in der Lage, sich auf die Präferenzen und Eigenheiten der Benutzer einzustellen. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn die Interaktionen besonders komplex werden, wie z.B. bei fortgeschrittenen mixed reality Geräten, bei immersiven (also sensorisch reichhaltigen) bzw. intelligenten Benutzerschnittstellen. Aus der Sicht der Industrie sind natürliche Interfaces aber weiterhin ein vorrangiges – und auch kurzfristig erreichbares Ziel mit einem Zeithorizont ab 2015. Allerdings sind dem Problem kaum Grenzen gesetzt und wirklich sensorisch reichhaltige Schnittstellen werden erst ab 2025 als wichtiges Forschungsthema erwartet.

Eine allgemeinere Formulierung des Problems stellen adaptive Kontrollsysteme dar (ab 2015), die auch als Vorstufe zu komplexeren, intelligenten und vernetzten Cyber-physical Systems anzusehen sind (smart networked CPS). Diese stellen eine Vorstufe zu massiv parallelen CPS dar, bei denen viele Rechenkerne onboard arbeiten – und dabei jeweils in der Lage sind, hochgradig effektiv parallel zu arbeiten. Dies stellt allerdings einen schwierig zu erreichenden Meilenstein dar (Zeithorizont 2025 und danach), für den zunächst noch für einzelne Teilbereiche Lösungen gefunden werden müssen (siehe auch nächster Abschnitt).

5.2.3. Rigoroser Systementwurf

Neue, effiziente und zuverlässige Methoden für den Systementwurf stellen ein wichtiges aktuelles und zukünftiges Forschungsgebiet dar. Die Treiber hinter dieser Technologie sind dabei nicht nur zunehmende Komplexität der Systeme, sondern auch gestiegene Anforderungen (Funktion, Vernetzung, Sicherheit) und mangelnde Verfügbarkeit von Personal (Analyse, Entwurf, Implementierung, Test).

Neben der zunehmenden Wichtigkeit von kontinuierlicher Verifikation bei Entwurf und Implementierung, stellt vor allem die effektive Nutzung der zunehmenden Parallelität der Rechensysteme neue Herausforderungen an den Systementwurf. Die effiziente Nutzung von Multicore-Systemen stellt aktuell eine nur unzureichend gelöste Aufgabe dar, die viele praktische negative Konsequenzen hat und in der Regel zu einer ineffizienten Systemnutzung führt. Für abgegrenzte Domänen bzw.

Einsatzszenarien oder Spezialfälle sind Lösungen ab sofort (Zeithorizont 2015) zu erarbeiten.

Ein besonderer Bereich im sicherheitskritischen Bereich stellt die Zertifizierung von Teilsystemen dar, sowie die Zusammenführung von teil-zertifizierten Systemen zu Gesamtsystemen mit zertifizierbaren Eigenschaften. Dieses Gebiet ist sowohl für die Grundlagenforschung als auch die Industrie von großem Interesse. Dennoch kann mit größeren Forschungsanstrengungen und Teilerfolgen erst ab 2025 gerechnet werden, weil dieses Thema auch stark von internationaler Regulierung und Standardisierung beeinflusst wird.

Auch in Österreich ist von der zunehmenden Wichtigkeit von Modellierung und Simulation auszugehen. Innovationen sind vor allem im Bereich der Echtzeitfähigkeit, der Nutzung von Cloud-Ressourcen (sowie deren Kombination) und in neuen Algorithmen für die Echtzeitinteraktion zu erwarten. Beispiele sind Algorithmen für interaktive Echtzeitvisualisierung von komplexen Geometrien und effiziente Algorithmen für virtuelle Sensorik in Echtzeitanwendungen.

5.2.4. Verlässlichkeit und Stabilität

Die österreichische Industrie hat in den Untersuchungen zu dieser Studie immer wieder betont, dass die Aspekte Safety, Security, Dependability nicht nur immer wichtigere Systemanforderungen darstellen. Sie sind auch ein wesentlicher Treiber der Systemkomplexität bzw. stark von der Systemkomplexität abhängig. Zusätzlich stellen sie beim heutigen Stand der Technik ein wesentliches Hindernis für die Verbreitung mancher existierender Technologie dar.

Aus praktischer Sicht besteht ein Mangel an speziellen Methoden und Werkzeugen im Bereich des Security Testing. Die Beherrschung mehrerer Security-Ebenen ist heute nur sehr eingeschränkt möglich. Beide Themen stellen aber wichtige Forschungsprioritäten mit relativ kurzen Zeithorizonten (ab 2015) dar.

In der Cloud ist von zunehmender Verbreitung sicherer Datenzentren sowie mit einer steigenden Nutzung zu rechnen, auch wenn hier immer wieder Rückschläge aufgrund kompromittierter Systeme zu erwarten sind. Die Entwicklung von Systemen, die besser gegen Cyber-Attacks geschützt sind, wird an Bedeutung zunehmen. Eine steigende Anbindung an die Cloud wird sogar für Echtzeitsysteme zu erwarten sein, soweit die Sicherheitsaspekte beherrschbar bleiben (2020-2025).

Sowohl Bedingung als auch Konsequenz zunehmender Miniaturisierung, Safety und Security sind implantierbare und tragbare Rechensysteme. Sie sind heute vor allem im Gesundheits-, Fitness- und Sportbereich wichtig, werden aber zunehmend in andere Bereiche vordringen. Sie werden in einfacher Form, bzw. auf der Basis bewährter Lösungsansätze schon heute vermarktet oder innoviert, werden

aber nach unserer Einschätzung vor allem mittelfristig (Zeithorizont ab 2020-2025) verstärkt das Interesse von Forschern aus der Industrie finden.

5.2.5. Systemevolution

Die Weiterentwicklung von Systemen, sei es selbständig oder durch systematisch unterstützte Entwicklertätigkeit, stellt eine kontinuierliche Herausforderung in sich ändernde Systemumgebungen dar. Auch in Österreich ist die Industrie mit der Wartung von Altsystemen beschäftigt, die z.B. aus Sicherheits-, Effizienz- oder Kostengründen nicht einfach neu implementiert werden können. In diesem Bereich gibt es derzeit nur sehr wenig Forschung und Entwicklung, obwohl allein die bestehende Zahl von Altsystemen die Erforschung neuer Ansätze durchaus rechtfertigen würde.

Eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von Cyber-physikalischen Systemen stellen intelligente Sensoren dar. Dabei geht es nicht nur um Miniaturisierung und neue physikalische Messprinzipien, sondern vor allem um zunehmende Intelligenz, d.h. Anpassungsfähigkeit, Verarbeitungskomplexität etc. der Sensorsysteme. Dies ist bereits ein aktuelles Forschungsgebiet und bleibt im Fokus der Industrie (Zeithorizont ab 2015).

Eine weitere Grundlage liegt im Bereich der Konnektivität – hier ist auch 6G zu nennen, das derzeit noch nicht spezifiziert ist und daher erst in ca. 5-10 Jahren Forschungsgegenstand wird.

Im Bereich der Evolution von Systemen kann das Internet eine große Rolle spielen, indem Ressourcen online zur Verfügung gestellt werden. Hierfür sind allerdings offene Schnittstellen auch im Bereich von Services notwendig. Open Source Standards – zumindest innerhalb der EU – können hier auch einen wichtigen Beitrag leisten. Dies ist zum Teil schon Gegenstand von einzelnen Projekten. Ein weit verbreitetes industrielles Interesse an diesem Thema erwarten wir mittelfristig ab ca. 2020.

5.2.6. Plattformen, Standardisierung, Regulierung und Infrastruktur

Es ist zu erwarten, dass der Trend für viele Anwendungen komplexer IKT-Systeme in Richtung Plattformen geht. Wir gehen davon aus, dass viele unterschiedliche kommerzielle Plattformen entstehen, so wie Apple etwa aus dem Nichts die iPhone-App-Plattform geschaffen hat. Viele Experten erwarten z.B. dass führende Unternehmen Plattformen zur Steuerung von HomeDevices schaffen werden (z.B. Apple, Google). Ein weiteres Beispiel wäre von Google als neuem Autohersteller zu erwarten. Eine Google-Autoplattform würde diverse Services (Maps, Uber, an-

dere SmartPhone-Apps) und Devices (völlig autonome Elektrofahrzeuge) zu einer AutonomousMobility-Plattform kombinieren. Die Wertschöpfung in derartigen Plattformen ist potenziell riesig, weil eine enorme Systemabhängigkeit gegeben ist und überaus unterschiedliche Wertschöpfungsbereiche kombiniert werden (vom KFZ-Bau bis zur IT-Dienstleistung).

Ein wichtiges strategisches Ziel könnte sein, dass die einzelnen Forschungsbeiträge zur Schaffung von völlig neuen Plattformen beitragen. Europa verfügt derzeit über eine ausgesprochene und z.B. von der EU-Kommission identifizierte Schwäche im Bereich solcher kommerziell zunehmend wichtigen Plattformen.

Die bereits erwähnten Themen Standardisierung, Regulierung und Infrastruktur sind eigentlich für alle erwähnten Aspekte komplexer IKT-Systeme relevant. Österreich ist nicht in allen Bereich bloßer Standard-Nehmer, sondern arbeitet aktiv an der Entwicklung auch internationaler Normen mit (z.B. Smart Cards).

Alle drei Aspekte stellen die Industrie – vor allem aber natürlich kleinere Unternehmen vor große Herausforderungen. Sie sind mit langwierigen, überaus technischen Verhandlungen verbunden, die aber zumeist im Forschungs- und Entwicklungssektor nur auf wenig Interesse stoßen. Normen stellen aber eine der wichtigsten Rahmenbedingungen für Innovation dar. Als Beispiel sei hier der Bereich schienengebundener Verkehrsmittel genannt, der äußerst strikt genormt und gesetzlich geregelt ist. Theoretisch ist das autonome Fahren auf Schienen ein einfacheres technisches Problem als das autonome Fahren auf der Straße. In der Praxis ist aber schon ein Probetrieb zu Testzwecken mit überaus großen Regelungshürden versehen. Dennoch sind allgemein akzeptierte Industrienormen und klare gesetzliche Regelungen eine wichtige Voraussetzung für die technologische Entwicklung.

5.2.7. Gesamtdarstellung

Die folgende Abbildung bietet einen Überblick über die in diesem Abschnitt erwähnten Meilensteine auf dem Weg zur besseren Beherrschung von komplexen IKT-Systemen. Diese Darstellung ist das Ergebnis der Expertenworkshops und fasst die Diskussionen und Einschätzungen der Vertreterinnen und Vertreter aus Industrie und Wissenschaft zusammen. Die abgebildeten Punkte stellen IKT-Forschungsthemen als Meilensteine dar, die erreicht werden sollten, um wichtige Fortschritte auf diesem Gebiet zu machen. Sie sind daher keine Voraussagen über die Zukunft, sondern sollten als Entscheidungshilfe für die Orientierung von IKT-Forschungsstrategien dienen. Die angegebenen Zeithorizonte ordnen die Themen so, dass aus der Sicht der Unternehmen besonders drängende Problembereiche früher (also weiter im Zentrum der Roadmap mit Zeithorizont ab 2015) dargestellt

sind. Themen mit längerfristigen Zeithorizonten liegen hingegen in den äußeren Bereichen der Darstellung (Zeithorizont 2030 und danach).

Die Verbindungslinien zwischen einigen Meilensteinen weisen auf logische Abhängigkeiten hin, z.B. stellen Adaptive Kontrollsysteme eine wichtige Voraussetzung für intelligente, vernetzte cyber-physikalische Systeme dar.

Die grünen Meilensteine dienen nur beispielhaft der Verortung von nicht-Forschungsthemen (z.B. Standards). Sie sind für viele der Meilensteine relevant. Sie wurden aber in den Expertinnen-Workshops als besonders wichtig erachtet und sollten daher in der Roadmap repräsentiert werden, auch wenn sie ein Querschnittsthema darstellen.

Die Einschätzung der Meilensteine als potenzielle Fortschritte mit mittlerem (gelb) und hohem (rot) Impact ist sicherlich nur als Näherung zu verstehen, ebenso die Einschätzung des nötigen Aufwands, die betreffenden Meilensteine zu erreichen. Aus strategischer Sicht sollten natürlich die kleinen (günstig zu erreichenden) roten (hoher Impact) Meilensteine von besonderem Interesse sein.

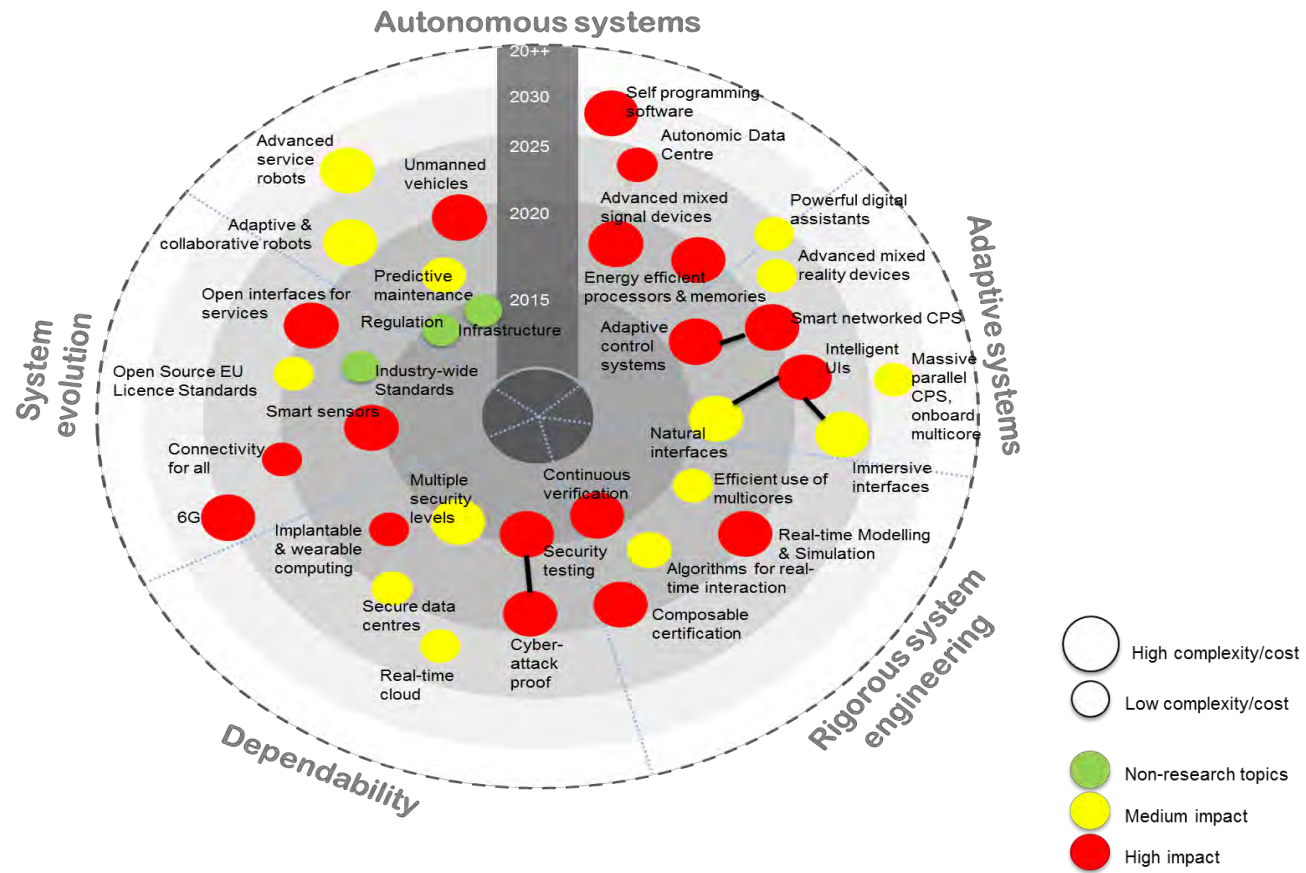


Abbildung 17 Roadmap komplexe IKT Lösungen

6. Empfehlungen

Österreich verfügt grundsätzlich über eine hervorragende Ausgangsposition für erfolgreiche Technologieinnovationen im Bereich komplexer IKT-Systeme. In früheren Studien wurden der österreichischen IKT-Forschung Stärken in den Bereichen Mikroelektronik, Echtzeitsysteme und sichere Systeme attestiert.¹⁹ Diese stellen auch wichtige Grundlagen für die Beherrschung komplexer IKT-Systeme dar.

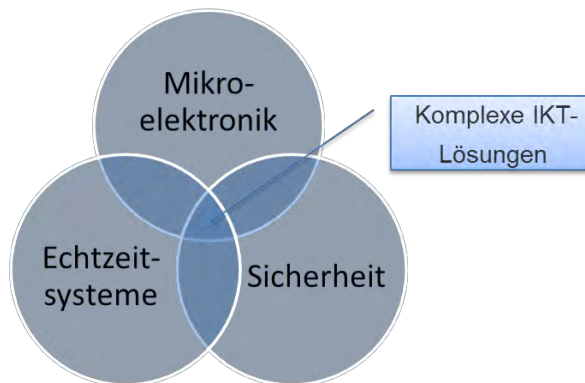


Abbildung 18 Im Schnittpunkt bekannter österreichischer Kompetenz-Stärkefelder wie Mikroelektronik, Echtzeitsysteme und IT-Sicherheit liegen wichtige Kompetenzen für die Erstellung von Lösungen für komplexe IKT-Systeme (Quelle: eutema 2014).

Strategische technologiepolitische Ziele können daher sein:

- Weitergehende Sicherung der bestehenden Stärken Österreichs im Themenfeld Echtzeitsysteme mit seinen Anwendungen z.B. in Automotive, Aeronautik. Das Themenfeld zeichnet sich nach wie vor durch sehr hohe Qualität in Industrie und Wissenschaft aus.
- Verbesserung der internationalen Sichtbarkeit dieser Stärke und Nutzung für die Beseitigung bestehender Schwächen bzw. Risiken (z.B. im Bereich Personal, Innovation ggf. auch Risikokapital)
- Die österreichischen Stärken im Bereich sicherer Systeme sind vor allem in einigen Teilbereichen (z.B. Smart Cards) besonders deutlich. Diese Stärken könnten noch stärker als bisher mit den bestehenden Stärken im Bereich Embedded Systems verbunden werden.
- Die starke österreichische Szene im Bereich Mikroelektronik hat Schwerpunkte im Bereich Leistungselektronik, aber auch im Sicherheitsbereich. Auch diese

¹⁹ Prem et al. Grundlagen einer IKT-Forschungsstrategie für Österreich, eutema, Wien 2007.

Stärken sollten weiterhin gepflegt und für den Bereich komplexe IKT-Systeme genutzt werden. Hier bedarf es allerdings noch einer ausgeprägten Zusammenarbeit der verschiedenen Akteure.

Gegenstand der vorliegenden Analyse war es, neben der Entwicklung einer für Österreich spezifizierten Roadmap für den Technologiebereich komplexer IKT Lösungen (complex systems), Empfehlungen für eine entsprechend optimierte Förder-/FTI-Politik sowie die Gestaltung der allgemeineren Rahmenbedingungen zu entwickeln. Daher verweisen die im Folgenden diskutierten Handlungsoptionen und -empfehlungen auch auf zwei Quellen: dem Bedarf, der aus den notwendigen technologischen Entwicklungsschritten im Forschungsfeld complex systems entsteht und den konkreten Forderungen relevanter Organisationen (insbesondere Unternehmen) an die Akteure des politischen Systems.

6.1. Strategische Ebene

Die im österreichischen politischen System nach wie vor vorherrschende, und durch die FTI-Strategie des Bundes bislang auch nur teilweise überwundene, Versäulung der relevanten Politikbereiche erscheint gerade vor dem Hintergrund einer so genannten Querschnittstechnologie wie IKT als nicht länger zeitgemäß. Eine intensivere Koordination von Politikbereichen wie Standortpolitik (und allgemeiner Wirtschaftspolitik), FTI-Politik und vor allem Bildungspolitik (hier vor allem auch: Stärkung der Infrastruktur und Personalkapazitäten an den Hochschulen) sollte daher mittel- bis langfristig adressiert werden.

Für die Technologieentwicklung ist dabei auch die Rolle von Regulation und Standardisierung nicht zu unterschätzen, etwa im Bereich autonomer Fahrzeuge, deren Entwicklung wesentlich von komplexen IKT-Lösungen getragen wird. In diesem Zusammenhang wird mittel- bis langfristig die stärkere Berücksichtigung von Standardisierungsprozessen in der FTI-Politik sowie den Förderinstrumenten der FFG empfohlen. Insbesondere Unternehmen betonen die Bedeutung solcher Prozesse für die langfristig erfolgreiche ökonomische Verwertung ihrer Entwicklungen und damit für die Wettbewerbsfähigkeit Österreichs in den entsprechenden Sektoren wie Maschinenbau, Anlagenbau etc. Mögliche Ansätze umfassen die Entwicklung und Implementierung eines entsprechenden Förder- bzw. Unterstützungsprogramms sowie die dezidierte Honorierung der Teilnahme an Standardisierungsprozessen im Rahmen eines geförderten F&E Projekts. Bereits geförderte F&E Projekte sollten, in Kooperation mit den Fördernehmern, auf mögliche Beiträge zur Standardisierung überprüft werden bzw. hinsichtlich potenzieller Konflikte mit bestehenden oder sich in Entwicklung befindenden Standards analysiert werden, um

zu verhindern, dass der erzielte technologische Fortschritt sich mittelfristig als ökonomisch wenig wertvoll erweist bzw. um den wirtschaftlichen Erfolg der Förderung abzusichern.

Eine bislang kaum realisierte Möglichkeit der Unterstützung österreichischer Unternehmen und Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet komplexer IKT-Lösungen besteht in nachfrageorientierte Politik. Darunter ist vor allem das stärkere Engagement der öffentlichen Beschaffung als Instrument der Nachfragesteigerung zu verstehen. Eine stärkere Nutzung der Beschaffung als FTI-politisches Instrument könnte sowohl im Rahmen der normalen Beschaffungswege erfolgen als auch über das Instrument des *pre-commercial procurements*. Langfristig sollten beide Instrumente eingesetzt werden, um einerseits einen Bedarf des Staates mithilfe innovativer Lösungen zu decken und andererseits Nachfrage für bereits geförderte Innovationen zu schaffen bzw. Handhabbarkeit und Performanz einer geförderten Innovation über die Beschaffung an den Markt und damit andere potenzielle Käufer zu signalisieren. Dies könnte aus derzeitiger Sicht den Bereich unbemannter Fahrzeuge betreffen: etwa in sicherheitsrelevanten Bereichen (Bundesheer, Katastropheneinsatz) oder im Bereich des schienengebundenen Nahverkehrs (hier existiert mit dem Projekt autoBAHN bereits ein entsprechender Prototyp bzw. ein Demonstrationsprojekt für die Anbindung von so genannten Nebenstrecken, das ohne weitere Infrastrukturmaßnahmen auskommt und modernster IKT im Sinne komplexer Systeme nutzt).

Ebenfalls im Sinne der Nachfragesteuerung sollte mittelfristig die Einrichtung einer an gesellschaftlichen Bedürfnissen (grand challenges wie etwa demographischer Wandel) interessierten und orientierten Begleitforschung (bzw. entsprechend interdisziplinärer Forschungsprojekte) geprüft werden, auf deren Grundlage die Nachfrage, insbesondere der Konsumenten, gesteigert werden könnte. Letzteres erscheint vor dem Hintergrund des gestiegenen Bewusstseins für Datensicherheit und -privatheit eine sinnvolle Ergänzung rein technologisch orientierter FTI-Politik.

Zusätzlich sollten mittelfristig auf strategischer Ebene die Weichen für eine verstärkte Bereitstellung von Daten (z.B. Verkehrs und Mobilitätsdaten) im Sinne des *open data* Prinzips gestellt werden. Dies würde die dringend benötigten Voraussetzungen für die Entwicklung von *open interface for services* schaffen, die wiederum einen technologischen und Wettbewerbsvorsprung österreichischer Unternehmen ermöglichen und dadurch auch die Leistungsfähigkeit der öffentlichen Verwaltung stärken.

Um die Erreichung der technologischen Meilensteine im Bereich komplexer IKT-Systeme abzusichern bzw. die Entwicklung entsprechender österreichischer Beiträge zu unterstützen, muss neben der Förderung von Forschungs- und Entwick-

lungsprojekten im Bereich der kooperativen Forschung langfristig auch die entsprechende Mittelausstattung an österreichischen Universitäten adressiert werden. Eine entsprechende Verknüpfung von universitärer Forschungsfinanzierung einerseits und Forschungsförderung andererseits über interministerielle Kooperation und die Zusammenarbeit der Förderagenturen FFG und FWF im Rahmen eines entsprechenden Dialogs sollte daher Teil der künftigen FTI-Politik sein. Mittelfristig wäre die Einrichtung eines akademisch-unternehmerischen Dialogs in Form von regelmäßigen Workshops und Konferenzen zu prüfen, die vor allem die Kommunikation und Vermittlung von Angebot und Bedarf technologischer Möglichkeiten im Bereich komplexer IKT-Systeme und darüber hinaus verbessern können.

6.1. Operative Ebene

Kurzfristig ist die Entwicklung der technologischen Meilensteine komplexer IKT-Systeme vor allem über entsprechende thematische Ausschreibungen zu unterstützen. Im Sinne einer optimalen Nutzung der existierenden Expertise für die österreichische Industrie sollten sich die Themen für solche Ausschreibungen zunächst an der bestehenden Diskrepanz zwischen dem Stand der industriellen Technik und der wissenschaftlichen Forschung orientieren. Daher sind zunächst vor allem folgende Themen aus dem Feld der komplexen IKT-Lösungen in Form von Ausschreibungen zu adressieren: Softwareentwürfe für komplexe Systeme, Entwicklung von Software zur Nutzung von *multicore* Systemen, neue Sicherheitstestverfahren sowie mittelfristig die Problematik der Integration von Altsystemen. Weiterhin ist kurz- bis mittelfristig die Ausschreibung von Forschungsprojekten im Bereich von Strategien zur Vermeidung unnötiger Komplexität von IKT-Systemen in das IKT der Zukunft Portfolio aufzunehmen.

Im Sinne des dieser Analyse zugrunde liegenden Förderprogramms IKT der Zukunft sind mittelfristig neue Instrumente als auch die Verbesserung der bereits existierenden (inklusive deren Abwicklung und Administration) relevant. Aufgrund der engen Verbindung des Themas komplexer IKT-Lösungen mit produktionsbezogenen Forschungen und Innovationen sowie der zentralen Bedeutung von Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbau (die ihrerseits wiederum wichtige Sektoren der österreichischen Volkswirtschaft sind), ist die Möglichkeit zu prüfen, gemeinsame Ausschreibungen zumindest für die Programme Produktion der Zukunft und IKT der Zukunft/Komplexe IKT-Lösungen zu entwickeln. Gemeinsame Ausschreibungen könnten nicht nur die ohnehin bestehenden Verbindungen nutzen, sondern auch die Attraktivität des Programms IKT der Zukunft für potenzielle Fördernehmer erhöhen. Solche gemeinsamen Ausschreibungen entsprechen der Eigenschaft von IKT einerseits und könnten andererseits die Hebelwirkung von IKT-Forschung über

die direkte Anwendung in anderen österreichischen Stärkefeldern vergrößern. Die folgenden Themenbereiche sollten in diesem Sinne prioritär behandelt werden: unbemannte Fahrzeuge (zusammen mit Mobilität der Zukunft), *adaptive control systems* und *smart networked cyber-physical systems* (mit Produktion der Zukunft) sowie *security testing* und *cyber-attack proofs* (Energie der Zukunft).

Zur Optimierung der inhaltlichen Gestaltung der Programmlinie komplexe IKT-Lösungen sollte langfristig entweder die Einrichtung von österreichischen *joint technology initiatives* nach dem Vorbild der europäischen JTIs erwägt werden oder die Etablierung von *public private partnerships*, in denen Unternehmen und Forschungseinrichtungen entlang einer mit der FFG und dem BMVIT abgestimmten, mehrjährigen Forschungs- und Innovationsstrategie zumindest einen Teil der verfügbaren Fördermittel zur Verfügung stellen. Beide Instrumente würden einen Beitrag zur Sicherstellung der technologischen und ökonomischen Aktualität des Förderprogramms leisten.

Im Rahmen von IKT der Zukunft ist mittel- bis langfristig die Bereitstellung von forschungsrelevanter Infrastruktur als Unterstützungsmöglichkeit zu prüfen. Mehr und mehr Unternehmen übernehmen Aufgaben, die traditionell Universitäten oder anderen öffentlich finanzierten Organisationen zugeschrieben werden, die diese aber u.a. aufgrund finanzieller Einschränkungen nicht immer bzw. in abnehmenden Ausmaß erfüllen können. Vor allem kleine und mittlere Unternehmen könnten über die gemeinsame Nutzung solcher öffentlich finanzierter Infrastruktur im Rahmen von Forschungsvorhaben profitieren. Gegebenenfalls wäre die Implementierung eines entsprechenden Infrastrukturprogramms denkbar.

Aufgrund der dichten Abdeckung der notwendigen Wertschöpfungsnetzwerke in von komplexen IKT-Lösungen profitierenden Wirtschaftsbereichen, erscheint die mittelfristige Einrichtung von so genannten Leuchtturmprojekten eine geeignete Maßnahme der nachhaltigen Stärkung der österreichischen Volkswirtschaft. Drei Themenbereiche, die vonseiten der relevanten Unternehmen favorisiert werden sind: multi-utility-servers²⁰, Fahrassistenzsysteme/autonome Fahrzeuge und Smart City. Allerdings müsste der konkrete Bedarf sowie die Ausgestaltung zunächst gründlich analysiert werden, um zu verhindern, dass, anstatt der dadurch möglichen Schaffung von kritischer Masse und dauerhafterer Kooperation, künstliche und willkürlichen Zusammenstellungen von, im Endeffekt, einzelnen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben entstehen.

²⁰ Darunter sind Zählersysteme zu verstehen, die herstellerunabhängig mit verschiedenen Zählern zusammenarbeiten können, Datenschutz und Datensicherheit gewährleisten, verschiedene Messgrößen bidirektional und in unterschiedlichen Übertragungstechnologien fernübermitteln können.

Da es in vielen der genannten Anwendungsbereiche bereits Systeme gibt, die zum Teil als Ergebnisse von Forschungsprojekten publiziert beziehungsweise verfügbar sind, könnte die Vision der Komplexitätsreduktion ohne Verzicht auf Funktionalität aufgegriffen werden, um radikal vereinfachte Referenzsysteme zu entwickeln und in jedem (Detail-)Aspekt zugänglich zu machen. Das würde auch gut zum bereits skizzierten Plattform-Gedanken passen; gleichzeitig könnten so "Test Beds" für diverse Forschungsprojekte (z.B. Security) entstehen.

Maßnahmen zu Optimierung der bestehenden Forschungsförderung im Rahmen von IKT der Zukunft/Komplexe IKT-Lösungen betreffen die Abwicklung der Förderung. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass es der Europäischen Kommission mit dem aktuellen Forschungsrahmenprogramm Horizon 2020 gelungen ist, deutliche Vereinfachungen zu implementieren, gilt zumindest für einen Teil der potenziellen österreichischen Fördernehmer, dass die FFG Programme an Attraktivität verloren haben. Vor allem ein generelles Streamlining von IKT-Förderungen wird gefordert ebenso wie die Vereinfachung der gesamten Projektabwicklung, klarere, transparentere, quantifizierbare Förder-/Evaluierungskriterien und eine höhere Kalkulierbarkeit der gesamten Abrechnungsmodalitäten. Kritisch ist hier allerdings anzumerken, dass solche Maßnahmenvorschläge zu den am häufigsten geäußerten Wünschen vor allem der Unternehmen, beinahe unabhängig vom Forschungsbereich, gehören. Weiterhin sollte und kann die FFG nicht in direkte Konkurrenz mit europäischen Förderangeboten treten. Sollten sich jedoch die Fälle häufen, in denen Projekte aus einem der genannten Gründe nicht zur Förderung in Österreich eingereicht werden und deren Ergebnisse damit nur teilweise der hiesigen Wertschöpfung zur Verfügung stehen, wäre zumindest eine Orientierung an den entsprechenden Bewerbungs- und Abwicklungsformalitäten der Europäischen Kommission dringend zu empfehlen.

Um den Akteuren der FTI-Politik die aktuelle und passgenaue Gestaltung der Förderpolitik zu ermöglichen, sollte mittelfristig eine umfassende Analyse der relevanten Wertschöpfungs- und Kooperationsstrukturen aller relevanten IKT-bezogenen Forschungs- und Anwendungsfeldern ausgeschrieben werden. Dies könnte etwa, auf Basis der umfangreichen FFG-Daten, in Form einer sich automatisch aktualisierenden Online-Plattform entwickelt werden, die gleichzeitig als Informationswerkzeug und Wissensquelle für Forschungseinrichtungen und interessierte Unternehmen (im Sinne einer Kooperationsplattform) fungiert.

7. Anhang

7.1. Literaturverzeichnis

ARTEMIS Industry Association, 2014, Embedded/CyberPhysical Systems of the 2014 Multiannual Strategic Research and Innovation Agenda for the ECSEL Joint Undertaking.

Bergmayr A. et al., Migrating legacy software to the cloud with ARTIST. Talk: 17th European Conference on Software Maintenance and Reengineering (CSMR), Genova, Italy; 03-05-2013 - 03-08-2013; in: "Proceedings of the 17th European Conference on Software Maintenance and Reengineering (CSMR)", IEEE Computer Society, Washington, DC, USA (2013).

Casti, J.L., 1986, On system complexity: identification, measurement and management, In Casti/Karlquist (Eds.), Complexity, Language and Life: Mathematical Approaches (pp. 146-173). Berlin.

ECSEL Masria. Annex 2 (part C) of the 2014 ECSEL multi-annual strategic research and innovation agenda for the ECSEL joint undertaking. ECSEL JU, Brussels, 2014.

Erbschwendtner et al., 2003, IKT in Österreich, IWI und JR, Wien.

Frost & Sullivan, 2011, Mega Trends, Asia Pacific Market Insights.

Mogul, J.C., 2006, (Mis)behavior vs. Complex Software Systems. HP Laboratories, Palo Alto.

Prem et al., 2007, Grundlagen einer IKT-Forschungsstrategie für Österreich, Wien.

Reiser M., Wirth N., Programming in Oberon, Steps Beyond Pascal and Modula. Addison-Wesely, 1992.

Rifkin, J., 2011, Die dritte industrielle Revolution: Die Zukunft der Wirtschaft nach dem Atomzeitalter, Frankfurt/M.

Ruhland S., Prem E., Re-Design des IKT-Forschungsportfolios des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie. Endbericht. Wien, Mai 2012.

7.2. Explorative und validierende Interviews

Im Laufe der Entwicklung der Roadmap und der entsprechenden Empfehlungen wurden sowohl explorative als auch validierende (vor allem mit VertreterInnen von Forschungsorganisationen und Hochschulen) Interviews durchgeführt (insgesamt 15). Die explorativen Interviews wurden auf Basis eines Leitfadens durchgeführt:

- 1) Was verbinden Sie mit complex systems, Komplexität, komplexen IKT-Lösungen in ihrem Unternehmensumfeld bzw. Unternehmen?
- 2) Welche der folgenden (Unter-)Themen aus dem Bereich complex systems sind für Sie bzw. Ihr Unternehmen derzeit, mittelfristig, langfristig von Relevanz?
 - a) Robustheit (gegenüber Störungen, Unfall etc.)
 - b) Sicherheit
 - c) Autonomie (self-*, d.h. fehlerkorrigierend, selbstheilend etc.)
 - d) Rigoroser Systementwurf
 - e) Anpassung (Adaption)
 - f) Weiterentwicklung (Evolution)
- 3) Was sind die technologischen und nicht-technologischen Treiber für die mittelfristige bzw. langfristige Technologieentwicklung?
- 4) Märkte und Anwendungsfelder
 - a) Was sind derzeit Ihre Hauptmärkte? Welche Veränderungen erwarten Sie in den Hauptmärkten in den nächsten 5-10 Jahren?
 - i) Geografisch
 - ii) Thematisch
 - b) Was sind die emerging markets bzw. Hoffnungsträger?
 - i) Geografisch
 - ii) Thematisch
 - c) Welche Anwendungsfelder sind aus der Sicht Ihres Unternehmens derzeit von Bedeutung? Bitte erläutern Sie!
 - i) Autonome Fahrzeuge (Verkehr und intelligente Logistik)
 - ii) Komplexe Produktionsanlagen (z.B. chemische Industrie)
 - iii) Mobile computing
 - iv) Health
 - v) Lebensmittelsicherheit, Landwirtschaft, Umwelt
 - vi) Big data
 - vii) Security (Verteidigung, Katastrophenschutz)
 - viii) Interfaces
 - ix) Ressourcen-/Energieeffizienz (inklusive smart grid)
 - x) Kommunikation (z.B. Satelliten)
 - xi) Querschnittsthemen (legacy, Sicherheit)

- 5) Herausforderungen
 - a) Was sind derzeit, mittelfristig, langfristig die zentralen Herausforderungen für Ihr Unternehmen?
 - i) Ökonomisch
 - ii) Technologisch
 - iii) Andere (politisch, sozial etc.)
- 6) Wertschöpfungs- und Wissensnetze
 - a) Welche Position nimmt Ihr Unternehmen im Wertschöpfungsnetz ein?
 - b) Welcher Anteil Ihres Wertschöpfungsnetzes findet sich in Österreich? Welche Bedeutung nimmt Österreich im internationalen Wettbewerb als Technologiegeber derzeit ein?
 - c) Wer sind Ihre Hauptkonkurrenten?
 - d) Woher kommen die notwendigen Forschungsergebnisse (Eigen-forschung, heimische Hochschulen etc.)?
 - e) Welche Veränderungen erwarten Sie hier mittelfristig, langfristig?
- 7) Öffentliche Förderung und Unterstützung
 - a) Welchen Stellenwert haben Forschungsförderung und andere Instrumente der FTI-Politik für Ihr Unternehmen bzw. die Bewältigung der Herausforderungen in Ihren Anwendungs-/Technologithemen?
 - b) Wofür bräuchten Sie am ehesten staatliche Unterstützung?
 - c) Welche Instrumente der öffentlichen Forschungsförderung nutzen Sie derzeit und für welche Probleme existieren derzeit keine adäquaten Unterstützungsleistungen?
 - d) Wie wichtig erscheinen ihnen für ihren Bereich folgende Instrumente
 - i) Diplomarbeiten
 - ii) Dissertationen
 - iii) Große Leuchtturmprojekte in Österreich
 - iv) Austauschprogramme für internationale Studenten
 - v) Austauschprogramme mit Universitäten (Uni-Mitarbeiter, Studierende)
 - vi) Standardisierungsinitiativen

Die Validierungsinterviews basierten auf zwei Fragen:

- 1) Welche Elemente der folgenden Beschreibung des Themenfelds komplexe IKT Lösungen/complex systems würden Sie stärker betonen, ergänzen etc.? „Systeme, die in der Lage sind, auch bei Störungen und Veränderungen der Umwelt ihre grundlegende Organisationsweise zu erhalten, anstatt in einen qualitativ anderen Systemzustand überzugehen bieten eine bedeutende Perspektive für zukünftige technologische Systeme. Mit steigender Komplexität von Computersystemen steigt auch die Herausforderung, ihre Korrektheit (z.B. durch strikte Systementwürfe) sicherzustellen. In solchen Systemen können

durch die Interaktion zwischen Komponenten auf Systemebene neue, emergente Eigenschaften entstehen, die auf der Ebene der individuellen Komponenten nicht vorhanden sind.“

- 2) Welche technologischen Herausforderungen bzw. notwendigerweise zu entwickelnden (Teil-)Technologien sind aus Ihrer Sicht dem Themenfeld kurz-, mittel- und langfristig zuzuordnen?

Darüber hinaus wurde ein Entwurf der Roadmap auch den WorkshopteilnehmerInnen zur Kommentierung und Ergänzung zur Verfügung gestellt.

7.3. Workshops

Insgesamt wurden drei Workshops mit VertreterInnen österreichischer Unternehmen durchgeführt, die der iterativen Erarbeitung der Technologie-Roadmap sowie der Entwicklung von Handlungsoptionen und entsprechenden Empfehlungen dienten. Die Workshops wurden durchgeführt in Wien (01.04.2014), Graz (23.04.2014) und Linz (28.04.2014) auf Basis der folgenden Agenda:

9.30 Uhr	Impulsvortrag zu Österreichs wirtschaftlichen Stärken und ökonomischen Chancen für „komplexe IKT-Lösungen“
9.45 Uhr	Diskussion Anwendungsfelder und „komplexe IKT-Lösungen“ vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Stärken Österreichs
10.30 Uhr	Impulsvortrag zu Bausteinen einer österreichischen Technologie-Roadmap „komplexe IKT-Lösungen“
10.45 Uhr	Diskussion der Technologie-Roadmap
12.00 Uhr	Diskussion Politikmaßnahmen
12.30 Uhr	Abschluss

Die TeilnehmerInnen wurden jeweils im Anschluss gebeten, die entsprechenden Protokolle und Ergänzungen der Roadmap zu kommentieren und zu validieren.

7.4. Verzeichnis der ExpertInnen

Name	Organisation	Workshop	Interview
Michael Jerne	NXP	X	X
Klaus Oberreiter	UAR	X	
Christian Wögerer	Profactor	X	
Wolfgang Freiseisen	RISC	X	
Michael Kreilmeier	Frequentis	X	
Markus Dibold	LCCM	X	
Robert Stubenrauch	Mechatronik Cluster	X	
Gerhard Angerer	TRUMPF	X	
Paolo Ferrara	Ferrobotics	X	
Christoph Steindl	Catalysts	X	
Herbert Taucher	Siemens	X	
Peter Priller	AVL	X	
Thomas Rupprechter	Infineon	X	
Christian Hinteregger	Magna Powertrain	X	
Jutta Isopp	Messfeld	X	
Karin Aussersdorfer	Voest		X
Thomas Buchegger	LCM		X
Christian Bettstetter	Universität Klagenfurt		X
Peter Puschner	TU Wien		X
Peter Caldera	LANTIQ		X
Michael Haas	CERTEC		X
Markus Pistauer	CISC		X

Andreas Eckel	TTTech		X
Holger Bock	Infineon		X
Martin Eder	Kapsch Carrier		X
Karl Rossegger	Linz AG		X
Manfred Prantl	Alicona		X
Andreas Steininger	TU Wien		X