

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Ein IoT-Retrofit-Ansatz im Haushaltsbereich zur Steigerung der Nachhaltigkeit: Vom Reverse-Engineering einer Kaffeemaschine bis hin zur Nachhaltigkeitsanalyse eines Retrofitting-Prototyps

verfasst von | submitted by

Raphael David Ornetsmüller BSc

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien | Vienna, 2024

Studienkennzahl lt. Studienblatt | Degree
programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 066 926

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Wirtschaftsinformatik

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Dipl.-Math. Dr. Peter Reichl Privatdoz.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich nochmals bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zunächst möchte ich mich herzlich beim Herrn Prof. Peter Reichl und Kaspar Lebloch für die Betreuung meiner Masterarbeit bedanken. Durch ihre Hilfsbereitschaft und positive Kritik sowie den Freiraum für diverse Gestaltungsmöglichkeiten war die Arbeit nicht nur eine große Herausforderung im positiven Sinne, aber vor allem eine persönliche Bereicherung. Mein Dank gebührt auch den Mitgliedern der COSY-Forschungsgruppe, die mich an unterschiedlichen Stellen unterstützt haben. Ebenfalls möchte ich mich bei allen Studierenden meiner Befragung sowie den Teilnehmern und Teilnehmerinnen meiner Beobachtungen und Interviews, ohne die ich diese Arbeit nicht vervollständigen könnte, bedanken.

Besonderer Dank gebührt meiner Schwiegermutter Teresa, die mich während der Schwangerschaft meiner Frau und nach der Geburt unserer Zwillinge in allen täglichen Belangen unterstützt sowie motiviert hat und mir die Möglichkeit gab, meine Ziele weiterzuverfolgen. Abschließend möchte ich mich bei meiner Frau, meinem Freund Tarik Pektaş, meinen Eltern und meinen beiden Schwestern bedanken, die mir immer Zuversicht gaben, auch in schwierigen Zeiten nicht aufzugeben und mein Ziel konsequent zu verfolgen und letztendlich auch zu erreichen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	State of the Art: Literatur und Praxis	6
2.1	Nachhaltigkeit	6
2.1.1	Nachhaltigkeitsprinzipien	7
2.1.2	Nachhaltigkeit im Haushaltsbereich	9
2.2	Retrofitting	10
2.2.1	Retrofitting-Arten	12
2.2.2	Retrofitting in der Industrie	13
2.2.3	Retrofitting im Haushalt	15
3	Methodik	17
3.1	Autoethnografische Studie	17
3.2	Studie	18
3.3	Laborbeobachtung mit Interview	18
3.4	Analyse und Gütekriterien	19
4	Analyse	21
4.1	Umfang und Annahmen	22
4.1.1	Hardware-Annahmen	22
4.1.2	Userbasierte Annahmen	23
4.1.3	Security-Annahmen	23
4.1.4	Kommunikative Annahmen	23
4.2	Funktionale Anforderungen	24
4.3	Nicht funktionale Anforderungen	25
4.3.1	Interne Sicht	26
4.3.2	Externe Sicht	27
4.3.3	Sonstige Anforderungen	28
4.4	Anwendungsfälle	29
5	Konzeption	30
5.1	Kaffeevollautomat Komponenten	30
5.2	Kommunikationsprotokoll	34

5.2.1	Bedienplatine	35
5.3	Signalerfassung und -verarbeitung	40
5.3.1	Logic-Analyzer	42
5.3.2	Setting-Signalerfassung	43
5.3.3	Signalerfassung und -verarbeitung	43
6	Prototyp	50
6.1	Arduino-Applikation	50
6.1.1	Kernfunktionen	50
6.1.2	Wifi	52
6.1.3	WebServer	53
6.2	Clientseitige Schnittstelle	53
6.2.1	Zustände	53
6.2.2	Funktionalitäten	54
7	Ergebnisse	55
7.1	Autoethnografische Fallstudie	55
7.2	Studie	63
7.2.1	Demografische Daten	63
7.2.2	Daten zur Nachhaltigkeit	66
7.2.3	Daten zum Retrofitting	68
7.3	Beobachtung und Interview	75
7.3.1	Beobachtung	75
7.3.2	Interview	78
8	Diskussion	82
8.1	Reverse-Engineering-Prozess	82
8.2	Retrofitting anhand eines Beispiels im Sinne der Nachhaltigkeit und Zukunft	86
9	Resümee	91
9.1	Ausblick	92

Zusammenfassung Haushaltsgeräte werden weltweit, insbesondere in Industriestaaten, in zunehmend kürzeren Zyklen durch neue Geräte ersetzt, wodurch die jährliche pro-Kopf-Menge des Elektroschrotts steigt, und verstärkt zur Ressourcenverschwendung sowie Klimaerwärmung beiträgt. Daher ist es notwendig, Maßnahmen zu treffen und Methoden zu entwickeln, um nachhaltiges Handeln im Haushaltsbereich zu ermöglichen und eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Das Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, ob ein Reverse-Engineering-Prozess im Haushaltsbereich durch einen Neueinsteiger oder eine Neueinsteigerin zielführend durchgeführt werden kann und ob das Prozessergebnis in Form eines Retrofitting-Produkts nachhaltig genutzt werden kann. In diesem Rahmen wird die zentrale Forschungsfrage behandelt: Inwiefern kann das Retrofitting im Haushaltsbereich zur Nachhaltigkeit beitragen und stellt es eine akzeptable Alternative zu bewährten Methoden dar? Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurden ein Reverse-Engineering-Prozess in Form einer autoethnografischen Studie durchgeführt und ein Prototyp entwickelt. Der Prototyp wurde bei einem demonstrierten Nachrüstvorgang als Basis für eine Befragung unter 100 Teilnehmenden herangezogen, wodurch die Nachhaltigkeit und Akzeptanz des Retrofittings erhoben wurden. Um einzelne Fragestellungen präziser beantworten zu können, wurden mit sechs Teilnehmenden Laborversuche, bei denen ein Nachrüstvorgang eigenständig umzusetzen war, sowie semistrukturierte Interviews durchgeführt. Die autoethnografische Studie ergab den dokumentierten Weg aus Sicht eines Neueinsteigers sowie ein generisches Templates als Entscheidungsvorlage. Die Antworten auf die Fragebögen illustrieren, dass über 60 Prozent der Studienteilnehmenden die Nutzung des Retrofitting-Moduls im Sinne der Nachhaltigkeit befürworten. Über 80 Prozent der Studienteilnehmenden trauen sich zu, den Nachrüstsatz anzuwenden und sind geneigt, einen solchen Satz als Alternative zum Neugerät zu erwerben. Auch im Rahmen der durchgeführten Interviews konnte festgehalten werden, dass ein Nachrüstsatz zur Nachhaltigkeit beitragen kann; Retrofitting birgt damit die Möglichkeit, sich im Haushaltsbereich als Nachhaltigkeitsmethode und somit als Alternative zum Neukauf zu etablieren. Durch die Versuche konnte gezeigt werden, dass alle Teilnehmenden, unabhängig von einer Tätigkeit im IT-Bereich, in der Lage sind, den Nachrüstsatz erfolgreich anzuwenden.

Kapitel 1

Einleitung

Haushaltsgeräte sind ubiquitär und werden in zunehmend kürzeren Zyklen durch neue ersetzt. Der entstehende Elektroschrott nimmt weltweit zu; insbesondere in der EU und anderen Industriestaaten. Durch bestehende und neue Methoden sollen das ungenutzte Potential ausgeschöpft und die Nachhaltigkeit gesteigert werden. Durch Aufrüstung altbewährter Maschinen und Geräte soll ihre Lebenszeit verlängert werden. Einer vorzeitigen Entsorgung wird vorgebeugt und wesentliche Schritte in der Implementierung einer Kreislaufwirtschaft werden getätigt. Ein überwiegender Teil der anfallenden Kosten kann gespart und der Ressourcenverbrauch reduziert werden.

Aktuell nehmen Methoden und Technologien, die zur Nachhaltigkeit beitragen, einen hohen Stellenwert in der Gesellschaft ein, insbesondere in der Wissenschaft. Damit aktuelle und zukünftige Generationen bestehende Ökosysteme erhalten können, müssen schädliche Prozesse auf ein Minimum reduziert werden und die Nachhaltigkeit muss gesteigert werden. Durch Innovation und Forschung kann diesbezüglich ein Grundstein gelegt werden.

Da im privaten Bereich zahlreiche Geräte in regelmäßigen Zeitabständen durch Neuanschaffungen ersetzt werden, rücken Nachhaltigkeitsaspekte in den Hintergrund. Durch Etablierung neuer Denkweisen in der Gesellschaft, Herangehensweisen in der Wirtschaft sowie den Einsatz intelligenter Retrofitting-Methoden kann die Nachhaltigkeit gesteigert werden. Insbesondere im Haushaltsbereich, wo Geräte ihre Grundfunktionalität seit Jahrzehnten beibehalten haben und mit der Zeit optimiert sowie durch neue Funktionalitäten ergänzt wurden, kann Retrofitting als eine nachhaltige Alternative bewertet werden. Zum Forschungsbereich der Thematik Retrofitting existieren bereits zahlreiche Arbeiten; allerdings liegt ihr Fokus zumeist auf Optimierung bestehender Funktionalitäten sowie Implementierung zusätzlicher Funktionalitäten, jedoch kaum im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit. Daher sollen anhand der vorliegenden Masterarbeit folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

1. Wie kann ein Reverse-Engineering-Prozess im Haushaltsbereich anhand eines Kaffeevollautomaten durch Neueinsteiger und Neueinsteigerinnen zielführend umgesetzt werden?
2. In welchem Ausmaß kann das Ergebnis des Reverse-Engineering-Prozesses in Form eines Retrofitting-Moduls durch Benutzer und Benutzerinnen im Sinne der Nachhaltigkeit genutzt werden?
3. Inwiefern kann das Retrofitting im Haushaltsbereich zur Nachhaltigkeit beitragen und stellt es eine akzeptable Alternative zu bewährten Methoden dar?

Anhand einer autoethnografischen Studie soll mittels Softwareentwicklung ein Kaffeevollautomat durch einen Retrofitting-Ansatz aufgewertet werden. Der Kaffeevollautomat, der im ursprünglichen Zustand einzig physisch bedienbar ist und in Verbindung mit dem Stromnetz steht, soll eine IoT (Internet of Things)-Nachrüstung erhalten und mit einer Webapplikation verbunden werden. Somit können Benutzer und Benutzerinnen den Kaffeevollautomaten über eine Webapplikation per Handy, Tablet, Notebook oder anderer Geräte steuern. Sämtliche Einstellungen können mittels weniger Klicks vorgenommen werden. Die Applikation soll dazu beitragen, dass die Auswahlmöglichkeiten, die im Zusammenhang mit den Einstellungen stehen, übersichtlich und intuitiv sind sowie ein hohes Maß an Usability gewährleisten. Physische Handbücher bzw. unübersichtliche Anleitungs-PDFs sollen vermieden werden. Statistische Informationen können aufgezeichnet werden und einerseits bei der Wartung und Reparatur behilflich sein, andererseits wichtige Indikatoren beim Weiterverkauf darstellen. Die bereitgestellte Software kann dank der Internetverbindung jederzeit und ohne übermäßigen Aufwand upgedatet werden. Durch die Anbindung an das Internet kann der Kaffeevollautomat weiterhin mit anderen Geräten kommunizieren und seine Funktionalitäten können erweitert werden. Somit kann das Gerät an intelligente Systeme angebunden werden, um Befehle vollautomatisiert und zeit- oder ereignisgesteuert auszuführen. Der Benutzer oder die Benutzerin wird ebenfalls alle weiteren Vorteile nutzen können, die mit IoT im Zusammenhang stehen. Bestehende Funktionalitäten, die der Benutzer oder die Benutzerin bereits kennt, werden weiterhin zur Verfügung stehen und müssen nicht neu erkundet oder erlernt werden.

Das Retrofitting führt nicht nur zu Vorteilen für den Benutzer oder die Benutzerin, sondern auch für die Umwelt. Die Lebensdauer des Geräts wird durch die Einbindung neuer Funktionalitäten verlängert und einer frühzeitigen Entsorgung

kann vorgebeugt werden. Komponenten, die für die Umrüstung benötigt werden, stellen lediglich einen Bruchteil der Ressourcen dar, die bei einer Neuanschaffung benötigt werden würden. Dadurch stellt das Retrofitting eine ressourcenschonende und kostengünstigere Alternative dar. Auch die generelle Nutzung des Automaten kann durch ein Upgrade optimiert werden. Bestehende Wartungsutensilien sind in vielen Fällen nicht aufwärtskompatibel, wodurch beim Kauf eines Neugeräts auch Wartungsutensilien neu erworben werden müssen und zusätzliche Kosten entstehen. Sofern das Gerät im Zuge eines Retrofittings weiterhin verwendet wird, können das Wartungszubehör weiterhin genutzt und Kosten sowie Ressourcen gespart werden.

Durch die vorliegende Arbeit soll gezeigt werden, dass das Retrofitting im Haushaltsbereich nicht nur aus Sicht des Benutzers oder der Benutzerin vielfältige Möglichkeiten bietet und einen Mehrwert schafft, sondern auch für die Umwelt einen wesentlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit leistet. Somit wird es Ziel sein, möglichst alle genannten Vorteile abzudecken und sie anhand einer Software zu illustrieren, die während einer autoethnografischen Studie entwickelt wird. Eine darauf aufbauende Umfrage soll zeigen, wie Nachhaltigkeit durch Retrofitting im Haushaltsbereich praxisorientiert integriert und etabliert werden kann. Mittels Laborbeobachtungen soll die Machbarkeit der Nachrüstung bewertet werden. Anschließend findet mit den Teilnehmenden ein semistrukturiertes Interview statt, wo der Retrofitting-Prozess in Anbetracht der Nachhaltigkeit evaluiert wird, um ein tieferes Verständnis zu erlangen.

Im ersten Kapitel werden der Wissens- und Forschungsstand hinsichtlich der verfügbaren Literatur und der Praxis zu den Themen Nachhaltigkeit und Retrofitting sowie deren Kombination betrachtet. Das Kapitel Methodik enthält Informationen zu wissenschaftlichen Methoden, die in dieser Arbeit verwendet werden, und den Gütekriterien, die eingehalten werden. Anhand des Analyse-Kapitels sollen Umfang, Annahmen und Anforderungen an das zu entwickelnde System festgelegt werden. Anschließend wird ein Retrofitting-Modell entwickelt und als Prototyp umgesetzt. Hier wird einerseits die Hardware des Kaffeevollautomaten erweitert und mit dem Internet verbunden, andererseits soll über eine Applikation die Steuerung des Kaffeevollautomaten ermöglicht werden. Sämtliche zugehörigen Informationen sind in den Kapiteln Konzeption und Prototyp enthalten. Anschließend werden eine Studie sowie Laborbeobachtungen mit Interviews durchgeführt. Im Kapitel Ergebnisse werden die Forschungsergebnisse analysiert und dokumentiert. Im Anschluss werden im Diskussionskapitel die interpretati-

ven Gedanken zu den Forschungsergebnissen geäußert. Mit dem Fazit endet die vorliegende Arbeit. Hier werden Forschungsfragen beantwortet sowie ein Ausblick gegeben, wie das Projekt weiterentwickelt werden kann und in welche Richtung weitere Forschungsarbeiten durchgeführt werden können.

Kapitel 2

State of the Art: Literatur und Praxis

In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen der Nachhaltigkeitstheorie und dem Retrofitting hergestellt. Im ersten Teil wird Nachhaltigkeit im Allgemeinen erörtert. In diesem Zuge soll einerseits der Nachhaltigkeitsbegriff definiert werden, andererseits sollen die Nachhaltigkeitsprinzipien beleuchtet werden. Anschließend wird Nachhaltigkeit im Haushaltsbereich betrachtet, wobei der Fokus auf elektronischen Haushaltsgeräten liegt. Im zweiten Teil wird digitales Retrofitting im Allgemeinen erörtert und betrachtet, welche Retrofitting-Arten aktuell im ‚Trend‘ sind. Als dritter und letzter Teil wird der Zusammenhang zwischen der Nachhaltigkeitstheorie und dem Retrofitting anhand von Retrofitting-Ansätzen aus der Praxis vorgestellt. Hier werden Beispiele sowohl aus der Industrie als auch aus dem Haushaltsbereich untersucht.

2.1 Nachhaltigkeit

Der Nachhaltigkeitsbegriff ist von nahezu täglicher Relevanz, wobei teilweise unterschiedliche Definitionen für ihn angenommen werden. Zwar können in der Literatur Definitionen für Nachhaltigkeit gefunden werden, wie „Ich definiere Nachhaltigkeit als die Möglichkeit, dass alle Formen des Lebens für immer gedeihen.“ von Ehrenfeld, J.R. in [10] oder „Nachhaltigkeit bedeutet, unsere Lebensweisen so zu ändern, dass ökologische und soziale Bedingungen unendliche Vorteile hinsichtlich Sicherheit, Wohlbefinden und Gesundheit aller Menschen generieren.“ von McMichael, A.J. et al. in [22], doch sind diese meist vage formuliert und lassen einen gewissen Interpretationsspielraum zu. Aus diesem Grund haben die Autoren und Autorinnen in [24] Nachhaltigkeit analysiert und ein Konstrukt dafür definiert. In über 200 untersuchten Studien wurden 24 divergente Definitionen für Nachhaltigkeit erfasst. Anhand der Definitionen wurden fünf Konstrukte für Nachhaltigkeit als Basis definiert. Im ersten Schritt gilt es, einen konkreten Zeitraum zu betrachten. In diesem Zeitraum werden Programme, Strategien, Implementationen oder klinische Interventionen entwickelt und verbessert. Es wird davon ausgegangen, dass sich individuelles Verhalten in diesem Zeitraum

verändert. Das individuelle Verhalten und das Programm werden sich mit der Zeit entwickeln und an die neuen Gegebenheiten anpassen. Letztlich sollen daraus Vorteile für Individuen und das System als Ganzes entstehen. Nachhaltigkeit gilt dabei als Oberbegriff und korreliert direkt mit anderen Begriffen, beispielsweise Erhaltung, Langlebigkeit, Routinisierung, Langfristigkeit etc. Alle diese Begriffe können in das fünfteilige Nachhaltigkeitskonstrukt eingeordnet werden. Da der Nachhaltigkeitsbegriff einen umfangreichen Definitionsraum beschreibt, dienen diese Konstrukte als Orientierung für die Definition der Nachhaltigkeit [24].

Infolge des stetigen globalen Bevölkerungswachstums (2020: 7,79 Mrd. [42], Prognose für 2050: 9,74 Mrd. [43]) und begrenzter Ressourcenverfügbarkeit ist nachhaltiges Handeln von großer Bedeutung. Durch Nachhaltigkeit sollen Vorteile für die Menschheit entstehen und gleichzeitig Ziele der menschlichen Entwicklung verfolgt und erreicht werden. Diese Ziele sollen durch Wirtschaft und Gesellschaft innerhalb von nachhaltigen Systemen unter nachhaltiger Verwendung von Ressourcen erreicht werden. In Anbetracht dieser Tatsache werden globale Vereinbarungen zur Steigerung von Nachhaltigkeit getroffen, z. B. die Millenniums-Entwicklungsziele (engl. Millenium Development Goals) in [52] oder Ziele für nachhaltige Entwicklung (engl. Sustainable Development Goals) in [17]. Da bis 2015 die Millenniums-Entwicklungsziele nicht vollständig erreicht wurden, jedoch eine aktualisierte Form erforderlich war, wurden sie zusätzlich zu weiteren Nachhaltigkeitszielen in die Nachfolgevereinbarung aufgenommen. Die von der UN neu erstellte Agenda (Ziele für nachhaltige Entwicklung) beinhaltet Ziele und Maßnahmen, um einerseits den Planeten zu schützen, andererseits Armut zu eliminieren und das Wohlergehen der Menschen zu steigern. In Anbetracht der fünf Faktoren Mensch, Planet, Wohlstand, Friede und Zusammenarbeit sollen nachhaltiges ökonomisches Wachstum, soziale Einbindung und Umweltschutz gewährleistet werden [23].

2.1.1 Nachhaltigkeitsprinzipien

Laut aktueller Literatur und theoretischer Grundlagen lässt sich Nachhaltigkeit nicht nur als ein großes Ganzes formulieren, sondern auch in drei Dimensionen aufteilen: ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeit. Je nachdem, welche dieser drei Dimensionen im Vordergrund steht, werden unterschiedliche Auffassungen des Gesamtkonzepts angenommen [33].

Das Primat der Ökologie sieht es vor, dass die Umwelt als Grundlage für den

Menschen und seine Bedürfnisse steht. Die Natur stellt das Zentrum der Lebens- und Wirtschaftsgrundlage dar und der Umweltschutz soll wirtschafts- und sozialverträglich gestaltet werden. Sowohl erneuerbare als auch nicht erneuerbare Ressourcen sollen nachhaltig genutzt werden und das gesellschaftliche Produktivpotenzial erhalten. Sach- Human- und Wissenskapital sollen eine nachhaltige Entwicklung erfahren und unvermeidbare technische Risiken müssen vermieden werden [32].

Aus sozialer Sicht steht der Menschheit eine endliche Menge an Ressourcen als Lebens- und Wirtschaftsgrundlage zur Verfügung; im Sinne der Gerechtigkeit (als normative Grundlage) soll diese Menge fair aufgeteilt werden, sowohl unter der aktuellen Bevölkerung als auch zwischen aktuellen und künftigen Generationen. Es soll sowohl hinsichtlich der Bildung als auch im Hinblick auf Beruf und Information Chancengleichheit sowie die Möglichkeit bestehen, an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen zu partizipieren. Soziale Ressourcen bleiben erhalten, um Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten zu bewahren [32].

Steht die ökonomische Dimension im Vordergrund, so soll die Umwelt erhalten bleiben, um Produktionsbedingungen zu sichern und Bedürfnisse zu erfüllen. Extreme Einkommens- und Vermögensunterschiede sollen ausgeglichen und eine gerechte Verteilung der Umweltnutzungsmöglichkeiten soll gewährleistet werden. Die menschliche Existenz soll durch die Gewährleistung der Grundversorgung und den Schutz der menschlichen Gesundheit gesichert werden [32].

Die heutige Umwelt- und Ressourcenökonomie basiert zumeist auf der geldfiierten Ausbeutung und Wertschöpfung, wobei die Kosten-Nutzen-Analyse als Hauptwerkzeug ihrer Beurteilung genutzt wird. Das Ziel der neoklassischen Ökonomie besteht darin, permanentes Wachstum durch ökonomische Aktivitäten zu erfahren. Der Mensch steht im Mittelpunkt des Universums und seine Bedürfnisse sollen befriedigt werden. Die Nachhaltigkeit ist hierbei schwach ausgeprägt und das ökologische sowie kulturelle Kapital werden durch den ökonomischen Kapitalwert zerstört. Ein Gegenmodell zum aktuellen Homo Oeconomicus stellt der Homo Sustinens dar. Er steht für ein Menschenbild, das mit den Nachhaltigkeitsprinzipien im Einklang ist. Die ökologische Ökonomie, die der Homo Sustinens vertritt, positioniert den Schutz, Erhalt und Bestand ökologischer Systeme im Vordergrund und trägt zu einer ausgeprägten Nachhaltigkeit bei [32].

Die Postwachstumsökonomie verkörpert einen möglichen Nachfolger der neoklassischen Ökonomie. Nachhaltige Entwicklung und nachhaltiges Wachstum stehen hierbei im Vordergrund, wobei folgende Kernforderungen laut [32] gelten:

Die *Kernforderungen* der Postwachstumsökonomie lauten:

- Stärkung von lokaler und regionaler Selbstversorgung und Regionalökonomie
- Partieller Rückbau von industriellen, insbesondere global arbeitsteiligen Wertschöpfungsprozessen
- Orientierung an der Suffizienzstrategie
- Ansätze zu Geld- und Bodenreformen
- Bestandserhalt statt Neuherstellung in der Produktion
- Subsistenz, De-Globalisierung bzw. Re-Regionalisierung (von Lebensstilen und Herstellungsketten)

Abbildung 1. Kernforderungen der Postwachstumsökonomie [32]

2.1.2 Nachhaltigkeit im Haushaltsbereich

Obwohl die Kernanforderung „Bestandserhalt statt Neuherstellung in der Produktion“ [32] für die Herstellungsindustrie laut der Postwachstumsökonomie vorliegt, um einen höheren Nachhaltigkeitsgrad zu erreichen, findet sie in der Praxis kaum Beachtung. Laut [44] werden monatlich 6,7 Prozent aller Haushaltsausgaben in Österreich für Wohnungsausstattung ausgegeben, darunter Haushaltsgeräte. Aus diesem Grund tragen nachhaltige Veränderungen in diesem Bereich zu einer wesentlichen Verbesserung der Nachhaltigkeit bei. Laut [45] fallen in Österreich jährlich 13,2 Kilogramm Elektroschrott pro Person an, wobei laut [12] über 60 Prozent davon auf kleine und große Haushaltsgeräte zurückgehen, Tendenz steigend. Mithilfe einer ausgeklügelten Kreislaufwirtschaft soll im Haushaltsbereich ein wesentlicher Anteil des Elektroschrotts vermieden werden. Ziel ist es, Produkte, Ausstattung und Infrastruktur länger zu verwenden, um Nachhaltigkeit und Produktivität zu steigern [9].

Der Nachhaltigkeitsgedanke setzt bereits bei der Designentwicklung an. Damit sollen frühzeitig Vertrauen und eine emotionale Bindung zwischen Produkt und Mensch geschaffen werden. Eine weitere zentrale Eigenschaft in diesem Zusammenhang ist die Materialauswahl; je höher die Qualität, desto langlebiger ist das Produkt, da die korrekte Funktionalität beibehalten werden kann. Standardisierung und Kompatibilität ermöglichen ein hohes Maß an Multifunktionalität und Modularisierung. Dadurch können Ersatzteile aus unterschiedlichen Quellen bezogen werden. Das Design sollte so gewählt werden, dass Adaptierungen,

Nachrüstungen, Wartungen und Reparaturen problemlos erfolgen können. So können die Lebenszeit des Geräts verlängert und Adaptierungen infolge neuer Bedürfnisse durchgeführt werden. Diese vier Konzepte stellen gemeinsam mit der Generalüberholung eine ausschlaggebende Verbindung zwischen Unternehmen und Konsumierenden dar. Je nachdem, wie intensiv die Konzepte im Design verankert sind, können sie in späterer Folge durch den Kunden oder die Kundin aufgenommen und fortgeführt werden [35, 9].

Die Ansätze unterscheiden sich aus konzeptueller Sicht. Bei der Reparatur geht es darum, die Funktionalität eines Geräts durch das Beheben eines bestehenden Problems wiederherzustellen. Ausgangspunkt einer Generalüberholung kann sowohl ein funktionierendes als auch defektes Gerät sein. Ziel der Generalüberholung ist es, das Gerät auf Fehler zu überprüfen, sie zu eliminieren und, falls nötig, bestimmte Verschleißteile zu ersetzen. Eine Wartung wird vorgenommen, um den aktuellen Zustand zu beurteilen und pflegende Aktivitäten durchzuführen, die die Lebenszeit des Produkts verlängern. Eine Nachrüstung kann sowohl ästhetischer als auch funktionaler Art sein. Während die ästhetische Nachrüstung eine geringe positive Auswirkung auf die Nachhaltigkeit hat, kann das funktionale Retrofitting sowohl in der Industrie als auch im Haushalt einen wesentlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten [48].

2.2 Retrofitting

Sowohl in der Industrie als auch im privaten Bereich wird über Geräte verfügt, die weder miteinander kommunizieren, noch überwacht oder ferngesteuert werden. Mithilfe von digitalem Retrofitting können einerseits neue Geräte, Komponenten und Dienste zu bestehender Hardware hinzugefügt werden, andererseits können sie aktualisiert werden, um neueste Technologie zu nutzen. Obwohl der Retrofitting-Ansatz im Haushaltsbereich noch nicht ausgiebig genutzt wird, kann eine IoT-Nachrüstung positive Auswirkungen auf eine eingeschränkte Funktionalität und Nachhaltigkeit haben. Geräte können miteinander kommunizieren, gemeinsam agieren, intelligent handeln sowie weitere Funktionalitäten bereitstellen. Darüber hinaus können durch ein passendes Retrofitting die Lebenszeit der Geräte verlängert und eine vorzeitige Entsorgung verhindert werden.

Laut [16] bietet das Retrofitting folgende Möglichkeiten:

- Verbindung mit mobilen Geräten über Dashboards und Apps
- Schaffung von Auto-ID-Möglichkeiten (automatische Identifikation und Datenerfassung) mit RFID-Lösungen

- Gestaltung und Modifizierung der Interaktion zwischen Maschinen und Menschen
- Nutzung intelligenter Daten, z. B. prädiktive Analytik
- Aufbau einer IoT-Infrastruktur und geräteübergreifende Datenverarbeitung

Obwohl Retrofitting insgesamt zahlreiche Potenziale aufweist, beruht die Entscheidung, ob eine Modernisierung oder Neuanschaffung vollzogen wird, zumeist auf dem Faktum, welche Variante die kostengünstigere ist. Auswahlkosten, Kosten für Neuanschaffung und Entsorgung sowie Folgekosten stehen den Umrüstkosten beim Retrofitting gegenüber. Damit ist die Modernisierung in vielen Fällen nicht nur die kostengünstigere, sondern auch die nachhaltigere Variante. Zudem tritt beim Retrofitting eine geringe Ausfallzeit auf, da keine umfangreichen Neuanschaffungsprozesse angestoßen werden. Gesetzliche Anforderungen (z. B. Umweltvorschriften) werden nach einer Umrüstung üblicherweise weiterhin erfüllt und erfordern keine weiteren Anstrengungen. Langwierige Genehmigungsverfahren, die bei einer Neuanschaffung anstehen, fallen beim Retrofitting aufgrund der unveränderten Basis weg. Auch der Schulungsaufwand bleibt gering, da die Grundfunktionen erhalten bleiben und nur neu erlernt werden muss, was verändert bzw. neu implementiert wurde. Sowohl Produktionskosten als auch die Produktivität und Produktqualität sind bekannt und können durch Retrofitting mithilfe von Prozess- und Maschinendaten optimiert werden [1, 8].

Während in der Industrie die wirtschaftliche Komponente im Vordergrund steht, wird im privaten Bereich besonders auf die Usability, Funktionalität und das Visuelle Wert gelegt. Das digitale Retrofitting im privaten Bereich kann die Performance und den Wert des Produkts steigern. Zusätzliche Wartungsoptionen verlängern die Produktlebenszeit und bieten im Vergleich zur Neuanschaffung eine nachhaltige Alternative. So wurden in [36] und [31] Retrofitting-Methoden angewendet, um Ökosysteme anhand bestehender Infrastruktur zu implementieren, die zur CO₂-Reduzierung beitragen. Neue Funktionalitäten können freigeschaltet werden, um den sich ständig ändernden Bedürfnissen der Kundschaft gerecht zu werden. In [27] wurde ein EBike-Retrofitting-Ansatz vorgestellt, der nicht nur auf die Nachrüstung abzielt, sondern auch Konzepte definiert, um möglichen späteren Bedürfnissen der Kundschaft gerecht zu werden. Bestimmte Nachrüstungen bieten auch beim Weiterverkauf einen Mehrwert auf funktionaler und monetärer Ebene. Zudem fallen die Neuanschaffungskosten weg, die in den meisten Fällen ein Vielfaches einer Nachrüstung ausmachen. Die Bedienung ändert sich entweder gar nicht oder nur marginal [35].

2.2.1 Retrofitting-Arten

Retrofitting kann in zwei Hauptgruppen unterteilt werden: Hardware-Modifizierung und Hardware-Ergänzung. Während bei der Hardware-Modifizierung bestehende Hardware verändert wird, wird bei einer Hardware-Ergänzung eine zusätzliche Hardware-Komponente an eine bestehende Hardware angeschlossen. Somit sind bei einer Hardware-Ergänzung keine Änderungen auf Hardware-Ebene nötig. Als Beispiel für eine Hardware-Modifizierung können Geräte oder Maschinen betrachtet werden, bei denen keine Kommunikations-Option vorgesehen war. Damit dennoch eine Kommunikation erfolgen kann, ist eine IoT-Nachrüstung vonnöten. Es wird zusätzliche Hardware benötigt, um die Kommunikation zwischen dem Gerät und der externen Umwelt zu ermöglichen. In einigen Fällen können auch zusätzliche Sensoren und andere Komponenten angeschlossen werden. Daraufhin kann die Spannung elektrischer Ströme und mechanischer Prozesse überwacht und für weitere Zwecke genutzt werden. Die Kommunikationsform kann frei gewählt werden; sowohl ein drahtloses Kommunikationssystem oder ein Ethernet-Anschluss als auch weitere Formen sind hierbei möglich [30].

Die Hardware-Modifizierung kann in drei weitere Unterkategorien geteilt werden: Aufrüstung durch den Originalhersteller oder die Originalherstellerin (OEM), Hardware von Drittanbietern und Drittanbieterinnen sowie Reverse-Engineering. Der Originalhersteller oder die Originalherstellerin stellt Nachrüstmodule oder Bausätze zur Verfügung, um die Kundschaft stärker an sich zu binden. Da alles aus einer Hand kommt, kann üblicherweise von einer 100-prozentigen Passgenauigkeit ausgegangen werden. Drittanbieter und Drittanbieterinnen stellen Hardware zur Verfügung, die zwar teilweise angepasst werden muss, dafür jedoch modell- und geräteübergreifend nachgerüstet werden kann. Durch Support und Services soll die Kundschaft überzeugt werden. Mithilfe der dritten Option, dem Reverse-Engineering können eigene Lösungen konstruiert werden. Obwohl es die aufwendigste Alternative darstellt, da in den meisten Fällen Fachwissen und spezifische Kompetenzen benötigt werden, bietet das Reverse-Engineering auch Möglichkeiten für individuelle Gestaltung [30].

In bestimmten Fällen kann eine Hardware auch trotz Anpassung unverändert bleiben, da eine Aufrüstung bereits durch bestehende Schnittstellen, z. B. USB-Ports erfolgen kann. Ziel der Nachrüstung ist es, die Kommunikationsform zu modernisieren, indem z. B. eine feste Verbindung durch eine Funkverbindung ersetzt wird [30].

2.2.2 Retrofitting in der Industrie

Retrofitting-Ansätze in der Industrie sind ein relevantes Instrument, um die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Prozesse sollen optimiert und ein höherer Automatisierungsgrad erreicht werden. Zudem sollen die Qualität der Produkte und die Effizienz in der Fertigung gesteigert werden. Unter Hinzunahme des IoT-Retrofittings wird der Übergang zur Industrie 4.0 gewährleistet und ein ausschlaggebender Schritt in die Zukunft getätigt [4, 15].

In der Literatur werden diverse Anwendungsbereiche unterschieden; so wird einerseits die Aufrüstung von Werkzeugmaschinen und Industrierobotern erwähnt, beispielsweise die IoT-Nachrüstung eines Produktionswerkzeugs von [2], andererseits werden ganze Elektrizitätswerke und Montagelinien wie in [11] oder [49] als Beispiele angegeben [37].

Anhand von Frameworks können Retrofitting-Lösungen in der Industrie systematisch umgesetzt werden. Eine Standardisierung ist laut [37] bisher noch nicht bekannt, dennoch existieren bereits mehrere wissenschaftliche Arbeiten dazu. So schlagen die Autoren und Autorinnen von [37] ein integriertes Bewertungs-Framework für die Industrie 4.0 als Retrofitting-Lösung vor. Mithilfe einer Geschäftsmodell-Klassifizierung soll der Retrofitting-Prozess unterstützt werden. Ein weiteres Framework-Beispiel stellt [18] dar, wobei hier der multikriterielle Entscheidungsfindungsprozess eine wesentliche Rolle einnimmt. Als praxisnahes Beispiel einer Pre-Standardisierung des Retrofitting-Prozesses kann die Arbeit von [21] betrachtet werden. Hier wurde ein Retrofitting-Ansatz anhand eines Roboterarms erprobt. Der Ansatz basiert auf dem CPPS-Retrofitting-Prozess von [20]. Die Aufrüstung erfolgte anhand der State-of-the-art der Industrie. Folgende Änderungen wurden beim Experiment in der Arbeit von [21] vorgenommen:

- Netzwerk: Die serielle Verbindung mit einem PC wurde durch WLAN (Wireless Local Area Network) und Ethernet ersetzt. Damit konnte das Gerät mit der gesamten Industrie verbunden werden.
- Datenbank: Da eine Datenbank bisher nicht genutzt wurde, konnten durch die Integration eines Datenbanksystems Daten abgelegt und weitläufig genutzt werden, beispielsweise für Analysen.
- Web-Service: Vor der Umrüstung erfolgte die Gerätenutzung lediglich durch die feste Verbindung mit einem PC. Durch einen Web-Service wurden CPPS Informationen ubiquitär verfügbar und aufrufbar.
- Cloud: Die Anbindung an eine Cloud führte dazu, dass Industrie-Ressourcen verfügbar und skalierbar sind.

- Automatisierte Bewegung des Roboterarms: Vor dem Retrofitting wurde der Industriearm hauptsächlich manuell bedient. Durch die Anbindung von IoT-Geräten konnten die Armbewegungen online vordefiniert und automatisiert werden.
- Identifizierung von Objekten: Da der Roboterarm bis zum Retrofitting manuell bedient wurde, wurden Objekte durch bedienende Person identifiziert. Nach Umrüstung konnte der Roboterarm durch IoT-Geräte Objekte selbstständig identifizieren.
- Software-Management: Die einzigen Softwarekomponenten, die vor der Umrüstung verwendet wurden, befanden sich auf jenem PC, der an den Roboterarm angeschlossen war. Durch die Umrüstung konnte die Software sowohl lokal als auch fernbedient werden. Sowohl die Wartung als auch die Verfügbarkeit und der Zugriff konnten damit ortsunabhängig ermöglicht werden.

Auf ähnliche Weise werden Retrofitting-Ansätze auch in der Praxis umgesetzt. So gibt es einige Beispiele aus der Praxis, die zeigen, welche Auswirkungen ein Retrofitting-Prozess tatsächlich auf das Geschäftsmodell und den wirtschaftlichen Erfolg hat: Im Projekt Diretronet wurde ein Retrofitting im Bereich der Kunststoffverarbeitung durchgeführt. Damit ein österreichisches Unternehmen in einem von asiatischen Anbietern und Anbieterinnen dominierten Marktumfeld mithalten kann, wurde zur Herstellung von Kunststoffteilen im Bereich der Pool-Pflege auf eine vollständig automatisierte Fertigung umgerüstet. Das Unternehmen führte ein digitales Retrofitting durch, indem es eine vollständig automatisierte Produktions- und Logistikkette integriert hat; von der Anlieferung der Rohstoffmaterialien bis hin zum Versand der fertigen Endprodukte [5].

Ein weiteres Beispiel zum digitalen Retrofitting stellt das Unternehmen Hagleitner dar, das sich auf Hygieneprodukte spezialisiert. Aufgrund der coronabedingt gesteigerten Nachfrage musste ein Retrofitting innerhalb weniger Tage durchgeführt werden. Da es nicht ausreichte, die Produktion von fünf auf sieben Tage und von zwei auf drei Schichten zu steigern, um die Nachfrage zu decken, wurde eine Umrüstung durchgeführt. Innerhalb von drei Tagen konnten aufgrund des standardisierten Anlagenaufbaus Anpassungen vorgenommen werden. Die Umsetzung der Nachrüstung bestand in der Integration zusätzlicher Kleinspritzaggregate inkl. diverser Softwareupdates [5].

2.2.3 Retrofitting im Haushalt

Obwohl Retrofitting in der Industrie bereits eine signifikante Rolle für die Nachhaltigkeit einnimmt und regelmäßig zum Einsatz kommt, wird das Retrofitting im Haushalt vergleichsweise noch selten angewendet. Um die Nachhaltigkeit in allen Lebensbereichen zu forcieren, gilt es auch im Haushaltsbereich, weitere Schritte zu vollziehen. Das Retrofitting kann hierbei eine nützliche Rolle übernehmen. Es existieren wissenschaftliche Arbeiten, in denen das Retrofitting im Haushalt bereits analysiert und Ansätze dafür erarbeitet wurden. So schlagen die Autoren und Autorinnen von [34] Retrofab ein Design-Tool vor, um anhand von physischen Schnittstellen Nachrüstungen mithilfe von Aktuatoren, Sensoren und anderen Komponenten zu ermöglichen. Damit können das Layout und das Verhalten physischer Schnittstellen neu konstruiert und die Funktionalität erweitert werden. Die Autoren und Autorinnen von [7] gehen weniger auf die Veränderung bestehender Hardware ein, sondern stellen eine eigene Hardware zur Verfügung. Mithilfe vom Iotizer, einem Gerät das die mechanische Ebene anderer Geräte ‚hackt‘ sollen aus Geräten, die keine Verbindung zur Außenwelt aufweisen, IoT-Geräte gemacht werden. Der Iotizer ist einerseits mit der Außenwelt verbunden, andererseits bedient er die Oberfläche alter Geräte. Eine direkte elektronische Verbindung besteht nicht. Damit können bestehende Funktionalitäten des ursprünglichen Geräts genutzt, jedoch keine Erweiterungen implementiert werden. Der Nachrüstungsansatz von [25] und [47] beruht darauf, Elektro-Komponenten von Haushaltsgeräten zu verändern, um Optimierungen im Bereich des Stromverbrauchs zu erzielen. Mithilfe der IoT-Nachrüstung in [29] beweisen die Autoren und Autorinnen anhand einer Fallstudie, dass die Umsetzung eines Retrofitting-Ansatzes anhand eines Wasserkochers auch in der Praxis gelingen kann. Durch das Retrofitting bietet das Gerät Interoperabilität und optimierte Anwendungsmöglichkeiten sowie Stromverbrauchsoptionen. Zudem ist die Nachrüstung übertragbar und somit mit anderen Haushaltgeräten kompatibel.

Innerhalb der vergangenen zehn Jahre wurden vermehrt Retrofitting-Ansätze für Kaffeemaschinen und Kaffeevollautomaten konzipiert. So haben die Autoren und Autorinnen in [3] zusätzlich zur IoT-Nachrüstung versucht, einen Sensor nachzurüsten, der die Mahlvibration misst, um abzuschätzen, wann der letzte Kaffee gemahlen werden kann, bevor die Kaffeebohnen ausgehen und der Kaffeebohnenbehälter aufgefüllt werden muss. Teil dieses Experiments war ein Bosch XDK-Sensor und Microsoft Azure. Der Fokus von [26] lag darauf, eine einfache

Kaffeemaschine mithilfe diverser elektronischer Komponenten, Sensoren und eines Arduinos auf ein IoT-Gerät umzurüsten, das online per Website gesteuert werden kann. In der Arbeit von [28] ging es darum, einen Kaffeevollautomaten zu einem IoT-Gerät umzurüsten und die Kaffee-Konsumption exakt abzurechnen. Das Experiment wurde anhand einer Delonghi Esam 6600 durchgeführt, wobei ein Reverse-Engineering-Prozess als Basis fungierte. Auch in der Arbeit von [6] lag der Fokus darin, einen Kaffeevollautomaten nachzurüsten und ein Abrechnungssystem zu erstellen. Der Unterschied zwischen [6] und [28] liegt darin, dass beim ersten ein Jura-Kaffeevollautomat zum Einsatz kam und die RFID (Radio-Frequency-Identification)-Technologie sowie IT-Sicherheit in diesem Zusammenhang fokussiert wurde. Auch in [40] wurde erforscht, wie die Verwaltung und Bedienung von Kaffeevollautomaten mittels NFC (Near-Field-Communication)-Technologie gewährleistet werden können. Anhand eines Jura XF-50 Kaffeevollautomaten wurden mehrere Lösungsvorschläge vorgestellt. Da in diesen Arbeiten das Retrofitting aus Sicht der Nachhaltigkeit kaum betrachtet und erörtert wurde, soll die vorliegende Arbeit diesen Bereich abdecken.

Kapitel 3

Methodik

Um die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit beantworten zu können, wurde ein Mixed-Methods-Ansatz bestehend aus qualitativer und quantitativer Forschung angewendet. Zu diesem Zweck wurden mehrere Methoden kombiniert, um den Forschungsgegenstand aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten. Im ersten Teil wurde die Softwareentwicklung in Form einer autoethnografischen Studie durchgeführt. Anschließend erfolgte anhand des Prototyps eine gemischte Umfrage unter 120 Studierenden bestehend aus quantitativen und qualitativen Merkmalen. Abschließend wurde anhand des Software-Prototyps eine Laborbeobachtung, kombiniert mit einem semistrukturierten Interview anhand von sechs Testpersonen durchgeführt, um einzelne Fragestellungen präziser beantworten zu können. Durch ausgewählte Literatur und Beispiele aus der Praxis soll der aktuelle Forschungsstand hinzugezogen werden und ein Verbindungsglied zur vorliegenden Forschungsarbeit darstellen. Die Kombination aus Literaturarbeit und der Mixed-Methods-Ansätze trägt dazu bei, dass die Forschungsfragen möglichst ausführlich und exakt beantwortet werden.

3.1 Autoethnografische Studie

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Software anhand einer autoethnografischen Studie zur Steigerung der Nachhaltigkeit im Haushaltsbereich für einen Kaffeevollautomaten entwickelt. Die autoethnografische Studie begann nach der Literaturarbeit, parallel zur Anforderungsdefinition der Software, und endete mit der Fertigstellung des Prototyps. Dokumentiert wurden alle Aktivitäten, Entscheidungs- und Denkprozesse, Prozeduren, Regeln sowie Diagramme und genutzte Artefakte. Alle dokumentierten Elemente wurden chronologisch erfasst und in gleicher Abfolge beschrieben. Die erfassten Ressourcen und Erkenntnisse sollen Neueinsteigern und Neueinsteigerinnen eine Art Referenzprozess darbieten, um zielführend eine Software für Haushaltsgeräte während eines Reverse-Engineerings-Prozesses zu entwickeln.

3.2 Studie

Im Zuge der Lehrveranstaltung ‚Technische Grundlagen der Informatik‘ an der Universität Wien wurde im November 2022 eine Umfrage mit 120 Studierenden durchgeführt. Zunächst wurden in einer 20-minütigen Präsentation die Entwicklungsphasen des Prototyps vorgestellt. Anschließend erfolgte eine zehnminütige Live-Demo des Prototyps und die Umfrage als Abschluss. Die Teilnehmenden hatten ca. fünf Minuten Zeit, um an der Online-Studie per QR-Code teilzunehmen. Alle Studienteilnehmer und Studienteilnehmerinnen konnten per Mobiltelefon auf die Fragen zugreifen und den Fragebogen ausfüllen. Der Fragebogen wurde insgesamt 120-mal aufgerufen und ausgefüllt, wobei 100 Personen den Fragebogen vollständig abgeschlossen haben. Alle vollständig ausgefüllten Fragebögen wurden in die Analyse einbezogen. Unvollständige Fragebögen wurden gesondert in die Analyse aufgenommen. Ausgehend vom persönlichen Zugang der Studienteilnehmer und Studienteilnehmerinnen zur Nachhaltigkeit und dem Retrofitting-Prozess inkl. Nachrüstmodul soll das implementierte Ergebnis auf seine Zweckmäßigkeit hinsichtlich der Nachhaltigkeit hin untersucht werden.

3.3 Laborbeobachtung mit Interview

Im Zeitraum von Jänner bis März 2023 wurden vorwiegend spätnachmittags sieben Teilnehmer und Teilnehmerinnen inkl. ein Testpilot zur Durchführung einer Nachrüstung sowie eines Interviews an der Universität Wien im Forschungslabor der Forschungsgruppe Cooperative Systems empfangen. Der Teilnehmerkreis bestand zu 50 Prozent aus Personen mit IT-Background und zu 50 Prozent ohne IT-Background. Damit sollte gewährleistet werden, dass die Ergebnisse nicht nur auf eine spezifische Personengruppe zutreffen. Mit dem Einverständnis aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen wurden sowohl die Beobachtungen als auch die Interviews aufgezeichnet, um die Ergebnisse effektiver zu erfassen. Jener Nachrüstsatz, der anhand der autoethnografischen Studie entwickelt wurde, wurde den Teilnehmern und Teilnehmerinnen zur Umrüstung einer Kaffeemaschine bereitgestellt. Alle sieben Teilnehmer und Teilnehmerinnen führten im ersten Schritt die Nachrüstung durch, die in Form einer Laborbeobachtung stattfand. Anschließend wurde ein semistrukturiertes Interview durchgeführt. Dabei nahmen das Retrofitting und die Nachhaltigkeit zentrale Stellungen ein. Im Durchschnitt nahm jede Beobachtung zehn bis 15 Minuten und jedes Interview 15 bis 20

Minuten in Anspruch. Alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen führten die Nachrüstung nahezu unter gleichen Bedingungen durch und jedem Teilnehmer und jeder Teilnehmerin wurden dieselben Fragen gestellt, wobei durch die Eigendynamik des Gesprächs mit jedem Teilnehmer und jeder Teilnehmerin neue Aspekte zum Vorschein kamen. In die darauffolgende Auswertung flossen die qualitativen Ergebnisse aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen ein. In diesem Zusammenhang konnte untersucht werden, in welchem Ausmaß das Ergebnis eines Reverse-Engineering-Prozesses in Form eines Retrofitting-Moduls durch Benutzer und Benutzerinnen im Sinne der Nachhaltigkeit genutzt werden kann sowie inwiefern das Retrofitting im Haushaltsbereich zur Nachhaltigkeit beiträgt und ob es eine akzeptable Alternative in Form einer Nachhaltigkeitsmethode darstellt.

3.4 Analyse und Gütekriterien

Während im vorhergehenden Kapitel die Rahmenbedingungen für die durchgeführten Tätigkeiten zur Datenerhebung beschrieben wurden, liegt der Fokus im folgenden Absatz auf den Rahmenbedingungen für die Datenanalyse sowie den Gütekriterien. Die Gütekriterien stellen einen Qualitätsindikator für die vorliegende Forschungsarbeit dar, den es aus wissenschaftlicher Sicht zu gewährleisten gilt.

Anhand einer autoethnografischen Studie wurde das Verhalten während der Entwicklung eines Nachrüstsatzes unter definierten Bedingungen dokumentiert. Es wurde ein Einzelfall untersucht, um neue empirische Informationen zu gewinnen und ein Vorgehensmodell zu etablieren. Für die Datenanalyse wurden zunächst alle Ressourcen während der autoethnografischen Studie gesammelt und anschließend als chronologische Darstellung mit ihren Merkmalen und Alternativen beschrieben.

Im Anschluss an die autoethnografische Studie wurde eine großangelegte Studie durchgeführt. Die Daten der großangelegten Studie waren sowohl quantitativer als auch qualitativer Art, wodurch sie auf zwei Arten analysiert wurden. Während die quantitativen Daten direkt anhand von statistischen Tests ausgewertet wurden, wurden die qualitativen Daten im ersten Schritt Kategorien zugeordnet und anschließend statistisch ausgewertet. Durch induktive Kategorienbildung konnten Kategorien für die Zuordnung definiert werden.

Abschließend wurden Beobachtungen mit Interviews durchgeführt. Als Datenerhebungsverfahren wurde eine systematische Beobachtung ausgewählt. So wurde

im Vorhinein definiert, was es zu beobachten gibt und in welcher chronologischen Reihenfolge dies geschehen soll. Durch die chronologische Reihenfolge konnten die qualitativen Daten beschreibend miteinander verglichen und ausgewertet werden. Alle Teilnehmenden, die an der Beobachtung teilnahmen, wurden auch zu einem Interview eingeladen. Alle semistrukturierten Interviews wurden anhand eines vordefinierten Fragekatalogs durchgeführt und die qualitativen Daten in einem beschreibenden Vergleich analysiert und aufbereitet.

Die drei Gütekriterien der quantitativen Forschungsmethode - Reliabilität, Validität und Objektivität - sind in dieser Arbeit sichergestellt. Alle Ergebnisse der quantitativen Studie sind reliabel, da bei erneuter Durchführung im Regelfall näherungsweise dieselben Antworten erhalten werden. Die Ergebnisse sind valide, da die angestrebten Zielgrößen gemessen werden und zur Beantwortung der Forschungsfragen beitragen. Zur Sicherung der Objektivität wird in jedem Prozessschritt gewährleistet, dass die Durchführung der Studie unbeeinflusst stattgefunden hat und ausgewertet wurde.

Neben den Gütekriterien der quantitativen Forschungsmethode werden auch die Gütekriterien der qualitativen Forschungsmethode (Transparenz, Intersubjektivität und Reichweite) erfüllt. Alle relevanten Prozess- und Arbeitsschritte wurden detailliert dokumentiert, sodass vollständige Transparenz für Außenstehende gegeben ist. Bei der vorliegenden Forschungsarbeit ist Intersubjektivität gegeben, indem die gewonnenen Daten weitgehendst nicht auf subjektivem Werturteil beruhen, sondern für jeden Außenstehenden gleichermaßen erkennbar sind, insbesondere durch die ausführliche Diskussion und Reflexion. Auch die Reichweite ist aufgrund der Möglichkeit gegeben, die Forschungsergebnisse unter vergleichbaren Bedingungen bei Wiederholung zu reproduzieren.

Somit kann davon ausgegangen werden, dass sowohl für die quantitative als auch für die qualitative Forschung alle relevanten Gütekriterien erfüllt werden und eine vollwertige Forschungsarbeit vorliegt.

Kapitel 4

Analyse

Um den Anforderungen gerecht zu werden, die im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeit im Haushaltsbereich stehen, sollen ausgeklügelte Retrofitting-Ansätze von Haushaltsgeräten als effiziente Lösung genutzt werden. Das Retrofitting von Haushaltsgeräten soll dazu beitragen, dass einerseits bestehende Produkte weiterhin verwendet werden und andererseits möglichst viele Bedürfnisse, die zu einem Neukauf bewegen würden, durch das Retrofitting abgedeckt werden. Damit sollen Vorteile für den Einzelnen entstehen und das System als Ganzes profitieren. Hierzu zählen vor allem Konsumenten und Konsumentinnen sowie Hersteller und Herstellerinnen von Retrofitting-Ansätzen sowie die Gesellschaft und die Umwelt als Grundlage für den Menschen. Für Konsumenten und Konsumentinnen bedeutet Retrofitting nicht nur, dass Kosten gespart werden können, sondern auch, dass altbewährtes weiterhin genutzt werden kann, ohne die vollständige Funktionalität neu erlernen zu müssen. Als Kosten können sowohl monetäre Beträge für die Anschaffung von Neugeräten und mögliche Entsorgungskosten definiert werden als auch Kosten in Form von Zeit, die im Zusammenhang mit dem Anschaffungs- und Entsorgungsprozess stehen, wie auch die Zeit, die für das Kennenlernen und die bestimmungsgemäße Produktnutzung inklusive aller Funktionalitäten benötigt wird. Jene Hersteller und Herstellerinnen, die das Konzept des Retrofittings möglichst zeitnah in ihr Geschäftsmodell integrieren, können eine Vorreiterstellung in diesem Bereich einnehmen und somit Profite erwirtschaften. Wie aufwendig Geräte nachgerüstet werden können, hängt davon ab, ob die Nachrüstung bereits Teil des Produktentwicklungsprozesses war. Je mehr Details in diesem Zusammenhang bereits bei der Produktentwicklung beachtet wurden, desto einfacher ist es, neue Funktionalitäten und Nachrüstungen in bestehende Produkte zu integrieren. Ein modularer Aufbau kann nicht nur dazu beitragen, dass Geräte einfacher, schneller und günstiger aufgerüstet werden können, sondern auch, dass vielfältige Möglichkeiten für die Kreislaufwirtschaft entstehen. Komponenten, die nicht mehr repariert werden können, können durch neue ersetzt werden, ohne komplette Geräte entsorgen zu müssen. Sollte das Gerät dennoch entsorgt werden, können alle funktionierenden Komponenten pro-

blemlos ausgebaut werden und als Ersatz für andere Geräte fungieren. Dadurch können Ressourcen nachhaltiger und vor allem langfristig genutzt werden. Aus ökonomischer Sicht entsteht ein optimierter Markt aus Angebot und Nachfrage, der in vielerlei Hinsicht dem heutigen Markt überlegen ist, der zumeist auf neue Produkte ausgelegt ist. Da aktuell die meisten Hersteller und Herstellerinnen noch auf ein Geschäftsmodell setzen, bei dem die Produktion im Fokus steht, gilt es zu untersuchen, mit welchem Aufwand Haushaltsgeräte upgegradet werden können und wie das Retrofitting von der Kundschaft aufgenommen wird. Da elektronische Haushaltsgeräte nahezu in jedem Haushalt verwendet werden und in den meisten Fällen keine IoT-Geräte darstellen, können Retrofitting-Ansätze in diesem Bereich nicht nur zur Nachhaltigkeit beitragen, sondern auch zu einem generellen ökonomischen Paradigmenwechsel führen. Im Folgenden wird anhand eines Kaffeevollautomaten ein Retrofitting-Modell erstellt, um die definierten Hypothesen anhand eines Experiments zu überprüfen.

4.1 Umfang und Annahmen

Ein Kaffeevollautomat, der bisher nur physisch bedient werden konnte, wird im Folgenden zu einem IoT-Gerät upgegradet. Das Retrofitting erfolgt anhand einer zusätzlichen Platine, die zwischen der Bedien- und Hauptplatine eingebaut wird, um den Kaffeevollautomaten mit dem Internet zu verbinden. So soll das Gerät einerseits Befehle empfangen und ausführen können, andererseits sollen Daten ausgelesen werden. Die Steuerung erfolgt anhand einer REST (Representational-State-Transfer)-Schnittstelle und kann jederzeit durch eine bzw. mehrere Applikationen ergänzt werden. Dem Benutzer oder der Benutzerin eröffnen sich dadurch vielfältige Möglichkeiten, von der Kaffeezubereitung bis hin zur Kaffeeconfiguration und dem Abrufen von Statistiken.

4.1.1 Hardware-Annahmen

Der Kaffeevollautomat wird nach der Umrüstung sowohl manuell als auch per Schnittstelle bedient werden können. Zusätzliche Funktionen, die bisher nicht zur Verfügung standen, beispielsweise statistische Auswertungen, können durch die Aufrüstung nur per Applikation genutzt werden.

Die Funktionalität der Bedienplatine wird durch die Schnittstelle abgedeckt. Daher kann die Bedienplatine problemlos durch andere Hardware ersetzt oder komplett entfernt werden. Sollte die Bedienplatine komplett entfernt werden,

kann der Kaffeevollautomat ausschließlich durch die Schnittstelle bedient werden. Das Anbringen einer modifizierten oder neuen (nicht baugleichen) Bedienplatine ist für dieses Experiment nicht vorgesehen.

Die Komponenten im Kaffeevollautomaten können weiterhin ausschließlich durch die Hauptplatine mittels einer Zusatzplatine und einer Schnittstelle angesprochen werden. Somit wird ausgeschlossen, dass die Zusatzplatine direkt mit den einzelnen Hardware-Komponenten kommuniziert.

4.1.2 Userbasierte Annahmen

Eine Login-Funktion ist aufgrund ihres eingeschränkten Mehrwerts für das Experiment beim Prototyp nicht vorgesehen. Aufgrund des modularen Aufbaus kann diese Funktionalität jederzeit implementiert und an das System angebunden werden.

Aufgrund der fehlenden Login-Funktion wird ebenfalls keine rollenbasierte Nutzung zur Verfügung gestellt. Somit können sämtliche Funktionalitäten durch jeden User und jede Userin genutzt werden.

4.1.3 Security-Annahmen

Da es keine User-Authentifizierung beim Prototyp gibt, können alle auf das System bzw. auf die Schnittstelle – sofern sie zugänglich ist - zugreifen und Aktionen ausführen. Es wird davon ausgegangen, dass IT-Security für das Experiment nicht von Relevanz ist und daher keine sicherheitsrelevanten Vorkehrungen getroffen werden müssen. Auch hier wird das System dahingehend designt, etwaige zukünftige Erweiterungen zu ermöglichen.

4.1.4 Kommunikative Annahmen

Es wird angenommen, dass Befehle rein sequentiell abgearbeitet werden können. Daher werden sämtliche Befehle ignoriert, die während einer Aktion an den Kaffeevollautomaten mittels Applikation gesendet oder manuell ausgeführt werden. Sobald eine Aktion vollständig abgeschlossen wurde, kann die nächste gestartet werden.

Der Kaffeevollautomat muss eingeschaltet werden (per Applikation oder manuell), bevor weitere Aktionen durchgeführt werden können. Ist das Gerät ausgeschaltet, werden alle Funktionsaufrufe bis auf das Einschalten ohne Ausnahme ignoriert.

4.2 Funktionale Anforderungen

In Anlehnung an die zuvor definierte Analyse und unter Hinzunahme aller Annahmen sollen funktionale Anforderungen für das zu entwickelnde Produkt definiert werden. Die funktionalen Anforderungen beschreiben die gewünschte Funktionalität und wie sich das System verhalten soll. Aus dem Appendix kann die allumfassende Anforderungsliste entnommen werden. Im Nachfolgenden wird eine gekürzte Form der funktionalen Anforderungsliste illustriert:

- Der Kaffeevollautomat kann ein- und ausgeschaltet werden.
- Der Kaffeevollautomat bereitet eine Tasse Kaffee zu.
- Der Kaffeevollautomat bereitet gleichzeitig eine Doppeltasse Kaffee zu.
- Die Dampffunktion wird aktiviert und der Kaffeevollautomat wird darauf vorbereitet, Dampf auszugeben. Der Dampf kann durch die manuelle Betätigung des Dampfhebels ausgelöst werden.
- Der Kaffeevollautomat führt einen Spülvorgang durch.
- Der Kaffeevollautomat wird in den Energiesparmodus versetzt.
- Der Kaffeevollautomat signalisiert, dass entweder der Wassertank nicht korrekt eingesetzt wurde oder das Wasser im Wassertank für weitere Operationen nicht ausreicht. Somit soll der Zustand der Tank-Kontrolllampe erfasst und wiedergegeben werden.
- Der Kaffeevollautomat signalisiert, dass entweder der Kaffeesatzbehälter voll ist oder nicht korrekt eingesetzt wurde. Der aktuelle Zustand der Behälter-Kontrolllampe soll erfasst und wiedergegeben werden.
- Der Kaffeevollautomat signalisiert, dass entweder der Energiesparmodus ein- oder ausgeschaltet ist. Der aktuelle Energiesparzustand soll erfasst und dargestellt werden.
- Der Kaffeevollautomat illustriert den aktuellen Dampfmodus anhand der Dampf-Kontrolllampe. Dieser Zustand soll erfasst und dargestellt werden.
- Der Zustand der einfachen Tassen-Kontrolllampe soll erfasst und dargestellt werden. Daraus lässt sich ableiten, ob eine Tasse Kaffee zubereitet wird.
- Der Zustand der Doppeltassen-Kontrolllampe soll erfasst und dargestellt werden. Daraus lässt sich ableiten, ob zwei Tassen Kaffee zubereitet werden.
- Der Kaffeevollautomat signalisiert durch die beiden durchgehend eingeschalteten Kontrolllampen (einfache und doppelte Tasse), dass er betriebsbereit ist. Der betriebsbereite Zustand soll erfasst und dargestellt werden.
- Der aktuelle Zustand aller Kontrolllampen soll zeitgleich erfasst und wiedergegeben werden.

4.3 Nicht funktionale Anforderungen

Mithilfe von nicht funktionalen Anforderungen soll festgelegt werden, wie gut ein System Funktionen ausführt und Leistung erbringt. Der Standard ISO-25010/9126 in Abb. 2 von [39] bietet eine kompakte Übersicht zur Klassifikation qualitativer Merkmale. Darüber hinaus können nicht funktionale Anforderungen in zwei Sichten aufgeteilt werden; die interne und externe Sicht. Die interne Sicht vermittelt jene Qualitätsanforderungen, die vorwiegend für Entwickler und Entwicklerinnen, IT-Support und sonstiges technisches Fachpersonal von Interesse sind. Die externe Sicht beinhaltet zumeist Qualitätsanforderungen, die aus Sicht des Benutzers oder der Benutzerin von Bedeutung sind. Mithilfe der Anforderungen aus der internen Sicht sollen die Wartbarkeit, Portierbarkeit und die Interoperabilität festgelegt werden. In der vorliegenden Arbeit werden diese drei Subkategorien mit qualitativen Anforderungskriterien an das IT-System ausgestattet. Die externe Sicht beinhaltet Performance-, Usability-, Sicherheits-, Zuverlässigkeits- und Funktionalitätsanforderungen. Hier werden sowohl qualitative als auch quantitative Anforderungskriterien festgelegt.

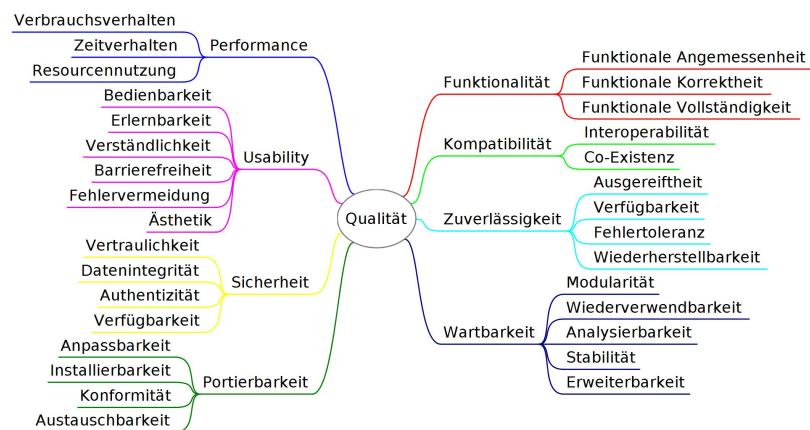


Abbildung 2. Klassifikation qualitativer Merkmale [39]

4.3.1 Interne Sicht

Im Bereich der Performanceanforderungen nimmt die Startzeit der einzelnen Funktionen aufgrund der Verbindung zur Usability eine wesentliche Rolle ein. Hier liegt die zeitliche Messgrenze bei zehn Sekunden. Jede Funktion soll somit nach maximal zehn Sekunden starten, wobei 90 Prozent der Aufrufe unterhalb von fünf Sekunden liegen sollen. Weitere Performanceanforderungen im Bereich des Verbrauchsverhaltens und der Ressourcennutzung werden nicht definiert.

Der Fokus der Usability-Anforderungen liegt auf der Bedienbarkeit, Erlernbarkeit und Verständlichkeit. Personen, die dieses Modul verwenden, sollen anhand einer vordefinierten Anleitung die Bedienung erlernen. Sofern durch die Anleitung eine erwartete Nutzung gewährleistet werden kann, kann davon ausgegangen werden, dass die Person die Bedienung erlernt hat. Die Verständlichkeit wird sichergestellt, indem der Benutzer oder die Benutzerin das System ohne Anleitung und vollständig zur eigenen Zufriedenheit nutzen kann. Da beim vorliegenden Projekt eine REST-Schnittstelle zur Verfügung gestellt wird, nehmen die anderen drei Subkategorien eine untergeordnete Rolle ein, weshalb für sie keine Anforderungen definiert werden.

Im Bereich der Sicherheitsanforderungen werden für den Prototyp keine relevanten Anforderungen festgelegt. Der Zugriff auf das System erfolgt ohne User-Authentifizierung. Es wird davon ausgegangen, dass der Prototyp in einer sicheren Umgebung zum Einsatz kommt. Für allfällige weitere Entwicklungen sollten Anforderungen in diesem Bereich definiert werden.

Unter Zuverlässigkeitsanforderungen wird die Verfügbarkeit des Systems definiert, die unter bestimmten Umgebungsumständen gewährleistet werden soll. Eine definierte Fehlertoleranzgrenze in Bezug auf Funktionsausführungen soll nicht überschritten werden. Der zu entwickelnde Prototyp soll eine Fehlertoleranzgrenze von maximal 20 Prozent aufweisen; das heißt, mindestens acht von zehn Befehlen sollen korrekt ausgeführt werden. Sofern das System nach Ablauf einer festgelegten Zeitspanne nicht reagiert hat, soll der vorherige Ausgangszustand hergestellt werden. In diesem Zusammenhang soll nach 20 Sekunden der ursprüngliche Zustand wieder zur Verfügung gestellt werden. Da es sich um einen Prototyp handelt, wird hinsichtlich der Ausgereiftheit keine Anforderung definiert.

Die Funktionalitätsanforderungen korrelieren stark mit den funktionalen Anforderungen. Funktionen sollen nicht nur implementiert werden, sondern auch ein gewisses Maß an Vollständigkeit und Korrektheit aufweisen. Im zu entwi-

ckelnden System soll gewährleistet werden, dass die implementierten Funktionen mit der physischen Betätigung und Einleitung von Funktionen übereinstimmen. Sofern die Ergebnisse einander gleichen, kann von Vollständigkeit und Korrektheit ausgegangen werden.

4.3.2 Externe Sicht

Das zu entwickelnde System soll alle Wartbarkeitsanforderungen erfüllen. In diesem Zusammenhang soll die Anwendung nicht nur modular und erweiterbar aufgebaut werden, sondern auch eine hohe Wiederverwendbarkeit aufweisen. Eine optimale Wiederverwendbarkeit ist gegeben, wenn die Software nicht nur für eine bestimmte Maschine gedacht ist, sondern auch mit diversen anderen Maschinen kompatibel ist, und vor allem dann, wenn mehrere unterschiedliche Modelle damit bedient werden können. Sofern das System modular aufgebaut ist, können Teile davon ohne übermäßigen Aufwand durch andere Teile ersetzt werden. Als Voraussetzung gilt hierbei, dass das System eine Schnittstelle anbietet, damit eine Kommunikation nach außen ermöglicht wird und alle benötigten Ressourcen zur Verfügung gestellt werden. Für das vorliegende Projekt bedeutet dies, dass die Software nicht nur als ein gesamtes Modul nach außen auftreten soll, sondern auch innerhalb dieser Software eine Modularität durch überschaubare und kontrollierbare Konstrukte gesichert werden soll. Durch weitergehende Anforderungen können sich Erweiterungen ergeben; aus diesem Grund soll die Software auch ein gewisses Maß an Erweiterbarkeit zulassen. Eine ausführliche Dokumentation in Verbindung mit einem öffentlich zugänglichen Programmiercode unter Beachtung eines modularen Softwareaufbaus sollen die Erweiterbarkeit als Anforderung erfüllen.

Eine entscheidende Anforderungskategorie stellt die Portierbarkeit hinsichtlich der Langlebigkeit dar. Damit die Software keine kurzfristige Laufzeit aufweist, soll die Anpassbarkeit und Austauschbarkeit gewährleistet werden. Unter der Voraussetzung, dass die Software ohne übermäßigen Aufwand angepasst und ausgetauscht werden kann, wird davon ausgegangen, dass ein hoher Grad an Anpassbarkeit und Austauschbarkeit vorliegt. In diesem Zusammenhang soll nicht nur die Möglichkeit geboten werden, einen Austausch zu ermöglichen, sondern auch die tatsächliche Anbindung an eine spezifische Umgebung gewährleistet werden. Durch die Bereitstellung einer Installationsanleitung und einer raschen Anbindung wird ein hohes Maß an Installierbarkeit ermöglicht. Eine rasche Anbindung bedeutet, dass Benutzer und Benutzerinnen das Softwaremodul innerhalb

von maximal 15 Minuten an das vorliegende System anbinden können sollen. Durch die Kompatibilitätsanforderungen soll die Interoperabilität und Koexistenz zwischen der zu entwickelnden Software und anderen Systemen ermöglicht werden. Mithilfe einer standardisierten Schnittstelle und einem standardisierten Datenaustauschformat soll ein optimales Zusammenspiel entstehen.

4.3.3 Sonstige Anforderungen

Unter sonstigen Anforderungen werden im Folgenden hardwaretechnische Anforderungen verstanden. So wird für das vorliegende Projekt ein Mikrocontroller benötigt, der mindestens über einen Systemtakt von 160 Megahertz verfügt, damit die Datenübertragung möglichst schnell erfolgen kann. Zudem soll der Befehlsspeicher des Mikrocontrollers mindestens 64 Kilobyte RAM und der Datenspeicher 96 Kilobyte RAM aufweisen. Eine weitere Anforderung an den Mikrocontroller ist die Anzahl der verfügbaren Pins. So werden mindestens drei digitale Pins für die In- und Output-Operationen sowie ein analoger Pin für den Input benötigt. Ein integriertes WLAN ist für die drahtlose Vernetzung erforderlich.

4.4 Anwendungsfälle

Das nachfolgende Use-Case-Diagramm in Abb. 3 soll einerseits eine Zusammenfassung der funktionalen Anforderungen als grafische Visualisierung illustrieren und andererseits einen Einstiegspunkt für die Entwicklung eines passenden Systems darstellen. Darüber hinaus können die wesentlichen Kernelemente System, Akteur oder Akteurin sowie Use-Cases, miteinander verbunden werden und zu einem besseren Verständnis darüber beitragen, wie sie miteinander interagieren. Die exakte Reihenfolge, in der die einzelnen Use-Cases auszuführen sind, kann anhand dieses Diagramms nicht veranschaulicht werden; für diesen Zweck wurden exakte Use-Case-Beschreibungen angefertigt. Diese Use-Case-Beschreibungen inklusive Vor- und Nachbedingungen sowie Erfolgsszenario und Erweiterungen können im Appendix betrachtet werden.

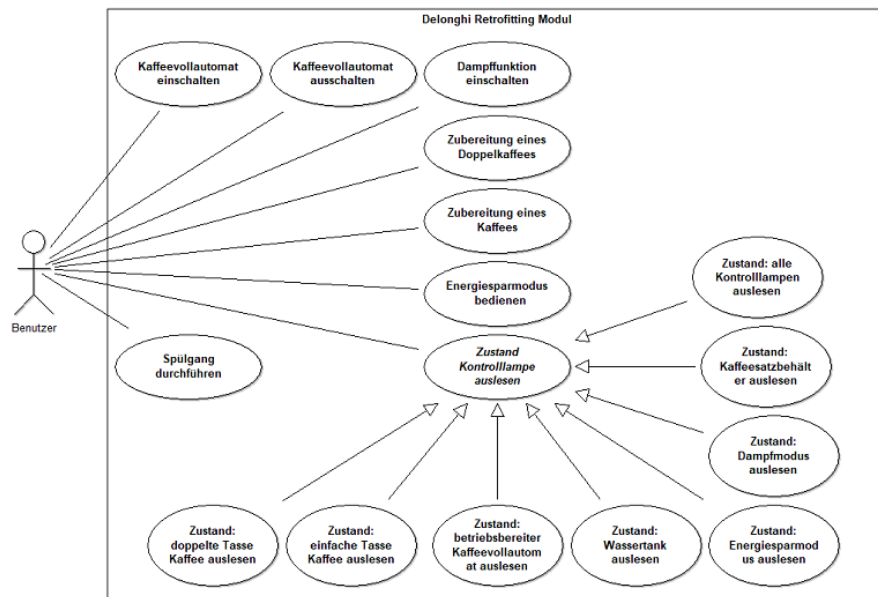


Abbildung 3. Use-Case-Diagramm

Kapitel 5

Konzeption

5.1 Kaffeevollautomat Komponenten

Der Delonghi-Kaffeevollautomat Esam 2600 besteht intern aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten. Jede Komponente stellt ein eigenes Subsystem dar und bietet eine bestimmte Funktionalität. Abbildung 4 illustriert die Verbindungen zwischen der Hauptplatine und den Komponenten, die sie durch den Mikrocontroller ansteuert.

Zum ursprünglichen Aufbau des Kaffeevollautomaten wird zusätzlich die Verbindung zum Retrofitting-Modul und dem Benutzersystem veranschaulicht. Beim Mikrocontroller können vier grundlegende Operationsformen identifiziert werden: Einerseits bestehen In- und Output-Operationen zwischen dem Mikrocontroller und der Bedienplatine, andererseits liefern Sensoren einen Input an den Mikrocontroller und Aktuatoren werden mit Output-Befehlen durch den Mikrocontroller angesteuert. Die direkte physische Verbindung zwischen der Hauptplatine und den Bauteilen kann anhand der Abb. 5 in Anlehnung an [51] betrachtet werden.

5.1.1 Hauptplatine

Jene Hauptplatine, die im vorliegenden Projekt zum Einsatz kommt (Delonghi-Code: 5213211641), wird in unterschiedlichen Delonghi-Kaffeevollautomaten-Modellen verbaut, z. B. ebenfalls im ESAM 4000.B EX:1. Bei bestimmten Modellen wird die gleiche Hauptplatine verwendet, wobei geringfügige Unterschiede in der Software oder Steckerbelegung bestehen, z. B. bei der ECAM 22.110.B. Der Mikrocontroller selbst verfügt über eine Software, um sämtliche Komponenten inkl. Bedienplatine zu steuern, wobei auf die Software des Mikrocontrollers in der vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen wird.

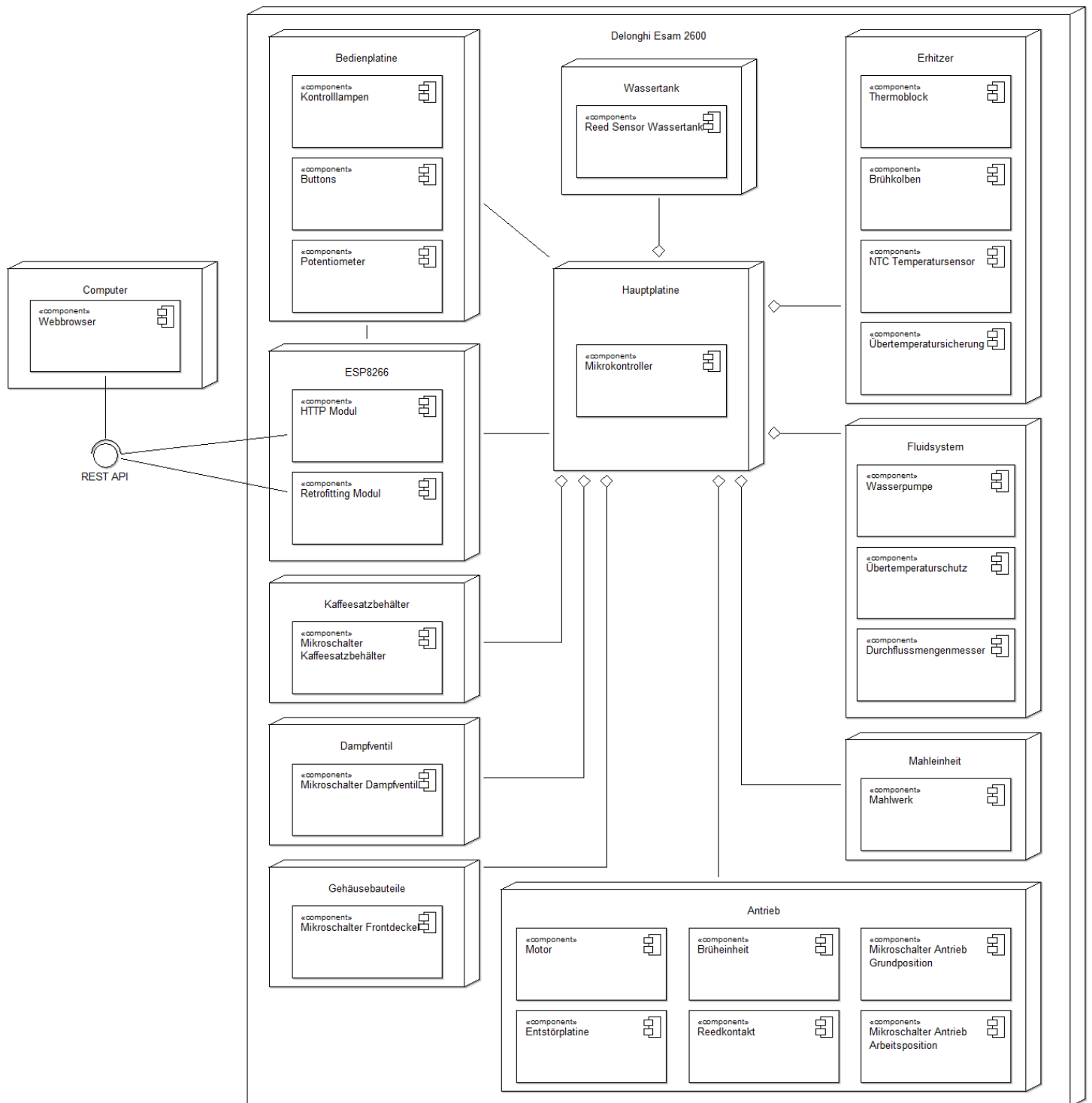


Abbildung 4. Deployment-Diagramm

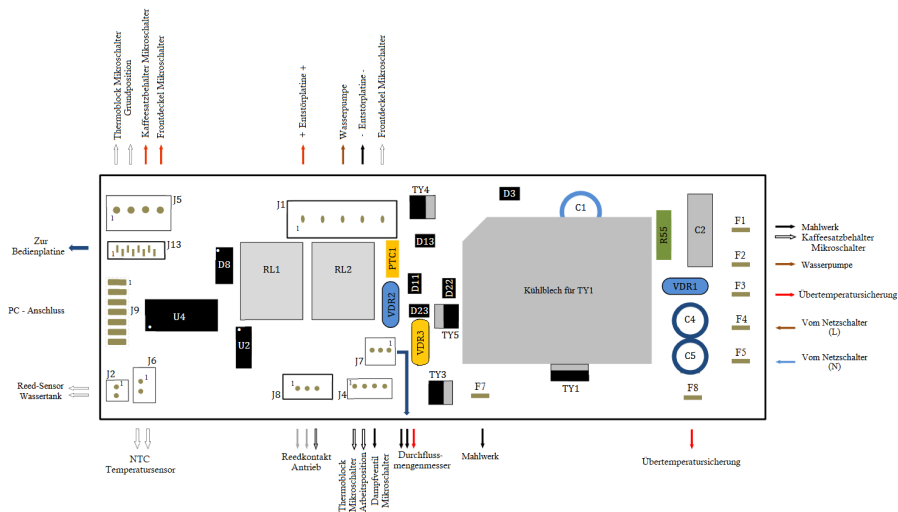


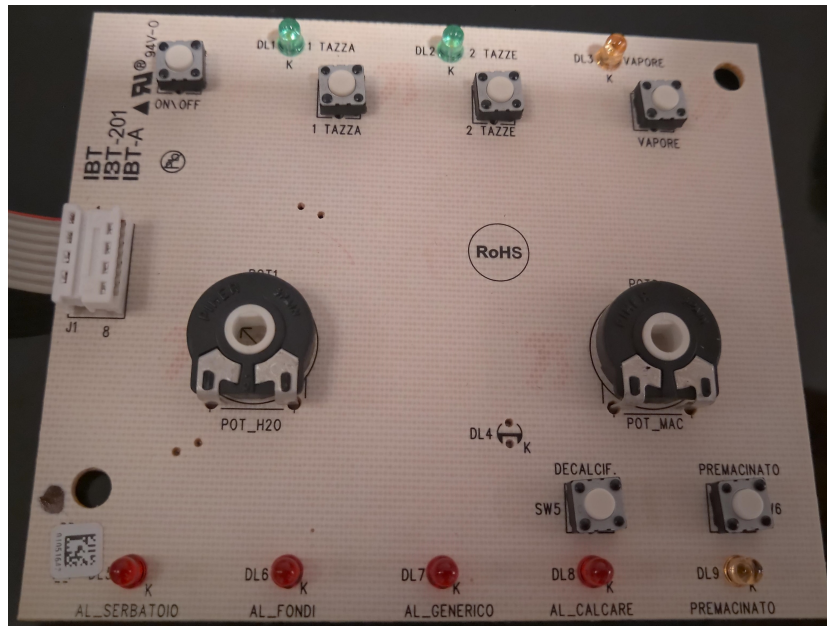
Abbildung 5. Hauptplatine Komponentenverbindungen

5.1.2 Bedienplatine

Die Bedienplatine ist das physische Verbindungsglied zwischen einem Benutzer oder einer Benutzerin und dem Kaffeevollautomaten. Mit ihrer Hilfe werden Funktionen aufgerufen und an die Hauptplatine zur Weiterverarbeitung übermittelt. Darüber hinaus können mit ihr Maschinenzustände anhand von Kontrolllampen abgelesen werden. Insgesamt sind sechs Buttons, zwei Potentiometer und acht Kontrolllampen auf der Bedienplatine vorhanden, vgl. dazu Abb. 6. Die Verbindung zur Hauptplatine besteht über ein Flachbandkabel mit achtfachem Picoflex-Steckverbinder.

5.1.3 Kaffeesatzbehälter

In den Kaffeesatzbehälter fallen jene Teile des Kaffees, die nach dem Brühvorgang übrig bleiben. In den meisten Fällen werden sie in Form eines festgepressten Klumpens erhalten, bestehend aus gemahlene Kaffeebohnen. Durch einen Mikroschalter kann überprüft werden, ob der Kaffeesatzbehälter korrekt eingesetzt ist.



Sobald ein Kaffee angefordert wird, mahlt die Mahleinheit eine bestimmte Menge an Kaffeebohnen und leitet den gebildeten Brei an die Brüheinheit weiter. Für gewöhnlich fällt das gemahlene Pulver aus dem Mahlwerk direkt in die Brüheinheit.

5.1.7 Antrieb

Mithilfe des Antriebs, bestehend aus einem Motor und einer Entstörplatine, wird die Brüheinheit bewegt. Hierbei können zwei Positionen eingenommen werden; die Grundposition und die Arbeitsposition. Beide Positionen werden mithilfe von Mikroschaltern identifiziert.

5.1.8 Fluidsystem

Das Fluidsystem im Kaffeevollautomaten wird zum Transport des Wassers unter bestimmten Druckverhältnissen genutzt. Durch eine Wasserpumpe wird das System angetrieben, wobei mithilfe des Durchflussmengenmessers ein Sensor zur Verfügung steht, der die Wassermenge misst, die durch die Schläuche fließt. Damit der Motor vor einer Überhitzung geschützt wird, kommt ein Thermofühler zum Einsatz.

5.1.9 Erhitzer

Ein Durchlauferhitzer wird genutzt, um Wasser während des Brühvorgangs zu erhitzen. Während der Thermoblock mit einem Brühkolben für die Erhitzung zuständig ist, misst der Negative-Temperature-Coefficient-Sensor (NTC-Sensor) die Temperatur und leitet den Wert an die Hauptplatine weiter. Eine Über-temperatursicherung sorgt dafür, dass der Stromkreis bei Überschreiten einer bestimmten Temperatur abgeschaltet wird.

5.2 Kommunikationsprotokoll

Die Identifikation und Interpretation des Kommunikationsprotokolls zwischen der Bedien- und Hauptplatine wird für die Implementierung des Retrofitting-Softwaremoduls benötigt. Da die Bedienplatine über keinen eigenständig handelnden Mikrocontroller verfügt, kann davon ausgegangen werden, dass keine standardisierte Kommunikationsform vorliegt, wie über Serial Peripheral Interface (SPI) oder Inter-Integrated Circuit (I²C). Daher ist es erforderlich, im ersten Schritt die elektronischen Bauelemente sowie Stromläufe der beiden Platinen zu analysieren, interpretieren und dokumentieren. Weiterhin kann anhand von Stromlaufplänen und Datenblättern einzelner Bauelemente ein Kommunikationsmuster identifiziert werden. Anhand des Kommunikationsprotokolls können die Arbeitsweisen der einzelnen Funktionalitäten des Kaffeevollautomaten ermittelt werden, wodurch ein funktionierendes Softwaremodul implementiert werden kann.

5.2.1 Bedienplatine

Bei der Bedienplatine handelt es sich um eine eindimensionale Leiterplatte. Es gibt eine Top-Seite, siehe dazu Abb. 6, und eine Lötseite, siehe Abb. 7. Während sich auf der Top-Seite alle physischen Bedienteile befinden, sind auf der Lötseite alle elektronischen Bauelemente mit der Leiterplatte durch Lötverbindungen verbunden. Die Lötseite verfügt zwei fortgeschrittene Bauelemente; einen Multiplexer und ein Shift-Register. Beide erfüllen wesentliche Aufgaben hinsichtlich der Ansteuerung der Bedienelemente.

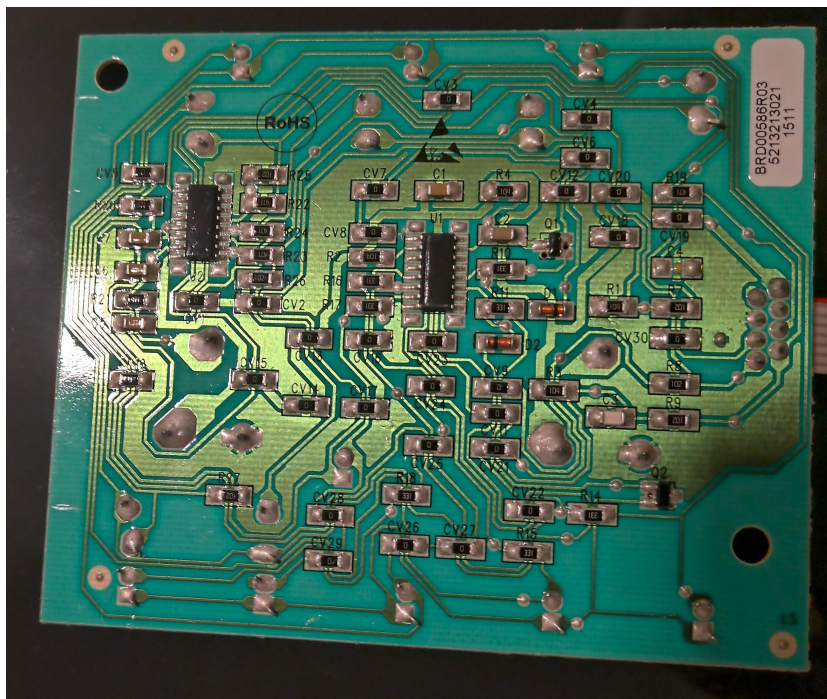


Abbildung 7. Bedienplatine Lötseite

5.2.1.1 Shift-Register Ein Schieberegister beinhaltet Speicherblöcke, die jeweils einen Zustand, entweder LOW oder HIGH, speichern können. Zu einem gegebenen Zeitpunkt wird jeweils nur der erste Speicherblock befüllt. Sobald ein Flankenwechsel des Shift-Register-Clock-Pins (SHCP) von LOW auf HIGH erfolgt, wird der aktuelle Bit-Wert an den nächsten Speicherblock sequentiell

weitergegeben. Nachdem alle Speicherblöcke einen gültigen Logik-Wert innehaben, kann ein Flankenwechsel des Storage-Register-Clock-Pins (STCP) erfolgen. Dies hat zur Folge, dass der Inhalt des Schieberegisters in das Ausgaberegister geschrieben wird. Das Ausgaberegister beinhaltet alle Speicherzustände, bis der nächste Flankenwechsel des STCP erfolgt. Die Bedienplatine verfügt über ein Shift-Register mit einem 8-Bit seriellen Input und einem 8-Bit parallelen Output mit der Modellnummer 74HC4094. Während der Input-Kanal D einen Wert für den aktuellen Speicherblock liefert, übernimmt der Input-Kanal CLK die Funktion des SHCP und der Input-Kanal STR die Funktion des STCP. Der aktuelle Zustand im Ausgaberegister wird an die Output-Kanäle Q1 bis Q8 weitergegeben. Der Stromlaufplan in Abb. 8 veranschaulicht die Verbindung zwischen dem Shift-Register, den Bauelementen und dem Picoflex-Konnektor, der die Anbindung zur Hauptplatine darstellt. Dieselben Input-Kanäle, die an das Shift-Register angeschlossen sind, sind auch mit dem Multiplexer verbunden.

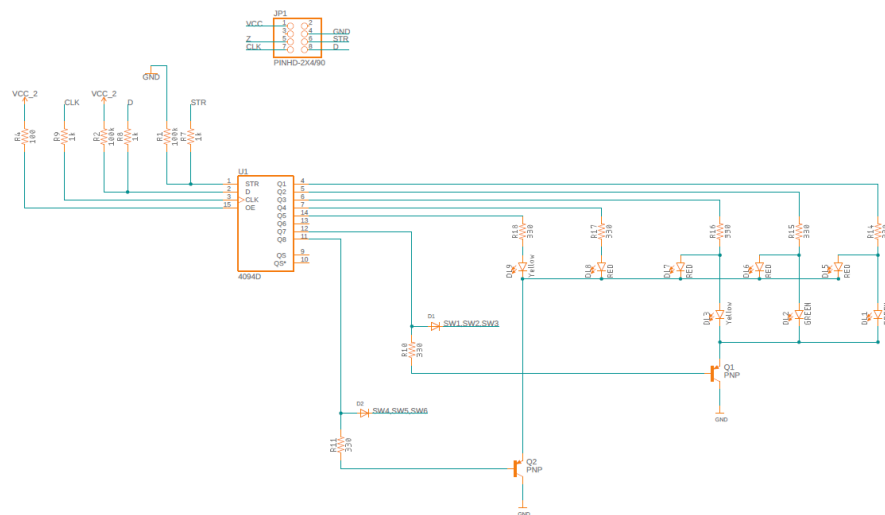


Abbildung 8. Bedienplatine Shift Register

Durch die beiden Input-Kanäle D und CLK wird in mehreren Durchgängen der Speicherblock befüllt, ehe der Input-Kanal STR die Zustände aus dem Schieberegister in das Ausgaberegister übernimmt. Die Zustände im Ausgaberegister werden an die jeweiligen Output-Kanäle Q1 bis Q8 bzw. QP0 bis QP7 übermittelt und letztendlich an die angeschlossenen Komponenten durchgegeben. Der

Zustand aller acht Output-Kanäle wird parallel übertragen. Die beiden seriellen Output-Kanäle QS1 und QS2 sind für das vorliegende Projekt irrelevant, da sie nicht genutzt werden.

Die exakte Aufschlüsselung kann anhand Abb. 9 abgelesen werden. Die ersten drei Kontrolllampen leuchten nur dann, wenn zusätzlich zum jeweiligen Output-Kanal (QP0 bis QP2) noch der Output-Kanal QP7 einen HIGH-Zustand aufweist. Bei den restlichen fünf Kontrolllampen müssen sowohl bei den Output-Kanälen (QP0 bis QP4) als auch beim Output-Kanal QP6 ein HIGH-Zustand vorliegen. Beide Output-Kanäle QP6 und QP7 wirken sich sowohl auf die Funktionsweise der Kontrolllampen als auch auf die Buttons aus.

Kontrolllampe / Shift-Register-Ausgang	QP0	QP1	QP2	QP3	QP4	QP5	QP6	QP7
Eine Tasse	1	0	0	0	0	0	0	1
Zwei Tassen	0	1	0	0	0	0	0	1
Dampf	0	0	1	0	0	0	0	1
Wassertank	1	0	0	0	0	0	1	0
Kaffeesatzbehälter	0	1	0	0	0	0	1	0
Warndreieck	0	0	1	0	0	0	1	0
Spülgang	0	0	0	1	0	0	1	0
Eco	0	0	0	0	1	0	1	0

Abbildung 9. Bedienplatine Shift-Register-Ansteuerung

5.2.1.2 Multiplexer Ein Multiplexer empfängt eine vordefinierte Anzahl analoger oder digitaler Input-Signale und entscheidet aufgrund dessen, welcher Output durchgeschaltet wird.

Die Bedienplatine verfügt über einen 8:1-Multiplexer/Demultiplexer mit der Modellnummer 74HC4051. Anhand von drei digitalen Input-Kanälen (A, B und C bzw. S0, S1 und S2) wird ein Output-Signal über den Output-Kanal X aus acht Alternativen (X0-X7) ausgewählt und durchgestellt. Der Stromlaufplan in Abb. 10 zeigt die Verbindung zwischen dem Multiplexer, den Bauelementen und dem Picoflex-Konnektor, der die Anbindung zur Hauptplatine darstellt. Drei Input-Signale werden über die drei Input-Kanäle (S1, S2 und S3) von der Hauptplatine über die Picoflex-Steckverbindung an den Multiplexer (A, B und C) übermittelt. Je nachdem, welcher Input vorliegt, wird der Output einer Komponente aus X0 bis X7 ausgewählt und an X durchgestellt. Die exakte Aufschlüsselung kann aus Abb. 12 entnommen werden. Damit das Output-Signal des ersten Potentiometers durchgestellt werden kann, müssen alle drei Input-Signale auf LOW geschaltet

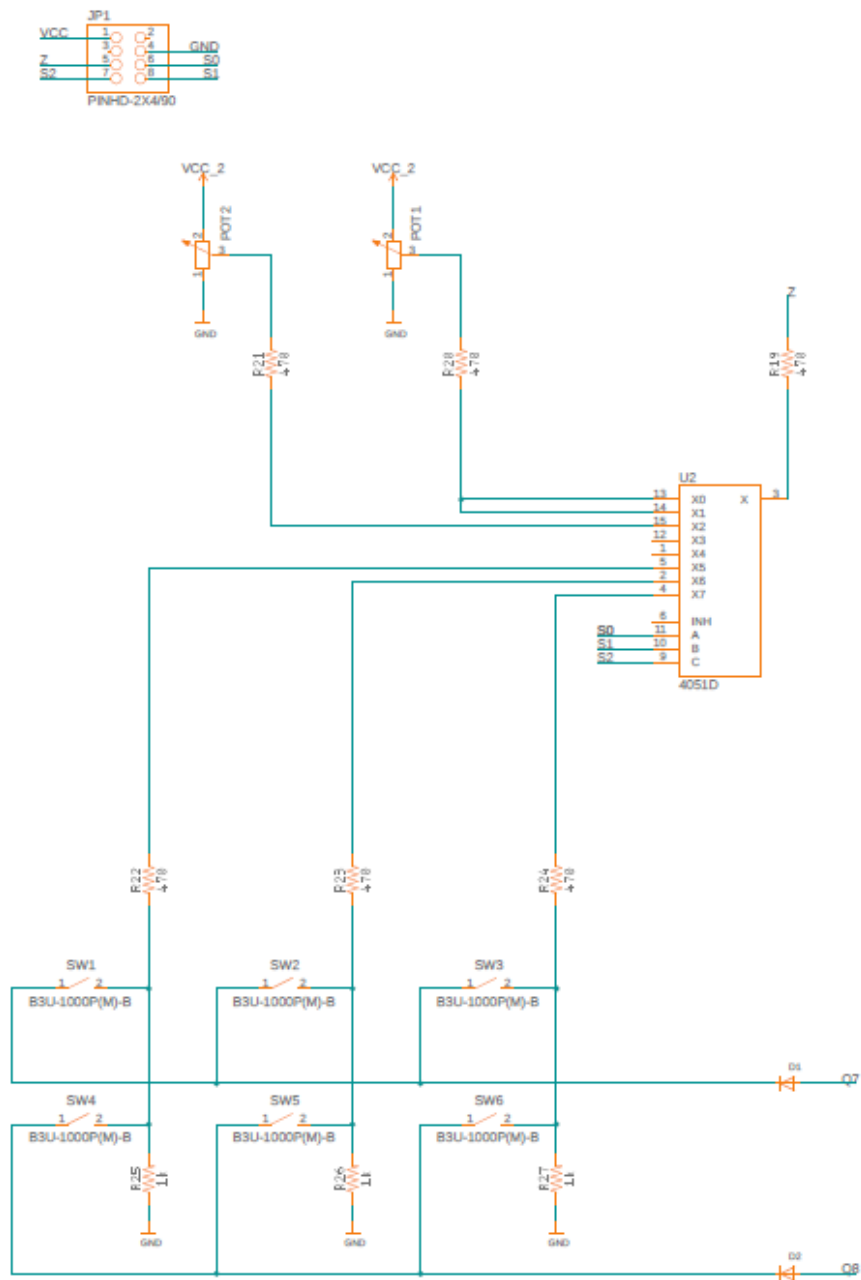


Abbildung 10. Bedienplatine Multiplexer

werden oder die ersten beiden Input-Signale auf LOW und das dritte Signal auf HIGH gesetzt werden. Während für X3 und X4 kein Output weitergeleitet wird, teilen sich bei X5, X6 und X7 jeweils zwei Buttons einen Output-Kanal.

Ansteuerung Komponente / Multiplexer-Eingang	S0	S1	S2
Pot 1: Kaffeegröße (Wassermenge)	0	0	0
Pot 1: Kaffeegröße (Wassermenge)	0	0	1
Pot 2 Kaffeestärke (Kaffeebohnen)	0	1	0
-	0	1	1
-	1	0	0
Taste: Ein/Aus // Dampf	1	0	1
Taste: 1 Tasse // Spülgang	1	1	0
Taste: 2 Tassen // Eco	1	1	1

Abbildung 11. Bedienplatine Multiplexer Ansteuerung

5.2.1.3 Interaktion zwischen Shift-Register und Multiplexer Die beiden Komponenten der Bedienplatine wurden im ersten Schritt als separate logische Einheiten dargestellt, um die Komplexität auf zwei Teilsysteme aufzuteilen. Als nächstes soll das Zusammenspiel der Komponenten betrachtet werden. Damit soll die komplette Funktionsweise der Bedienplatine identifiziert und dokumentiert werden.

Die bedienbaren Elemente können in zwei Ebenen aufgeteilt werden. Beide Ebenen werden von der Hauptplatine abwechselnd angesprochen. Während auf der einen Seite die Buttons SW1 bis SW3 und die Kontrolllampen DL1 bis DL3 liegen, befinden sich auf der anderen Seite die Buttons SW4 bis SW6 und die Kontrolllampen DL5 bis DL9. Die beiden Output-Kanäle QP6 und QP7 des Shift-Registers wechseln abwechselnd ihre Zustände und bestimmen auf diese Art, welche Ebene aktuell angesprochen wird. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt nur ein Button einer Ebene angesprochen werden kann. Anhand von Abb. 12 kann die Ansteuerung der Buttons durch das Zusammenwirken des Multiplexers und des Shift-Registers abgelesen werden.

5.2.1.4 Verbindung Bedien- und Hauptplatine :

Ein achtpoliges Flachbandkabel verbindet die Hauptplatine mit der Bedienplatine über Picoflex-Steckverbinder. Von den acht Adern des Flachbandkabels sind nur sechs aktiv, wobei zwei von ihnen die Masse- und die Spannungsverbindung

Ansteuerung Komponente - Ausgang / Multiplexer-Eingang	S0	S1	S2	QP6	QP7
Taste: Ein/Aus	1	0	1	0	1
Taste: 1 Tasse	1	1	0	0	1
Taste: 2 Tassen	1	1	1	0	1
Taste: Dampf	1	0	1	1	0
Taste: Spülgang	1	1	0	1	0
Taste: Eco	1	1	1	1	0

Abbildung 12. Bedienplatine Ansteuerung

darstellen. Drei Verbindungen übermitteln von der Hauptplatine zur Bedienplatine ausschließlich digitale Signale. Eine Verbindung übermittelt sowohl digitale als auch analoge Signale von der Bedienplatine zur Hauptplatine. Damit sollen einerseits die digitalen Signale der Buttons als auch die analogen Signale der beiden Potentiometer an die Hauptplatine übermittelt werden.

5.2.1.5 Hauptplatine Da die gesamte Steuerung des Kaffeevollautomaten über den Mikrocontroller PIC18F2520 erfolgt, wurden für das vorliegende Projekt nur jene Verbindungen in Abb. 13 dokumentiert, die einen direkten Zusammenhang mit dem Steckverbinder zur Bedienplatine haben.

Laut Datenblatt [51] verfügt der Mikrocontroller über 16.384 Bytes an Programmspeicher und operiert mit einer maximalen Frequenz von 40 Megahertz. Es können sowohl analoge als auch digitale Signale verschickt und empfangen werden.

Da das Kommunikationsmuster größtenteils anhand der Hardware der Bedienplatine identifiziert werden kann, werden die Befehlsmuster des Mikrocontrollers in weiteren Schritten festgestellt. Dies kann anhand von zwei Vorgehensweisen erfolgen: Entweder werden der Programmcode des Mikrocontrollers entziffert und die erforderlichen Funktionalitäten identifiziert, oder die ausgehenden Befehle werden anhand eines Logic-Analyzers abgefangen und mit der Logik der Bedienplatine zu einem vollständigen Kommunikationsmuster zusammengefasst.

5.3 Signalerfassung und -verarbeitung

Für das vorliegende Projekt wird die Kommunikation zwischen der Bedien- und Hauptplatine mit einem Logic-Analyzer abgefangen und analysiert. Mithilfe des zuvor identifizierten Kommunikationsmusters der Bedienplatine und allen weiteren Informationen, die mit dem Logic-Analyzer abgefangen werden, wird die vollständige Kommunikation rekonstruiert. Im ersten Schritt werden eine passende Hardware in Form eines Logic-Analyzers und eine Software ausgewählt, die



Abbildung 13. Hauptplatine Stromlaufplan Teilausschnitt

die Signalerfassung verarbeiten und visualisieren kann. Anschließend werden der Logic-Analyzer durch die Machine-in-the-middle-Methode zwischen die Bedien- und Hauptplatine geschaltet und die Signalerfassung durchgeführt. Mittels aller zusammengeführten Informationen kann das Kommunikationsprotokoll vervollständigt und eine Steuerungssoftware implementiert werden.

5.3.1 Logic-Analyzer

Ein Logic-Analyzer ist eine Hardware, mit der zu einer bestimmten Frequenz Signale erfasst werden können. Anhand der Signalerfassung kann der Input in logische High- und Low-Zustände in visualisierter Form dargestellt werden. Je nach Ausstattung unterscheiden sich Logic-Analyzer in ihrer Funktionalität. Als unabdingbare Parameter werden für das Vorhaben die Abtastrate (engl. Sampling-frequency), die Anzahl parallel unterstützender Kanäle, die einstellbare Schwellenspannung, die unterstützten Logikschwellen, die Übertragungsrate an die Visualisierungshardware sowie die Möglichkeit, digitale und analoge Signale zu lesen, erachtet.

Die Abtastrate wird in Samples pro Sekunde angegeben und definiert die Anzahl der Proben, die innerhalb einer Zeitspanne aufgenommen werden. Als Beispiel gilt, dass bei einer Abtastrate von 500 MegaSamples pro Sekunde alle zwei Nanosekunden ein Signal für die Zeitspanne von einer Sekunde abgefangen und aufgezeichnet wird.

Mittels der Anzahl parallel unterstützender Kanäle wird festgelegt, wie viele unterschiedliche Input-Kanäle gleichzeitig abgetastet werden können. Eine parallele Abtastung ist insbesondere bei Fällen von Bedeutung, bei denen eine Abhängigkeit zwischen den einzelnen Kanälen besteht. Die Abhängigkeit besteht darin, dass die erfassten Signale in mehreren Kanälen nur gemeinsam eine logische Schlussfolgerung ergeben.

Eine einstellbare Schwellenspannung wird verwendet, um zu entscheiden, ab welchem Threshold ein Spannungswert als HIGH- oder als LOW-Wert erfasst wird.

Die Logikschwelle entscheidet, wie groß der maximale erlaubte Spannungsunterschied zwischen Masse und Spannung ist. Da sich der interne Spannungsbereich von Gerät zu Gerät unterscheidet, wird eine passende Logikschwelle benötigt.

Damit eine möglichst hohe Abtastrate visualisiert werden kann, ist eine hohe Übertragungsrate zwischen dem Logic-Analyzer und der Visualisierungshardware

erforderlich. Laut [38] können die Daten mithilfe von USB 3.0 bis zu sieben Mal schneller übertragen werden als mit USB 2.0.

Der Unterschied zwischen analogen und digitalen Signalen besteht darin, dass bei analogen Signalen der kontinuierliche Spannungsverlauf wiedergegeben wird, während bei digitalen Signalen ein diskreter Spannungsverlauf vorliegt. Während mit einem Oszilloskop analoge Signale gemessen werden, kann ein Logic-Analyzer digitale Signale aufzeichnen. In bestimmten Fällen unterstützen Hardware-Produkte beide Funktionen.

Nach ausgiebiger Recherche diverser Vergleichsportale, unter anderem von [14] und [41], wurde entschieden, dass der Logic-Analyzer von [38] den definierten Anforderungen gerecht wird und im vorliegenden Projekt zum Einsatz kommt.

5.3.2 Setting-Signalerfassung

Für die Signalerfassung wird der Logic-Analyzer von Saleae mit der Modellbezeichnung Logic Pro 8 ausgewählt. Damit sollen drei digitale und ein analoger Kanal abgehört werden. Samplings werden mit einer maximalen Samplingrate von 500 MegaSamples pro Sekunde bei digitalen Signalen sowie 50 MegaSamples pro Sekunde bei analogen Signalen durchgeführt. Der analoge Kanal erfasst Spannungswerte von null bis fünf Volt, wobei die Samples per USB 3.0 an ein Notebook übermittelt werden. Da der Mikrocontroller auf der Hauptplatine eine Frequenz von 40 Megahertz aufweist und der Logic-Analyzer digitale Signale bis zu 100 Megahertz aufzeichnen kann, kann das Sampling sauber und vollständig erfolgen. Mithilfe der Software Logic 2.4.0 von Saleae werden alle erforderlichen Einstellungen vorgenommen und Samplings visualisiert. Für die erfolgreiche Durchführung eines Samplings ist es erforderlich, an einer beliebigen Stelle zwischen der Haupt- und Bedienplatine Test-Clips zur Messung anzubringen.

5.3.3 Signalerfassung und -verarbeitung

Zu Beginn werden alle internen Maschinenzustände identifiziert, anschließend die Übergänge. Jeder Maschinenzustand gibt Informationen darüber, welche Übergänge zum jeweiligen Zeitpunkt möglich sind. Anhand von Kontrolllampen können Maschinenzustände visuell dargestellt werden. Sobald eine Funktionalität ausgeführt wird, wird von einem Übergang gesprochen, wobei von einem sicheren Zustand zu einem anderen sicheren Zustand übergegangen wird.

Anhand eines Petri-Netzes können Zustände und Funktionalitäten mittels Knoten

und Übergängen als Graph dargestellt werden. In der vorliegenden Arbeit wird die Funktionalität des Kaffeevollautomaten mittels eines Modells vereinfacht nachgebildet, um eine abstrahierte Stütze für die Signalerfassung bereitzustellen. In Abb. 14 werden eine Variante eines mathematischen Modells in Form eines Petri-Netzes verwendet und die Prozess-Zustände des Kaffeevollautomaten dargestellt. Obwohl bestimmte Sachverhalte, beispielsweise die Bedienung der

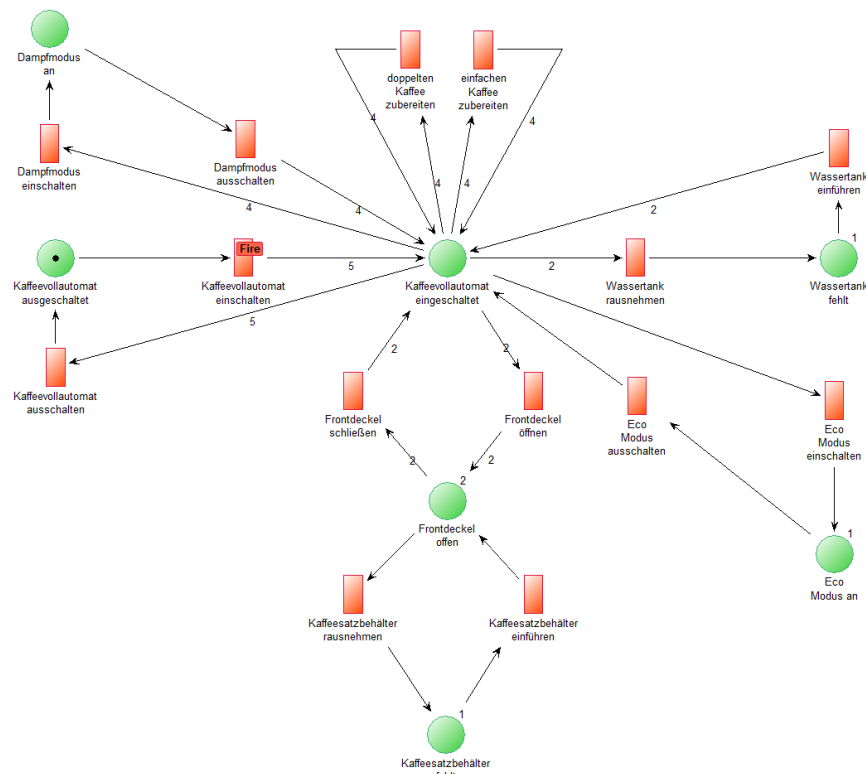


Abbildung 14. Kaffeevollautomat als Petri-Netz

Dampf Funktion, vereinfacht wurden - der Dampfmodus wird durch eine Person eingeschaltet, aber durch den Kaffeevollautomaten nach einer bestimmten Zeit ausgeschaltet, spiegelt das Petri-Netz die tatsächliche Funktionalität des Kaffeevollautomaten wider. Damit kann der Umfang abgeschätzt und eine bestimmte Reihenfolge der Samplings definiert werden. Mittels Samplings werden Zustände und Funktionalitäten durch den Logic-Analyzer Schritt für Schritt erfasst und

analysiert.

Samplings können auf zwei Sichtweisen aufgeteilt werden, eine feine und eine grobe Sicht. Während bei der groben Sicht Samplings in Millisekunden (ms) betrachtet werden, werden bei der feinen Sicht Samplings in Mikrosekunden (μ s) betrachtet. Sobald der Kaffeevollautomat mit Strom versorgt wird, werden laufend über drei Leitungen digitale Signale von der Hauptplatine an die Bedienplatine übermittelt und ein analoges Signal über eine vierte Leitung retourniert. Die Signalübertragung erfolgt auch dann, wenn der Kaffeevollautomat an eine Stromquelle angeschlossen, er jedoch ausgeschaltet ist. Das Sampling in Abb. 15 bildet die grobe Sicht ab, wobei sich der Kaffeevollautomat im ausgeschalteten Zustand befindet. Sofern die Kanäle von oben nach unten in Abb. 15 betrachtet

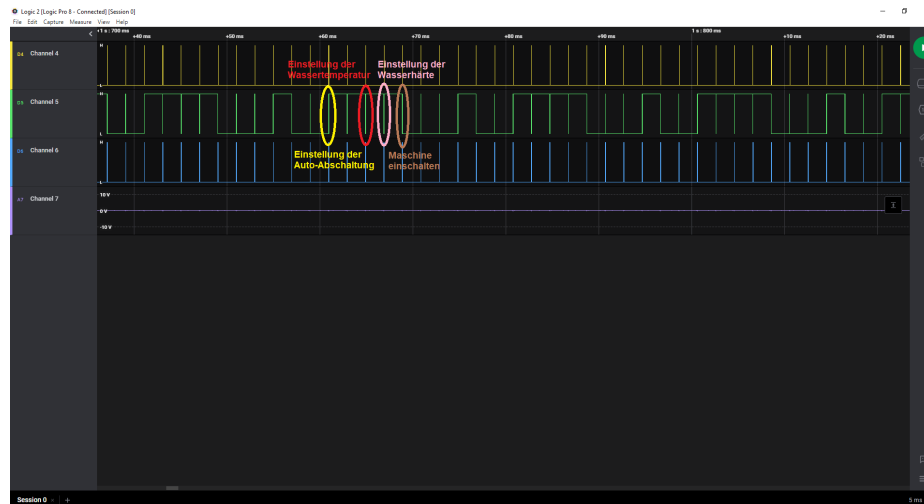


Abbildung 15. Sampling: Sicht grob, Zustand ausgeschaltet

werden, können die ersten drei Kanäle als digital und die zwei unteren Kanäle als analog eingestuft werden. In weiterer Folge wird der gelbe Kanal als Strobe-Kanal, der grüne Kanal als Data-Kanal und der blaue Kanal als Clock-Kanal geführt. Bis auf den orangenen Kanal, der den Input vom Arduino-Board an die Hauptplatine liefert, wurde der Einsatz aller anderen Kanäle bereits definiert. In einem stabilen Zustand wiederholt sich das Pattern einer groben Sicht alle 20 Millisekunden. Während der Strobe- und Clock-Kanal (beide digital) bei der groben Sicht, unabhängig von Zustand und Übergang, immer gleich bleiben, ändert sich das Signalverhalten beim Data-Kanal (digital) wie in Abb. 16. Im aus-

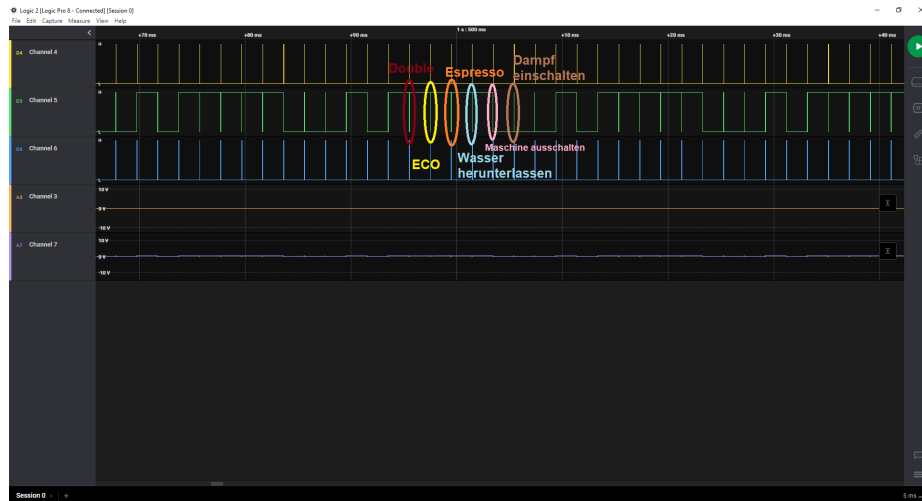


Abbildung 16. Sampling: Sicht grob, Zustand eingeschaltet

geschalteten Zustand stehen Funktionalitäten zur Verfügung, beispielsweise die Adjustierung der Wassertemperatur, Anpassung der Wasserhärte oder sonstige Funktionalitäten (siehe dazu Abb. 15). Im eingeschalteten Zustand werden andere Funktionalitäten angeboten (siehe dazu Abb. 16). Der Zeitpunkt, zu dem eine Funktionalität ausgeführt wird, kann mithilfe des Logic-Analyzers festgestellt werden. Dazu wird jedes Mal ein Sampling für zehn Sekunden aufgenommen und der Tastendruck initiiert. Damit auch etwaige nicht sofort ersichtliche Funktionalitäten mittels eines Samplings aufgenommen werden, kann das Handbuch des Kaffeevollautomaten zur Hilfe genommen werden.

Anhand der feinen Sicht können nicht nur die einzelnen Zustände der Kontrolllampen beobachtet werden, sondern auch, zu welchem Zeitpunkt der Input an die Hauptplatine geliefert werden muss, damit die Funktionalität angestoßen und in weiterer Folge ausgeführt wird. Abb. 17 illustriert ein Beispiel für die feine Sicht. Die ersten drei Kanäle, Strobe-, Data- und Clock-Kanal, übertragen digitale Signale und der letzte Kanal analoge Signale. Je nachdem, welche Konstellation bei den digitalen Kanälen besteht, wird das analoge Signal einer Komponente (siehe dazu Abb. 11) durch den Multiplexer von der Bedienplatine an die Hauptplatine übertragen. Damit eine Funktionalität initiiert wird, muss sowohl die Konstellation an digitalen Signalen übereinstimmen als auch der richtige Zeitpunkt der analogen Übertragung, und dies in zumindest drei aufeinander folgenden Zyklen bezogen auf die grobe Sicht. In Anbetracht von

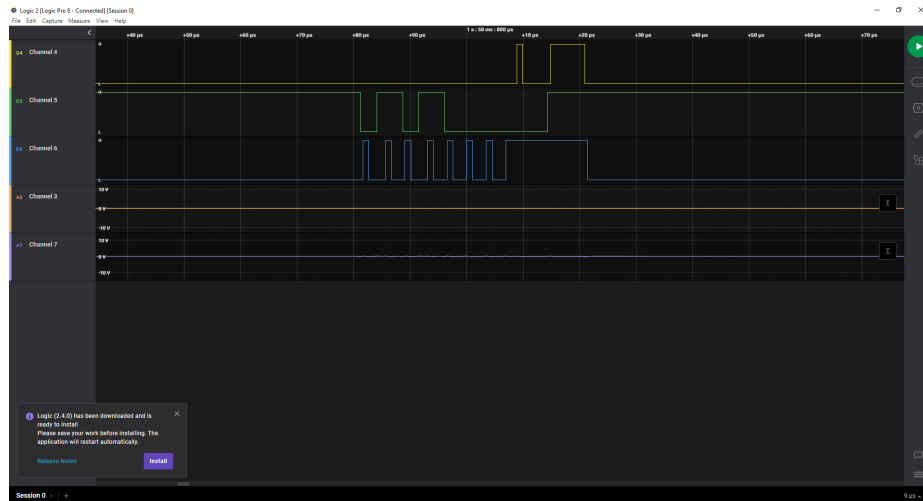


Abbildung 17. Sampling: Sicht fein, Zustand eingeschaltet

Abb. 17 können die Kanäle wie folgt interpretiert werden: Der Strobe-Kanal ist sowohl für den Multiplexer als auch für das Shift-Register in Hinblick auf die Gesamtkonstellation der Signale erheblich. Anhand des Data-Kanals können die aktuellen Zustände der Kontrolllampen sowie des Shift-Registers abgelesen werden und der richtige Zeitpunkt der Übertragung des analogen Signals beobachtet werden, um die Funktionalität zu initiieren. Der Clock-Kanal stellt eine Art Clock-Funktion dar, da das Muster über alle Zyklen gleich bleibt und somit dem Strobe- und Data-Kanal eine Art Takt vorgibt. Jeder Zyklus der feinen Sicht dauert ca. 45 Mikrosekunden an, wobei beim Clock-Kanal in regelmäßigen Abständen acht High-Signale geschaltet werden. Für jedes der acht High-Signale kann beim Data-Kanal der aktuelle Pegel-Zustand des Shift-Registers und somit der Zustand der Kontrolllampen ausgelesen werden. Ausgehend von Abb. 18 werden das dritte, fünfte und siebte Signal im Pattern von rechts nach links angesprochen. Somit kann anhand der Abb. 9 geschlossen werden, dass beim Shift-Register die Ausgänge QP2, QP4 und QP6 High-Signale aussenden und beim Rest der Ausgänge Low-Signale ausgegeben werden. Die Interpretation der Signale des Data-Kanals erfolgt aufsteigend von rechts nach links, wobei das am weitesten links gelegene Signal in Kombination mit dem Clock-Kanal den Zustand im Shift-Register für den Ausgang QP7 ergibt. Aus dem Data-Kanal kann sowohl die Funktionsweise der Kontrolllampen als auch die Initiierung der einzelnen Funktionalitäten erfasst werden.



Abbildung 18. Sampling: Sicht fein, Beispiel

In Anbetracht von Abb. 19 beginnt eine Signalübertragung von der Bedienplatine zur Hauptplatine, um einen Funktionsaufruf zu initiieren, genau dann, wenn der Clock-Kanal zum Abschluss des Zyklus den achten High-Zustand aufweist und der Data-Kanal auf High schaltet. Spätestens, wenn der Clock-Kanal wieder einen Low-Zustand annimmt, muss die Signalübertragung an die Steuerplatine beendet worden sein. Sofern diese Timings nicht eingehalten werden, wird keine Funktionalität initiiert. In seltenen Fällen kann bei verspäteter oder fehlerhafter Signalübertragung eine Fehlfunktion ausgelöst werden. Dies hat zur Folge, dass entweder das gesamte System nicht mehr reagiert und ein Reset durchgeführt werden muss, oder Kontrollleuchten einen Fehlerzustand wiedergeben.

Die beiden Funktionalitäten, einfache Kaffeetasse und doppelte Kaffeetasse, erfordern einerseits ein Signal für die Initiierung des Buttons, andererseits analoge Werte der beiden Potentiometer. Sie sind für die Kaffeestärke und Kaffeemenge zuständig. Anders als bei den Buttons, an denen die Eingabe durch den Benutzer oder die Benutzerin initiiert wird, erfolgt die Signalübertragung der beiden Potentiometer laufend bei einer aufrechten Verbindung zwischen der Bedien- und Hauptplatine. Für die Ausführung der beiden Kaffeefunktionen ist es erforderlich, dass die Werte für eine unbestimmte Zyklenzahl vor der Funktionsinitiierung an die Steuerplatine übermittelt werden. Beide Potentiometer können analoge

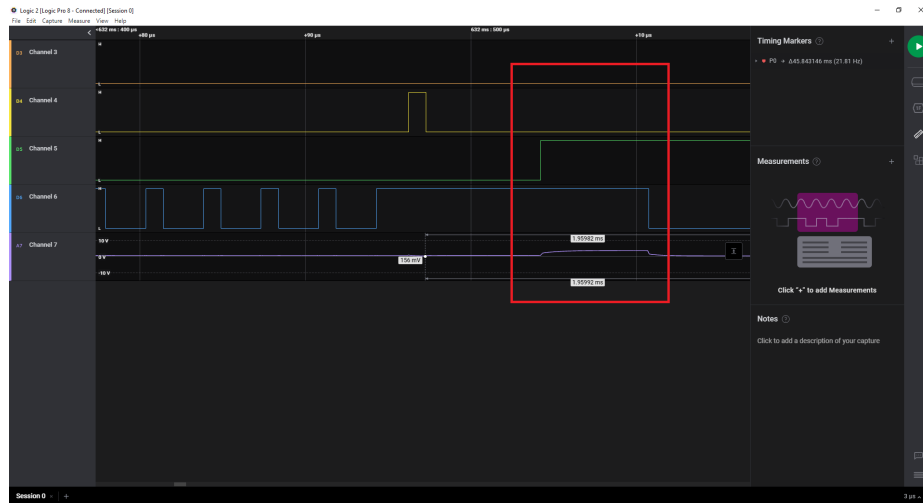


Abbildung 19. Sampling: Sicht fein, Funktion

Signale in einem Spannungsbereich von null bis fünf Volt übertragen. Für eine ordnungsgemäße Funktionsausführung müssen zumindest 250 Millivolts bei jenem Potentiometer anliegen, das für die Menge der Kaffeebohnen zuständig ist. Sofern diese Bedingung nicht erfüllt ist, wird kein Kaffee ausgegeben und der Funktionsaufruf ignoriert. Beim zweiten Potentiometer kann ein beliebiger Spannungswert anliegen.

Anhand des dechiffrierten Kommunikationsmusters kann in weiterer Folge eine Software entwickelt werden, die zum einen die Signale der Steuerplatine verarbeitet und zum anderen Funktionen der Bedienplatine imitiert sowie entsprechende Signale an die Steuerplatine retourniert. Darauf aufbauend wird anhand der vorliegenden Erkenntnisse ein Prototyp entwickelt.

Kapitel 6

Prototyp

Als Prototyp wird ein Softwaremodul zur Steuerung des Kaffeevollautomaten implementiert, das über eine Rest-Anwendungsschnittstelle (API) angesprochen werden kann. Die API ist über einen integrierten Webserver erreichbar, der auf dem Mikrocontroller abgelegt wird. Das Softwaremodul, das auf dem Mikrocontroller abgelegt wird, ist direkt mit der Steuerplatine verbunden. Es werden alle ausgehenden Signale der Steuerplatine empfangen und interpretiert. Sofern Funktionalitäten über die Rest-API aufgerufen werden, werden entsprechende Signale an die Steuerplatine gesendet, um die angeforderten Kaffee-Funktionen zu initiieren.

6.1 Arduino-Applikation

Das Softwaremodul wird mithilfe der Arduino-Plattform als Entwicklungsumgebung implementiert. Damit kann die Programmierung von ausgewählten Mikrocontrollern direkt und ohne aufwendige Einrichtung der Entwicklungsumgebung erfolgen. Zusätzlich bietet Arduino diverse Bibliotheken an, um Zusatzfunktionen, beispielsweise eine Wifi-Verbindung oder einen Webserver, ohne viel Aufwand einzubinden.

Das Softwaremodul besteht aus mehreren voneinander unabhängigen Komponenten, die funktional aufgeteilt sind, aber dennoch als ein Ganzes in den beiden Arduino-Funktionen `setup()` und `loop()` abgelegt werden. Eine Aufteilung der Komponenten erfolgt anhand von mehreren Methoden, die die Datenkapselung als objektorientiertes Programmierparadigma verfolgen.

6.1.1 Kernfunktionen

Die Kernfunktionalität des Softwaremoduls kann auf zwei Subkomponenten aufgeteilt werden: Einerseits sollen eintretende Signale in Form eines Patterns identifiziert werden, andererseits sollen Signale an die Steuerplatine gesendet werden, um die gewünschten Funktionalitäten des Kaffeevollautomaten zu initiieren.

6.1.1.1 Mustererkennung Die implementierte Mustererkennungsfunktion zielt darauf ab, die laufenden Signale der Steuerplatine zu erfassen und einen Ausgangspunkt für alle weiteren Vorgänge zu definieren. Damit ein Ausgangspunkt definiert werden kann, bedarf es eines Einstiegspunkts und eines eindeutigen Musters pro Pattern-Zyklus.

Der Einstiegspunkt beginnt damit, dass der Clock-Kanal wiederholt auf ein High-Signal hin abgetastet wird. Sobald eines vorliegt, wird eine Pause von mehreren 100 Mikrosekunden eingelegt. Im Anschluss wird der Clock-Kanal erneut auf ein High-Signal hin abgetastet. Wenn erneut ein High-Signal beim Clock-Kanal anliegt, bedeutet dies, dass das feine Pattern beginnt und 40 bis 50 Mikrosekunden andauert. Es werden 50 Mikrosekunden abgewartet und der Data-Kanal wird auf ein Low-Signal hin abgetastet. Sofern eines vorliegt, wird der Data-Kanal nach etwa 2200 Mikrosekunden nochmals auf ein High-Signal hin abgetastet; wenn auch das eintrifft, wird der Data-Kanal nach 2200 Mikrosekunden ein letztes Mal auf ein Low-Signal abgetastet. Treten all diese Bedingungen ein, kann davon ausgegangen werden, dass ein eindeutiger Einstiegspunkt vorliegt, siehe Abb. 20.

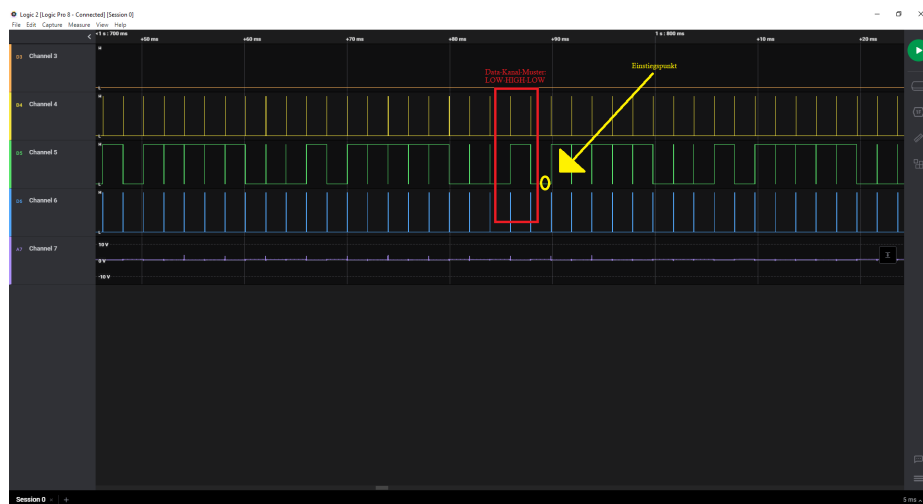


Abbildung 20. Sampling: Sicht grob, Einstiegspunkt

6.1.1.2 Zustände auslesen Unabhängig vom zuvor definierten Einstiegs- punkt können die Zustände der einzelnen Kontrollleuchten anhand des Data- Kanals jederzeit ausgelesen werden. Sobald nach einer mindestens 100 Mikrose-

kunden langen Low-Phase der Logikpegel beim Clock-Kanal auf High schaltet, ist es erforderlich, den Data-Kanal auszulesen. Ausgehend von diesem Zustand kann festgestellt werden, welche Ebene ausgelesen wird, siehe dazu 9. In regelmäßigen Abständen können alle weiteren Zustände der Kontrolllampen ausgelesen werden.

6.1.1.3 Funktionalitäten aufrufen Zu Anfang gilt es, den Einstiegspunkt zu finden sowie einen Check des Einstiegspunktes durchzuführen, um die Fehlerquote möglichst gering zu halten. Anschließend werden das Pattern der auszuführenden Funktionalität gesucht, siehe dazu Abb. 16, und Signale an die Steuerplatine abgesetzt.

Bevor eine Funktionalität angestoßen werden kann, müssen drei Variablen festgelegt werden. Es gilt, anhand der Pattern-Reihenfolge, siehe dazu Abb. 16, ausgehend vom Einstiegspunkt die richtige Pattern-Nummer auszuwählen. Auch die Dauer des abzusetzenden Signals sowie der exakte Zeitpunkt, wann dies erfolgen soll, müssen vorzeitig definiert werden. Sobald entsprechende Werte für die Variablen vorliegen und der Einstiegspunkt samt Check durchgeführt wurden, wird der Funktionsaufruf gestartet. Innerhalb einer 30-fachen Schleife soll während jeder Schleife der Clock-Kanal auf ein High-Signal abgetastet werden. Sobald ein High-Signal beim Clock-Kanal vorliegt und die Patternnummer übereinstimmt, wird ausgehend vom High-Signal des Clock-Kanals zum definierten Zeitpunkt ein High-Signal von definierter Dauer an die Steuerplatine übermittelt, siehe dazu 19. Dies wird dreimal wiederholt, bevor die Steuerplatine die Ausführung der gewünschten Funktionalität initiiert. Da sich die Funktionalitäten in Zehnerschritten wiederholen und die Signalübermittlung dreimal in diesem Zyklus wiederholt werden muss, ist eine 30-fache Schleife erforderlich. Immer dann, wenn innerhalb der Schleife das Pattern nicht übereinstimmt, wird ein Low-Signal an die Steuerplatine übermittelt. Damit soll gewährleistet werden, dass keine fehlerhaften Zustände auftreten.

6.1.2 Wifi

Durch das Einbinden der beiden Bibliotheken `WiFiClient.h` und `ESP8266WiFi.h` kann eine Wifi-Verbindung zwischen dem Mikrocontroller und dem Router hergestellt werden. Es werden drei Konfigurationsschritte durchgeführt. Zunächst werden die Credentials in Form einer `ssid` und eines Passworts festgelegt. Anschließend wird der Mikrocontroller anhand einer Konfigurationsmethode als eine

sich zu einem Zugangspunkt verbindende Instanz definiert. Im letzten Schritt wird die Verbindung initiiert und bestätigt.

6.1.3 WebServer

Damit der Mikrocontroller als Webserver agiert, ist das Einbinden der Bibliotheken `ESP8266WebServer.h` und `ESP8266mDNS.h` erforderlich. Mithilfe der beiden Bibliotheken wird ein Webserver auf dem Mikrocontroller gestartet und eine Rest-Schnittstelle für Clients bereitgestellt, die sich im WLAN-Netz befinden. Damit können alle Funktionalitäten des Kaffeevollautomaten, die auf dem Mikrocontroller abgelegt sind, als Service anhand einer URL abgerufen werden. Ein Error-Handling für fehlerhafte Aufrufe, verursacht durch falsche URLs oder Methoden, kann die Usability verbessern und ist Teil der Webserver-Bibliotheken.

6.2 Clientseitige Schnittstelle

Eine REST-API bietet Clients die Möglichkeit, Funktionalitäten des Kaffeevollautomaten aufzurufen sowie Zustände auszulesen. Alle durch den Webserver angebotenen Services können durch Get-Methoden anhand einer standardisierten URL aufgerufen werden. Unabhängig vom aufgerufenen Service werden alle Ausgaben als JSON-Dateien retourniert. In Abb. 21 kann die Schnittstelle innerhalb des Softwaremoduls betrachtet werden.

6.2.1 Zustände

Die Schnittstelle für Kontrolllampen-Zustände besteht aus zwei Teilen. Es können entweder alle Zustände gemeinsam oder einzeln abgerufen werden. Anhand der folgenden Liste kann die Schnittstellen-Beschreibung für Zustände betrachtet werden:

- Alle Kontrolllampen: `/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states`
- Eine Tasse: `/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/one_cup_state`
- Zwei Tassen: `/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/double_cup_state`
- Eco: `/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/eco_state`
- Wasser: `/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/water_state`
- Kaffeesatzbehälter: `/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/bowl_state`
- Dampf: `/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/steam_state`
- Warndreieck: `/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/attention_state`
- Temperatur: `/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/temp_state`

6.2.2 Funktionalitäten

Die Schnittstelle für Funktionalitäten besteht ebenfalls aus zwei Teilen. Es kann entweder einer Liste aller möglichen Funktionsaufrufe angezeigt werden oder die Initiierung einzelner Funktionalitäten durchgeführt werden. Die Schnittstellenbeschreibung aller Funktionalitäten kann der folgenden Liste entnommen werden:

- Alle Funktionsaufrufe anzeigen:
/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions
- Kaffeevollautomat einschalten:
/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/turn_on
- Kaffeevollautomat ausschalten:
/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/turn_off
- Eine Tasse Kaffee ausgeben:
/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/make_espresso
- Doppeltasse Kaffee ausgeben:
/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/make_double_espresso
- Eco Modus einschalten:
/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/enable_eco_mode
- Wasser ausgeben:
/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/give_water
- Dampfausgabe ermöglichen:
/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/enable_steam

```
void restServerRouting() {
    server.on("/", HTTP_GET, []() {
        server.send(200, F("text/html"),
            F("Verbindung wurde hergestellt, Anwendung steht bereit."));
    });
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions"), HTTP_GET, get_functions);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/turn_on"), HTTP_GET, turnOn);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/turn_off"), HTTP_GET, turnOff);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/make_espresso"), HTTP_GET, makeEspresso);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/make_double_espresso"), HTTP_GET, makeDoubleEspresso);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/enable_eco_mode"), HTTP_GET, switchOnEcoMode);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/give_water"), HTTP_GET, waterMode);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/functions/enable_steam"), HTTP_GET, steamMode);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states"), HTTP_GET, get_states);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/one_cup_state"), HTTP_GET, get_one_cup_state);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/double_cup_state"), HTTP_GET, get_double_cup_state);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/eco_state"), HTTP_GET, get_eco_state);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/water_state"), HTTP_GET, get_water_state);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/bowl_state"), HTTP_GET, get_bowl_state);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/steam_state"), HTTP_GET, get_steam_state);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/attention_state"), HTTP_GET, get_attention_state);
    server.on(F("/delonghi/coffee_machine/esam_2600/states/temp_state"), HTTP_GET, get_temp_state);
}
```

Abbildung 21. Softwaremodul: Rest-Schnittstelle

Kapitel 7

Ergebnisse

Im Anschluss an die gesammelten Informationen werden die anfangs definierten Forschungsfragen beantwortet. Als Grundlage fungieren hierbei jene Informationen, die im Zuge der autoethnografischen Fallstudie, großangelegten quantitativen Studie sowie den Beobachtungen und Interviews gesammelt wurden. Die Ergebnisse werden auf drei Subkapitel aufgeteilt. Jeder Teil davon ist ein in sich eigenständiges Konstrukt und wurde in einem bestimmten Zeitraum bearbeitet. Die Chronologie, zu welchem Zeitpunkt welcher Teil zustande kam, ist mit der Reihenfolge des Inhaltsverzeichnisses gleichzusetzen. Sobald ein Teil abgeschlossen wurde, wurde der nächste Teil in Arbeit genommen. Als Grundlage für die großangelegte quantitative Studie sowie die Beobachtungen und Interviews gilt die autoethnografische Fallstudie. Während die Studie hauptsächlich auf quantitative Ergebnisse ausgelegt war, standen bei der Beobachtung und dem Interview qualitative Ergebnisse im Fokus. Folgend werden die Ergebnisse Schritt für Schritt dargestellt und erläutert.

7.1 Autoethnografische Fallstudie

Die autoethnografische Studie wurde als wissenschaftliche Methode ausgewählt, um die Forschungsfrage „Wie kann ein Reverse-Engineering-Prozess im Haushaltsbereich anhand eines Kaffeevollautomaten durch Neueinsteiger und Neueinsteigerinnen zielführend durchgeführt werden“ zu beantworten.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Reverse-Engineering-Prozess sowohl aus technischer als auch nicht technischer Sicht umfangreich behandelt. Anhand einer autoethnografischen Fallstudie wurde eine Art Leitfaden für die Durchführung eines Reverse-Engineering-Projekts entwickelt. Der Leitfaden stellt eine generische Anleitung für die Durchführung eines Reverse-Engineering-Projekts in Anlehnung an ein praktisches Beispiel dar. Obwohl dieser Leitfaden nicht zu 100 Prozent auf jedes Reverse-Engineering-Projekt angewendet werden kann, konnte eine zielführende Durchführung anhand der vorliegenden Arbeit durch einen Neueinsteiger gewährleistet werden. Das Projekt wurde ohne bestehendes Fachwissen in den

Bereichen Elektrotechnik, Signalerfassung und Programmierung von Embedded Systems erfolgreich realisiert. Die autoethnografische Fallstudie begann nach Abschluss der Literaturrecherche und nahm effektiv vier Monate in Anspruch. Als Durchführungsort wurde überwiegend die eigene Wohnung genutzt, wenngleich einige Tätigkeiten an der Universität Wien stattfanden. Die Entwicklung eines Nachrüstsatzes wurde anhand einer autoethnografischen Studie implementiert und untersucht, um die Forschungsfragen möglichst praxisnah beantworten zu können und das Ergebnis gleichzeitig als Grundlage für weitere Forschungsschritte einzusetzen. Unabhängig von der technischen Umsetzung, die in den vorhergegangenen Kapiteln beschrieben wurde, lag der Fokus der autoethnografischen Fallstudie auf der Vorgehensweise. Damit wurden Beobachtungen, Denkprozesse, Analysen, Aktivitäten und Tätigkeitsbeschreibungen sowie Prozeduren und Regeln beschrieben, die während der Entwicklung angewendet wurden, um eine Art Referenzleitfaden für diesen Bereich zu entwickeln. Die autoethnografische Fallstudie wurde chronologisch beschrieben, wobei auf alternative Schritte nur beschränkt eingegangen wurde.

7.1.1 Auswahl eines Versuchsobjekts und einer Nachrüstungsart

Der Retrofitting-Prozess beginnt mit der Auswahl eines Versuchsobjekts. Dies kann entweder aufgrund einer subjektiven Entscheidung, in Folge eines Auftrags, aus Kostengründen oder anderen Beweggründen erfolgen. Im vorliegenden Projekt wurde in Einklang mit der Anforderung ein haushaltsüblicher Kaffeevollautomat als Versuchsobjekt ausgewählt. Da sowohl eine sofortige Verfügbarkeit als auch technische Komplexität vorlagen, wurde der Kaffeevollautomat als Grundlage für ein umfangreiches Projekt eingesetzt.

Die Auswahl der Nachrüstungsart erfolgt entweder zeitgleich mit der Auswahl eines Versuchsobjekts oder im Anschluss. Es existieren unterschiedliche Arten der Nachrüstung, beispielsweise die einer Sprachsteuerung, Fernsteuerung, Anbindung an das Internet etc. In Abhängigkeit davon, welches Gerät zu Grunde liegt und welche Art der Nachrüstung durchgeführt werden soll, wird der Aufwand der nachfolgenden Schritte unterschiedliche Komplexitätsstufen aufweisen. Für das vorliegende Projekt wurde die IoT-Nachrüstung als Anforderung festgelegt.

7.1.2 Identifizierung des Hardware-Aufbaus und der Schnittstellen

Sobald das zu bearbeitende Gerät ausgewählt und die Retrofitting-Features festgelegt wurden, wird nach Dokumentationen und Anleitungen gesucht, um einerseits

den Aufbau der vorhandenen Hardware zu erfassen und andererseits Schnittstellen sowie Wege für etwaige Nachrüstungen zu identifizieren. Gebrauchsanleitungen stellen hierbei einen möglichen Einstieg dar. Sie liefern einen umfangreichen Überblick über alle verfügbaren Funktionen sowie die Art, wie die Funktionen über Schalter, Knöpfe, Drehknöpfe, Displays und andere Elemente bedient werden können. Auch logische Elemente, wie erreichbare Maschinenzustände sowie Zustandsübergänge, können damit bestimmt werden. In weiterer Folge können gerätespezifische Teilekataloge betrachtet werden, um einen Überblick über alle verbauten Hardwareteile sowie die Art, wie sie miteinander verbunden sind, zu erhalten. Da Teilekataloge nicht immer direkt von Hersteller und Herstellerinnen bereitgestellt werden und somit eine sekundäre Informationsquelle darstellen, kann es vorkommen, dass nicht alle Informationen vollständig mit dem ausgewählten Objekt übereinstimmen. Als tertiäre Informationsquellen werden Ressourcen bezeichnet, die weder von herstellenden Unternehmen selbst noch von lizenzierten Fachhändler oder Fachhändlerinnen bereitgestellt werden. Webseiten sowie Hobby-Bastler und -Bastlerinnen bieten in bestimmten Fällen hilfreiche Informationen, wie Komponentendiagramme, Stromlaufpläne und weiteres Know-How.

7.1.3 Analyse der Funktionalität einzelner Hardware-Komponenten und als Teil eines Subsystems

Der folgende Umsetzungsabschnitt wurde im Projekt mit der Einführung in die Betriebsanleitung eröffnet, um sowohl alle verfügbaren Funktionalitäten als auch Zustände zu erfassen und zu verstehen. In weiterer Folge konnte damit jedem bedienbaren Element, das als Hardware vorlag, eine Funktionalität zugeordnet werden. Im nächsten Schritt wurden unter Beachtung aller Hardware-Komponenten, die von außen ersichtlich waren, das Innenleben und die Verbindungen untereinander erkundet. Hierbei wurde Gebrauch eines Online-Teilekatalogs gemacht, um alle vorhandenen Komponenten zu identifizieren und zu gruppieren. Da ein Teilekatalog üblicherweise bereits eine logische Gruppierung aufweist, kann diese passgerecht in ein Projekt übernommen werden. Eine sinnvolle Gruppierung aller Komponenten trägt dazu bei, dass einerseits das Zusammenwirken einzelner Komponenten innerhalb der Gruppe und andererseits die Zusammenarbeit diverser Gruppen untereinander aufgrund logischer Aufteilung direkt ersichtlich sind. Anhand der Gruppierung konnte jene Gruppe an Komponenten eindeutig identifiziert werden, die für das Retrofitting von Bedeutung ist. Da beim Retrofitting

üblicherweise elektronische Komponenten modifiziert werden, wird die interne Funktionsweise dieser Gruppe sowie deren Abhängigkeiten zu anderen Gruppen betrachtet. Als elementar werden hierbei die Verbindungen zwischen Platinen untereinander sowie zwischen Platinen und Komponenten betrachtet. Üblicherweise stellen OEM bis auf Hardware-Spezifikationen und Dokumentationen zu einzelnen Wartungsprozessen keine Informationen zum Hardware-Innenleben zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde vor dem Eingriff in die Hardware nach tertiären Informationsquellen gesucht; in erster Linie nach Schaltplänen, um die Verbindungen zwischen den elektronischen Komponenten ausfindig zu machen. Damit sollen Komponenten und Stellen identifiziert werden, die für die Nachrüstung infrage kommen. Zudem können so alle elektronischen Steuerelemente, beispielsweise Mikrocontroller, und deren Verbindungen betrachtet werden. Anschließend wurden für alle relevanten elektronischen Bauelemente Spezifikationsblätter auf den Herstellerseiten abgerufen. Da Spezifikationsdokumente üblicherweise umfangreich sind, wird empfohlen, nur nach jenen Informationen zu suchen, die im Vorhinein definiert wurden. Zudem werden alle relevanten Informationen zumeist bereits am Anfang der Dokumente illustriert. Für den Fall, dass keine oder unzureichende Schaltpläne vorliegen, sind sämtliche Schritte in Eigenregie durchzuführen; eine Beschreibung dieses Prozesses erfolgt im Anschluss. Abschließend wird nach Hilfsanleitungen und Informationen zur zielsicheren Hardware-Öffnung unter Beachtung aller Schwierigkeiten und Gefahren gesucht. Bei unzureichenden Hilfsmöglichkeiten müssen gangbare Wege durch eigenständiges Experimentieren und Ausprobieren erforscht werden, was im vorliegenden Projekt der Fall war.

7.1.4 Anforderungsanalyse und Definition des Zielsystems

Nachdem sämtliche Dokumentationen zusammengetragen wurden, erfolgt eine Anforderungsanalyse, wobei das zu entwickelnde Zielsystem beschrieben wird. Eine Anforderungsanalyse kann mittels unterschiedlicher Methoden und Techniken durchgeführt werden, die aus der folgenden Liste [19] entnommen werden. Aufgrund der einfachen Planung und Kontrolle sowie Abschätzung des Umfangs der zu entwickelnden Software wurde das Projekt in Anlehnung an das Wasserfallmodell entwickelt. Das Wasserfallmodell beginnt mit einer Anforderungsanalyse, wobei funktionale und nicht funktionale Anforderungen sowie Umfang, Annahmen und weitere Informationen zu definieren sind. Da beim IoT-Retrofitting keine neuen Funktionalitäten hinzukommen, bietet die Bedienungsanleitung einen Überblick über alle zu erfassenden Funktionalitäten als Grundlage für die Anforderungsanalyse.

derungsanalyse. Die Anforderungsanalyse kann anhand eines Textes oder eines vereinheitlichten Formulars durchgeführt und verschriftlicht werden. Die Vorteile des Formulars sind, dass es einheitlich, strukturiert und zusammenfassend dargestellt werden kann, weshalb es für dieses Projekt genutzt wurde. Zudem kann für jedes Anforderungsformular eine Use-Case-Beschreibung angefertigt werden. Damit kann der Schritt von der Anforderungsanalyse hin zur strukturierten Anordnung von Softwareelementen getätigt werden.

7.1.5 Dokumentation aller Maschinenzustände

Zusätzlich zur Definition aller erforderlichen Funktionalitäten sollen alle möglichen Maschinenzustände identifiziert werden. Dies kann mittels mathematischer Modelle erfolgen, beispielsweise anhand eines Petri-Netzes, Zustandsdiagramms oder Zustandsautomaten. Damit sollen alle erreichbaren Zustände sowie Übergänge, die die Funktionalitäten widerspiegeln, als ein einheitliches Modell visualisiert werden. Üblicherweise können alle Zustände und Übergänge der Betriebsanleitung entnommen werden. Der Vorteil des Petri-Netzes ist, dass die Funktionsweise des vorliegenden Systems sofort erkennbar ist und verifiziert werden kann. Damit können im Vorhinein unerwünschte Zustandsübergänge und Zustände identifiziert und frühzeitig beseitigt werden. Zudem kann bei der Softwareentwicklung eine eindeutige Reihenfolge davon festgestellt werden, welche Softwarekomponenten unter welchen Bedingungen ausgeführt werden können.

7.1.6 Visualisierung zentraler Hardware-Komponenten und deren Kommunikation

Im nächsten Schritt wird anhand eines kategorisierten Teilekatalogs ein Deployment-Diagramm erstellt. Das Deployment-Diagramm soll eine Übersicht über alle Komponenten, deren Gruppen und Verbindungen gewähren. Damit soll grob abgeschätzt werden, welche Komponenten beim Retrofitting-Prozess eine entscheidende Rolle einnehmen und möglicherweise adaptiert bzw. modifiziert werden müssen. Darüber hinaus kann nach vorhergehender Analyse anhand des Deployment-Diagramms die Entscheidung getroffen werden, wo ein mögliches Nachrüst-Kit eingefügt werden soll. Sofern keine passenden Teilekataloge oder ähnliche Ressourcen bereitstehen, ist es erforderlich, diesen Schritt eigenständig durchzuführen. Da dies üblicherweise, aufgrund umfangreicher Schraub- und Experimentierarbeiten, mit großem Aufwand verbunden ist, gilt es, anhand einer

Kosten-Nutzen-Analyse eine Entscheidung darüber zu treffen, ob und in welchem Ausmaß ein Deployment-Diagramm eigenständig konstruiert wird.

7.1.7 Werkzeugauswahl und Erfassung des Kommunikationsmusters

Im Anschluss an das Deployment-Diagramm wird die Zahl aller Komponenten auf jene eingeschränkt, die für das Retrofitting-Projekt relevant sind. Die Teilmenge aller Komponenten und deren Verbindungen untereinander werden näher betrachtet. Zu diesem Zeitpunkt kann bereits der exakte Anwendungsbereich des Retrofittings lokalisiert und festgelegt werden. Die Nachrüstung kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, beispielsweise unter Hinzunahme einer zusätzlichen Komponente, ohne bestehende Komponenten zu modifizieren. Eine ebenso übliche Variante ist, dass eine Komponente durch eine modifizierte Komponente ersetzt wird, ohne weitere Systemänderungen durchführen zu müssen. Beim vorliegenden Projekt stand in Anbetracht der IoT-Nachrüstung die Elektronik im Fokus, wobei eine partielle Modifikation der bestehenden Hardware erforderlich war. Da die IoT-Nachrüstung alle vorhandenen Funktionalitäten beinhalten sollte, die durch das bestehende Userinterface zur Verfügung gestellt wurden, galt es, den Nachrüstsatz zwischen der Steuerplatine und den bedienbaren Hardware-Elementen zu platzieren. Hier sollte ein Stromlaufplan für alle relevanten Komponenten und deren Verbindungen untereinander untersucht werden. Damit sollte einerseits der Zusammenhang zwischen der Steuerplatine und allen bedienbaren Hardware-Komponenten identifiziert werden und andererseits die Kommunikation zwischen der Steuerplatine und allen anderen elektronischen Komponenten dargestellt werden. Sofern kein bestehender Stromlaufplan vorliegt, gilt es, ihn selbst zu definieren. Dies erfolgt in zwei Schritten; einerseits müssen alle Konstrukte für die Dokumentation bereitgestellt werden - dies erfordert beispielsweise, dass die Hardware aufgeschraubt und die vordefinierten Elemente lokalisiert werden müssen - andererseits soll die Hardware dokumentiert werden. Eine fachgerechte Dokumentation ohne Elektronikkenntnisse ist in vielen Fällen zeitaufwendig, aber ausschlaggebend für alle weiteren Schritte. So können Stromlaufpläne mit professionellen Tools erstellt werden, z. B. Eagle, KiCad oder anderer Software. Die nötigen Fachkenntnisse können anhand von Tutorials, Webseiten und weiteren Ressourcen erlangt werden. Außerdem kann die Funktionsweise aller integrierter Bauelemente mittels Herstelleranleitungen erforscht werden. Dies ist erforderlich, um ein Verständnis für die Funktionsweise und Kommunikation zwischen den einzelnen Elementen zu erlangen. Mithilfe von

Stromlaufplänen und Signalmessungen, durchgeführt mit einem Logic-Analyzer oder Oszilloskopen, können Kommunikationsmuster zwischen Hardwareelementen erfasst werden. Vor der Auswahl eines Signalmessgeräts ist es erforderlich, eine Anforderungsliste zu definieren und abzuklären, ob das Messgerät allen Anforderungen genügt. Hier sollten insbesondere jene Anforderungspunkte einbezogen werden, die im Analyse-Kapitel erörtert wurden. Sobald das Messgerät vorliegt, wird eine geeignete Stelle für die Signalerfassung definiert. Üblicherweise erfolgt das Messen an jener Stelle, wo der Nachrüstsatz mit der vorhandenen Hardware verbunden wird. Sofern die Signalerfassung zwischen zwei Platinen erfolgt, gilt es, im ersten Schritt zu überprüfen, ob jede Stromader für das Messergebnis relevant ist. Dies kann entweder an dem Stromlaufplan erkannt werden oder anhand initialer Messungen mit einem Messgerät. So wird Stromader für Stromader geprüft, ob Strom fließt. Jene Stromadern, die einen Stromfluss aufweisen, werden ausgewählt und bei einer parallelen Signalerfassungsprozedur in Abhängigkeit voneinander untersucht. Die gleichzeitige Untersuchung mehrerer Kanäle erfordert ein passendes Setting im Logic-Analyzer-Tool. Als Ergebnis wird die Kommunikation zwischen Komponenten auf diskreter Basis dargestellt. Für jeden Funktionsaufruf gilt es, die Kommunikation zu erfassen und zu analysieren. Die Analyse kann beispielsweise darin liegen, wiederholende Kommunikationsmuster zu finden, um ein Gesamtmuster zu identifizieren. Sofern bei der Signalerfassung immer wieder andere Kommunikationsmuster erscheinen, kann davon ausgegangen werden, dass eine komplexe Kommunikation vorliegt, möglicherweise eine chiffrierte Form, wodurch weitere Analysetätigkeiten erforderlich sind.

7.1.8 Rekonstruktion des Kommunikationsmusters

Sobald für jede einzelne Funktion ein Kommunikationsmuster erfasst wurde, gilt es, dieses Muster mithilfe eines zusätzlichen multifunktionalen Mikrochips nachzuahmen, z. B. mit ESP8266, Raspberry Pi etc. Für die Rekonstruktion eines jeden Funktionsaufrufs wird ein passender Programmiercode erstellt. Da sich Teile diverser Muster wiederholen können, ist es empfehlenswert, den Code möglichst objektorientiert zu programmieren. Damit wird nicht nur Zeit gespart, sondern auch die Anzahl an Programmierzeilen fällt geringer aus, wodurch der interne Speicher des Mikrochips, auf dem der Code abgelegt wird, in einem geringeren Umfang ausgelastet wird. Außerdem sollte bei der Implementierung der Funktionalitäten immer der aktuelle Maschinenzustand als Gegenstück bereitstehen. Sobald der Maschinenzustand ausgelesen wurde, kann anhand des aktuellen

Zustands entschieden werden, welche Funktionalität zu welchem Zeitpunkt und unter welchen Bedingungen ausgeführt wird. Bei der Auswahl des Mikrochips ist insbesondere auf die Anzahl der analogen und digitalen Kanäle, der Lese- und Schreibgeschwindigkeit sowie alle verfügbaren Funktionalitäten achtzugeben, wie Wifi, Webserver, API etc. Bei zu geringer Lese- oder Schreibgeschwindigkeit kann es zu Synchronisationsproblemen zwischen dem implementierten Programmiercode auf dem Mikrochip und der zu steuernden Hardware kommen. Infolgedessen können fehlerhafte Funktionen ausgeführt werden und schwerwiegende Softwarefehler auftreten, wodurch die Hardware ohne Reboot nicht mehr angesteuert werden kann. Sobald jeder Use-Case implementiert sowie ausführlich getestet wurde, kann die Programmierung und somit auch der Retrofitting-Prozess erfolgreich abgeschlossen werden.

7.2 Studie

Aufgrund der überschaubaren Anzahl von 97 vollständig ausgefüllten Fragebögen und elf weiteren Fragebögen, die zwar nur teilweise ausgefüllt wurden, aber dennoch brauchbare Informationen enthielten, konnte die Auswertung durch den Autor unbehindert vorgenommen werden. Die Umfrage enthielt sowohl qualitative als auch quantitative Elemente. Es wurden neun geschlossene und vier offene Fragen gestellt, wobei nur eine geschlossene Frage von allen Teilnehmern und Teilnehmerinnen beantwortet werden musste und das Freischalten der anderen drei Fragen von der Beantwortung der geschlossenen Fragen abhängig war. Die Fragen wurden in drei Kategorien aufgeteilt:

- Fragen zur Nachhaltigkeit
- Fragen zum Retrofitting
- Demografische Fragen

Es gab eine vordefinierte Reihenfolge der Fragen, wobei einzelne unbeantwortet gelassen werden konnten. Obwohl die Umfrage von allen Teilnehmern und Teilnehmerinnen innerhalb von fünf Minuten fertig gestellt werden konnte, gab es kein Zeitlimit. Eine Pilotstudie wurde aufgrund der mehrmaligen iterativen Überarbeitung nicht durchgeführt.

7.2.1 Demografische Daten

Nachfolgend erfolgt die Darstellung der demografischen Daten aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen, die an der Umfrage teilgenommen haben. Es werden Daten zum Alter, Geschlecht und der Studienrichtung präsentiert. Im Ergebnis-Kapitel werden demografische Daten mit anderen Daten anhand diverser Auswertungsmethoden kombiniert, um Forschungsfragen zu beantworten. Anzumerken ist, dass die demografischen Fragen im dritten und somit letzten Abschnitt der Umfrage erfragt wurden, wodurch nur 97 vollständig-ausgefüllte Formulare in diesen Teilbereich der Auswertung einbezogen werden konnten.

Bei der Aufteilung der Studienteilnehmer und Studienteilnehmerinnen auf ihr Alter lässt sich herauslesen, dass die beiden Altersgruppen 16-20 und 21-25 die größten Anteile darstellen. Veranschaulicht wird dies in Abb. 22. Anhand der Abbildung kann ausgemacht werden, dass mehr als die Hälfte aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen dieser Studie in die Altersgruppe der 16- bis 20-Jährigen eingeordnet werden kann. Ein weiteres Drittel stellt die Altersgruppe der 21- bis

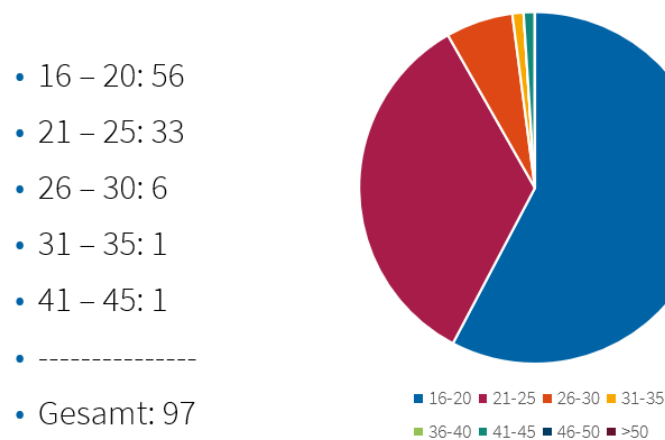


Abbildung 22. Altersgruppen

25-Jährigen dar. Die drittgrößte Altersgruppe der 26- bis 30-Jährigen liegt anteilmäßig bei knapp über fünf Prozent. Alle weiteren Altersgruppen sind entweder durch eine Person oder gar keine Person vertreten. Daraus lässt sich ableiten, dass über 90 Prozent aller Studienteilnehmer und Studienteilnehmerinnen zwischen 16- und 25 Jahren alt sind und für diese Altersgruppen repräsentative Aussagen getätigt werden können.

Neben dem Alter nimmt auch das Geschlecht eine wesentliche Rolle bei der Studienausswertung ein, sodass in weiterer Folge geschlechterspezifische Aspekte betrachtet werden. Bei der Geschlechterverteilung lässt sich ein vergleichsweise großer Anteil an männlichen Teilnehmern erkennen. In Abb. 23 kann die exakte Geschlechterverteilung betrachtet werden. Während ca. zwei Drittel aller Personen, die an der Studie teilgenommen haben, männlich sind, waren 28 von 97 weiblich und somit mit weniger als einem Drittel vertreten. Vier Personen haben kein Geschlecht angegeben. Aufgrund der unregelmäßigen Verteilung der Geschlechterzugehörigkeit können für weibliche Personen nur eingeschränkt Aussagen getroffen werden. Stattdessen ist die Gruppe der männlichen Personen repräsentativ, wodurch akkurate Auswertungen der Ergebnisse für diese Teilnehmergruppe getätigt werden können. Da die Umfrage in der Lehrveranstaltung ‚Technische Grundlagen der Informatik‘ stattgefunden hat und die daraus erhobenen Daten für die Auswertung hinsichtlich der Diversität von Interesse waren, wurde zusätzlich zu Alter und Geschlecht die Studienrichtung erfasst.

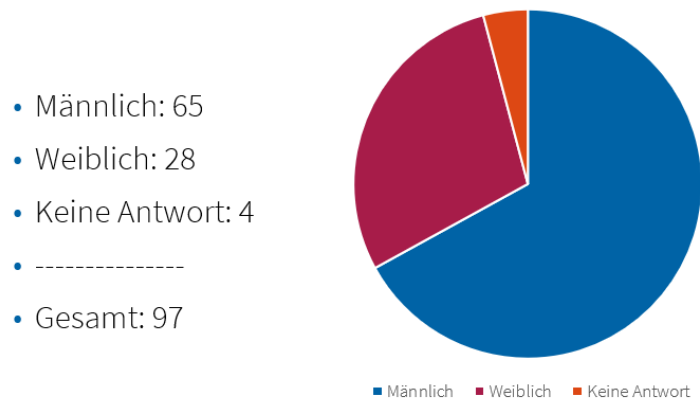


Abbildung 23. Geschlechterverteilung

Hier galt es, den Unterschied zwischen den einzelnen Ausprägungen der Informatik festzuhalten. Anhand von Abb. 24 kann die Verteilung betrachtet werden.

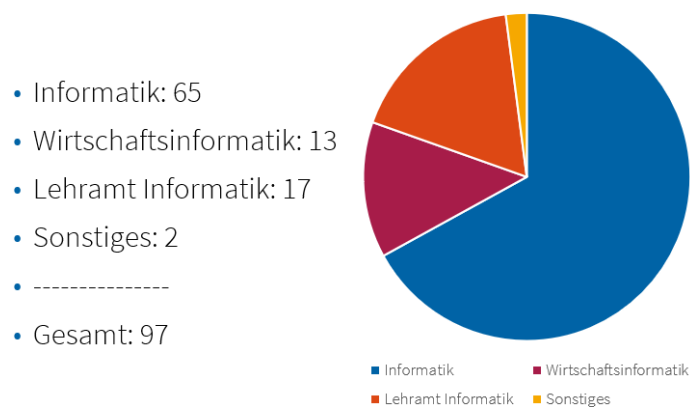


Abbildung 24. Verteilung Studienrichtung

Laut Verteilung gaben ca. zwei Drittel aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen Informatik als Studienrichtung an, die sie aktuell absolvieren. Weiterhin nehmen Lehramt Informatik mit 17 Teilnehmern oder Teilnehmerinnen und Wirtschaftsinformatik mit 13 Teilnehmern oder Teilnehmerinnen eine weniger aussagekräftige Position ein. Zwei Personen gaben sonstige Studienrichtungen an.

7.2.2 Daten zur Nachhaltigkeit

Fragen zur Nachhaltigkeit wurden im ersten Abschnitt der Umfrage behandelt. Im Vergleich zu den demografischen Daten konnten elf weitere auswertbare Teilnahmen hinzugenommen werden. Somit wurden 108 Fragebögen für die Auswertung der Daten zur Nachhaltigkeit herangezogen. Die Daten zur Nachhaltigkeit wurden anhand von drei geschlossenen Fragen gesammelt. Es gab zu jeder Frage eine Auswahlliste, bestehend aus fünf Antwortmöglichkeiten, wobei jeweils nur eine Antwort ausgewählt werden konnte. Bei allen drei Fragen wurden Antworten anhand einer fünfstufigen bipolaren Likert-Skala definiert.

Im ersten Schritt wurden die Teilnehmenden zur folgenden Frage befragt:

Wie wichtig ist dir das Thema Nachhaltigkeit beim Kauf elektronischer Geräte (z. B. Energiesparlabels, Reparierbarkeit, Produktlebensdauer, etc.)?

Hierbei lässt sich eine klare Tendenz in Richtung ‚Sehr wichtig‘ und ‚Wichtig‘ erkennen; 79 von 108 Teilnehmer und Teilnehmerinnen haben diese beiden Kategorien laut Abb. 25 ausgewählt. Während sechs Teilnehmer und Teilnehmerinnen

- Sehr wichtig: 37
- Wichtig: 42
- Einigermäßen: 23
- Unwichtig: 5
- Komplette unwichtig: 1
- Keine Antwort: 0
- -----
- Gesamt: 108

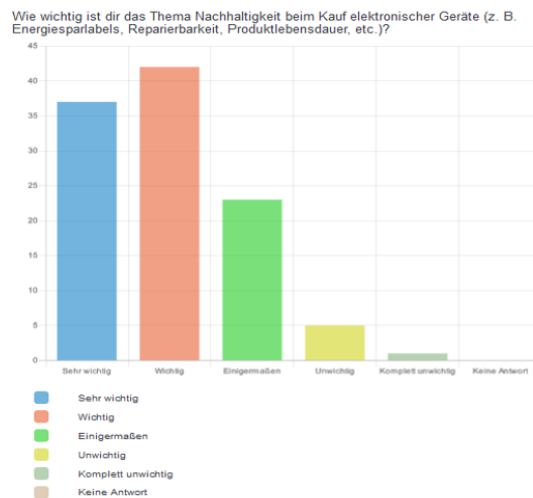


Abbildung 25. Verteilung Nachhaltigkeit Kauf

die Nachhaltigkeit im Sinne des Kaufs elektronischer Geräte unwichtig bzw. komplett unwichtig erscheint, liegt die Anzahl der gemäßigten Teilnehmer und Teilnehmerinnen, denen der Kauf einigermaßen wichtig ist, bei 23. Es lässt sich

feststellen, dass über 90 Prozent aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen der Nachhaltigkeit beim Kauf elektronischer Geräte eine gewisse Bedeutung beimessen. Fortgeführt wurde die Umfrage im Nachhaltigkeitsbereich durch folgende Frage: **Wie nachhaltig würdest du deinen Lebensstil generell bezeichnen?** Beantwortet wurde diese Frage am häufigsten mit nachhaltig (41/108 Teilnehmer und Teilnehmerinnen) und eher nachhaltig (44/108 Teilnehmer und Teilnehmerinnen). Die vollständige Verteilung kann anhand der Abb. 26 betrachtet werden. Als weniger nachhaltig betrachten sich 16 Teilnehmer und Teilnehmerinnen und

- Sehr nachhaltig: 5
- Nachhaltig: 41
- Eher nachhaltig: 44
- Weniger nachhaltig: 16
- Nicht nachhaltig: 2
- Keine Antwort: 0
- -----
- Gesamt: 108

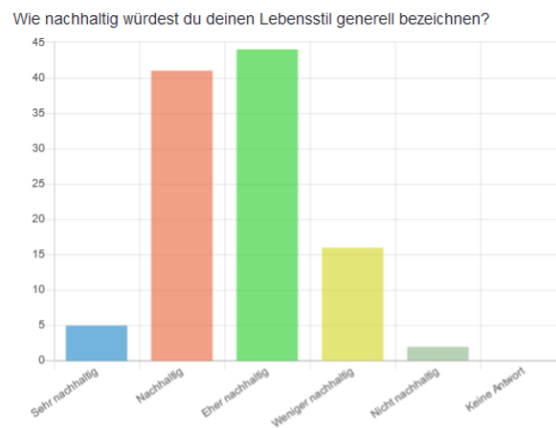


Abbildung 26. Verteilung Nachhaltigkeit Lebensstil

als nicht nachhaltig zwei teilnehmende Personen. Die Anzahl der Teilnehmer und Teilnehmerinnen, die sich als sehr nachhaltig (fünf von 108 Teilnehmer und Teilnehmerinnen) beschreiben, liegt bei unter fünf Prozent. Was es bei dieser Frage zu beachten gilt, ist die Tatsache, dass die Auswahl auf rein subjektiver Wahrnehmung beruht. Es gab weder eine Beschreibung bzw. Definition der Auswahlmöglichkeiten noch eine Art Maßstab, um einen Vergleich anstellen zu können.

Abgeschlossen wurde der erste Teil der Umfrage durch folgende Frage:

Erachtest du den vorgestellten Nachrüstsatz als wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Nachhaltigkeit bei elektronischen Haushaltsgeräten?

Wie anfangs erwähnt, fand die Umfrage nach der Präsentation sowie Demonstration des Nachrüstsatzes statt. Somit konnte sich jeder Teilnehmer und jede

Teilnehmerin ein Bild davon machen, wie der Satz zustande kam und welche Funktionalitäten er bietet. Die Auswertung und Verteilung zur gestellten Frage kann der folgenden Abb. 27 entnommen werden.

- Ja: 19
- Eher ja: 42
- In etwa: 29
- Eher nein: 14
- Nein: 4
- Keine Antwort: 0
- -----
- Gesamt: 108

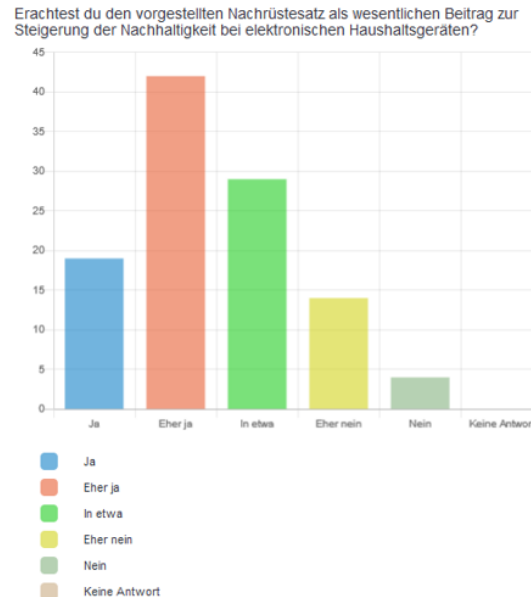


Abbildung 27. Verteilung Nachhaltigkeit Nachrüstset

Während mehr als die Hälfte aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen mit ‚Ja‘ (19/108 Teilnehmer und Teilnehmerinnen) und ‚Eher Ja‘ (42/108 Teilnehmer und Teilnehmerinnen) geantwortet hat, sind ca. 17 Prozent gegenteiliger Meinung. Dabei haben sie ‚Nein‘ (4/108 Teilnehmer und Teilnehmerinnen) und ‚Eher Nein‘ (14/108) ausgewählt. Knapp ein Viertel aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen (29/108) ist der Meinung, dass der Nachrüstset teilweise zur Steigerung der Nachhaltigkeit beiträgt. Daraus lässt sich schließen, dass über 80 Prozent der Teilnehmer und Teilnehmerinnen den Nachrüstset zumindest teilweise als wesentlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit erachten.

7.2.3 Daten zum Retrofitting

Anschließend an die Fragen zur Nachhaltigkeit wurden Daten zum Retrofitting erhoben. In diesem Bereich wurden sowohl offene als auch geschlossene Fragen

gestellt. Bedingt durch die Antworten auf die geschlossenen Fragen konnten Teilnehmer und Teilnehmerinnen durch offene Fragen vertiefend zu einer bestimmten Frage antworten. Es gab drei geschlossene Fragen. Zwei davon konnten mit Ja oder Nein beantwortet werden, eine hatte fünf Antwortmöglichkeiten, wobei nur eine Antwort ausgewählt werden konnte. Auch in diesem Fall kam die bipolare Likert-Skala für die fünf Antwortmöglichkeiten zum Einsatz. Während geschlossene Fragen mit statistischen Methoden ausgewertet wurden, wurden für Antworten auf offene Fragen Kategorisierungen vorgenommen, um eine systematische Verarbeitung zu gewährleisten.

Im Retrofitting-Bereich wurden Teilnehmer und Teilnehmerinnen eingangs zur folgenden Angelegenheit befragt:

Hast du selbst bereits elektronische Basteleien (z. B. mit Arduino, LEDs, Potentiometer, etc.) durchgeführt?

Die Datenverteilung zu dieser Frage kann anhand von Abb. 28 betrachtet werden. Während 42 Teilnehmer und Teilnehmerinnen bereits erste Erfahrung mit elektro-

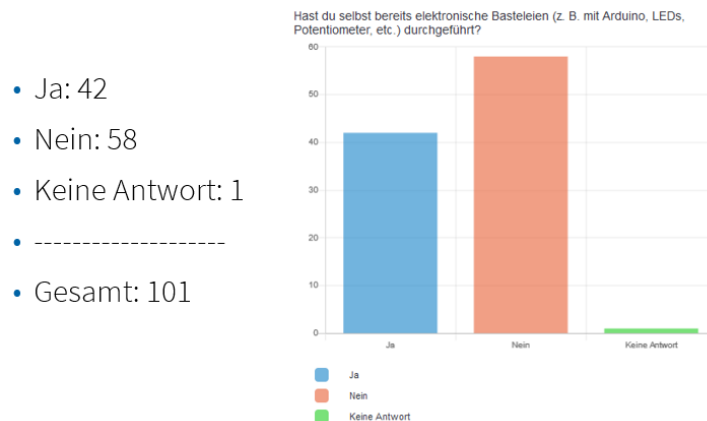


Abbildung 28. Verteilung Retrofitting-Basteleien

nischen Basteleien machen konnten, gaben 58 Teilnehmer und Teilnehmerinnen an, nicht damit vertraut zu sein. Eine Person enthielt sich der Antwort. Somit besteht eine Überlegenheit von über 15 Prozent jener Teilnehmer und Teilnehmerinnen, die noch nie mit elektronischen Basteleien in Kontakt gekommen sind, gegenüber Teilnehmern und Teilnehmerinnen, die bereits mit Basteleien etwas zu tun hatten.

Im nächsten Schritt wurden Daten zur folgenden Frage erfasst:

Traust du dir zu, den vorgestellten Nachrüstsatz wie demonstriert anzuwenden?

Auch bei dieser Frage konnten Teilnehmer und Teilnehmerinnen mit Ja oder Nein antworten. Anders als bei allen vorherigen geschlossenen Fragen, wird bei einem ‚Nein‘ die geschlossene Frage um eine offene Frage erweitert. Damit soll in Erfahrung gebracht werden, weshalb angenommen wird, dass der Nachrüstsatz durch den Teilnehmer oder die Teilnehmerin nicht angewandt werden kann. In nachfolgender Abb. 29 kann die Datenverteilung zur geschlossenen Frage betrachtet werden. Nahezu 84 Prozent aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen

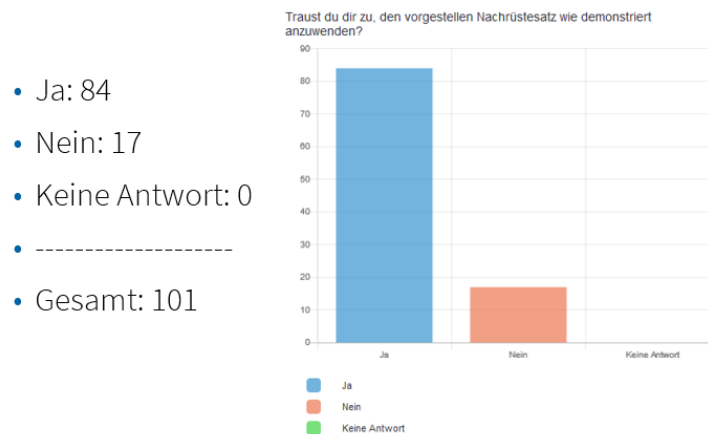


Abbildung 29. Verteilung Retrofitting-Nachrüstung

waren der Meinung, den Nachrüstsatz anwenden zu können, 17 Teilnehmer und Teilnehmerinnen waren gegenteiliger Meinung. Den 17 Personen wurde in weiterer Folge die nachfolgende Frage gestellt:

Falls nein, welche Barrieren bzw. Bedenken bestehen?

Hier gaben sieben von 17 Teilnehmern und Teilnehmerinnen eine Antwort ab, der Rest ließ die Frage unbeantwortet. Alle sieben Antworten konnten einer Kategorie im Laufe der Kategorisierung zugeordnet werden. Folgende Kategorien standen zur Auswahl:

- Fehlendes (Fach-)Wissen
- Sicherheitsbedenken bzw. Bedenken, dass das Gerät nach der Umrüstung nicht mehr funktioniert

- Mangelndes Vertrauen in eigene Fähigkeiten

Alle Antworten auf die zuvor genannte offene Frage inklusive Zuordnung zur entsprechenden Kategorie können der Abb. 30 entnommen werden. Auch die Anzahl der Datensätze, die einer bestimmten Kategorie zugeordnet werden, können abgelesen werden.

Falls nein, welche Barrieren bzw. Bedenken bestehen?		Zusammenfassung:	
Antwort	Anzahl	1.) fehlendes (Fach-)wissen: 1	
Antwort	7	2.) Sicherheitsbedenken bzw. Bedenken, dass das Gerät nicht mehr funktioniert: 2	
Keine Antwort	10	3.) Mangelndes Vertrauen in eigene Fähigkeiten: 4	
ID	Antwort		
40	Den Gedanken etwas falsch zu machen	3	
57	Fehlendes Fachwissen	1	
74	Bedenken, dass die Geräte nicht mehr funktionstauglich sind.	2	
84	Eigene Fähigkeiten	3	
91	Unfähigkeit	3	
100	Angst davor ein Feuer zu starten	2	
116	Ich bin nicht so geschickt	3	

Abbildung 30. Antworten Retrofitting-Nachrüstung

Die dritte und somit letzte geschlossene Frage im Bereich des Retrofittings lautete wie folgt:

Man nehme an, du hast einen Kaffeevollautomaten, der nicht alle Funktionalitäten bereitstellt, die du gerne haben würdest. Wie wahrscheinlich ist es, dass du einen Nachrüstsatz einem Neukauf vorziehen würdest?

In diesem Zusammenhang haben über 50 Prozent aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen für die Auswahlmöglichkeit ‚Vielleicht‘ gestimmt. Die diskrete Datenverteilung dazu kann anhand Abb. 31 betrachtet werden. Etwas mehr als 25 Prozent aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen würden einen Nachrüstsatz einem Neukauf vorziehen, wobei ein kleinerer Anteil (8 von 101 Teilnehmern und Teilnehmerinnen) ihn höchstwahrscheinlich und ein etwas größerer Anteil (19 von 101) eher wahrscheinlich auswählen würden. Jene Teilnehmer und Teilnehmerinnen, die sich für die letzteren beiden Auswahlmöglichkeiten entschieden haben, hatten abschließend noch Zugang zu einer offenen Frage, die wie folgt lautete:

Sofern du zum Nachrüstsatz tendierst, welche drei Eigenschaften/Ideen am Nachrüstsatz haben dir am meisten gefallen?

Obwohl 27 Teilnehmer und Teilnehmerinnen eine der beiden Antwortmöglichkeiten ausgewählt haben und somit in weiterer Folge eine offene Frage zu beantworten hatten, haben drei von ihnen die offenen Fragen nicht beantwortet. Alle anderen

- Höchstwahrscheinlich: 8
- Eher wahrscheinlich: 19
- Vielleicht: 57
- Eher unwahrscheinlich: 12
- Höchst unwahrscheinlich: 5
- Keine Antwort: 0
- -----
- Gesamt: 101



Abbildung 31. Verteilung Retrofitting-Nachrüstsatz Neukauf vorziehen

24 Teilnehmer und Teilnehmerinnen haben darauf geantwortet. Da jeder Teilnehmer und jede Teilnehmerin dazu aufgerufen war, drei Antworten zu liefern, lagen insgesamt 72 Datensätze vor. Jede Antwort wurde einer bestimmten Kategorie zugeordnet. Die Anzahl der Datensätze, die einer Kategorie zugeordnet wurde, kann der folgenden Liste entnommen werden:

- Nachhaltigkeit (9)
- kostengünstige Alternative (8)
- einfache Nachrüstung (8)
- Fernzugriff (8)
- Nachrüstsatz ist erweiterbar (7)
- mögliche Anbindung an weitere Systeme, z. B. Smart Assistent (Automatisierung) (3)
- Portabilität (z. B. unterschiedliche Kaffeevollautomaten-Modelle) (3)
- Optik des Kaffeevollautomaten bleibt unverändert (2)
- verfügbares Webinterface bzw. GUI (2)
- personalisierte Anpassungen möglich (2)
- Vertraute Funktionalitäten bleiben erhalten (1)
- Sonstiges bzw. irrelevant (17 davon 11 leer)

Die exakte Auflistung aller Antworten sowie deren Kategorienzuordnungen können anhand einer Liste im Appendix betrachtet werden. Sofern Teilnehmer und Teilnehmerinnen bei der geschlossenen Frage ‚eher unwahrscheinlich‘ (12 von 101

Teilnehmern und Teilnehmerinnen) oder ‚höchst unwahrscheinlich‘ (5 von 101 Teilnehmern und Teilnehmerinnen) ausgewählt haben, wurden sie im Anschluss zu zwei weiteren offenen Fragen manövriert. Die erste Frage bezog sich auf den Neukauf und lautete wie folgt:

Sofern du zum Neukauf tendierst, weshalb würdest du dich für einen Neukauf entscheiden?

Abgesehen von einer Person, die nicht geantwortet hat, haben 16 Teilnehmer und Teilnehmerinnen eine Antwort auf die offene Frage gegeben. Alle Antworten wurden einer vordefinierten Kategorie zugeordnet. Dabei standen folgende Kategorien zur Auswahl:

- Befürchtung, etwas falsch zu machen beim Nachrüsten
- Aufwand geringer als beim Nachrüsten
- subjektive Präferenz zur Nutzenmaximierung (Wirtschaftlichkeitsprinzip)
- Sonstiges bzw. irrelevant

Die Anzahl der Datensätze, die einer bestimmten Kategorie zugeordnet wurden, können anhand der Abb. 32 betrachtet werden.

Zusammenfassung:

- 1.) Befürchtung etwas falsch zu machen beim Nachrüsten: 3
- 2.) Aufwand geringer als beim Nachrüsten: 5
- 3.) subjektive Präferenz zur Nutzenmaximierung (Wirtschaftlichkeitsprinzip): 1
- 4.) Sonstiges bzw. irrelevant: 7

Sofern du zum Neukauf tendierst, weshalb würdest du dich für einen Neukauf entscheiden?		
Antwort	Anzahl	Prozent
Antwort	16	13.68%
Keine Antwort	1	0.85%
Nicht beendet oder nicht gezeigt	100	85.47%

ID	Antwort	Anzahl
10	Neukaufpreis wirkt meist sehr günstig im Verhältnis zu Reparaturen/Nachrüstungen	3
30	Leichter als umrüsten und benutzerfreundlicheres Interface, aber ich finde sowas bei einer kaffe Maschine unnötig, weil da muss ich eh hingehen um den Kaffee zu holen aber für Radios wäre sowas cool	2
35	Zu Zeitaufwendig	2
37	Faulheit	2
40	Die Hürde, selbst etwas an dem Kaffeeautomaten kaputt zu machen, wenn ich selbst dran rumschraube	1
41	-	4
56	Ich würde mir keine neue Maschine kaufen	4
67	-	4
69	-	4
72	Weil zu große angst was falsches zu machen.	1
82	Einfacher und unkomplizierter	2
91	Angst, Geräte vollständig zu zerstören	1
94	Trinke kein kaffee	4
105	Schneller, Schmeckt besser, alter kaputt	2
106	Meistens nur sofern das alte Gerät broken ist; Kopfhörer zb seit 9y in Verwendung daily und solange sie halten, no need for improvement	4
116	-	4

Abbildung 32. Kategorisierung Retrofitting-Neukauf

Abschließend wurde die folgende Frage an die ausgewählte Teilnehmerzahl gerichtet:

Welche Voraussetzungen müssten gegeben sein, dass du deine Meinung änderst und dich für einen Nachrüstsatz entscheidest?

Es haben 16 Teilnehmer und Teilnehmerinnen eine Antwort abgegeben, eine

Person hat nicht geantwortet. Da die Antworten einen offenen Aufbau aufweisen, wurde eine Kategorisierung wie folgt vorgenommen:

- Bereitstellung eines Tutorials bzw. anderweitige Vermittlung, wie die Nachrüstung umgesetzt werden kann
- Nachrüstung einfach durchführbar
- Nachrüstsatz kann bei Behebung bestehender Defekte behilflich sein
- Garantieverlängerung
- Hersteller oder Herstellerin soll im Zusammenhang mit modularer Erweiterung keinen Protektionismus praktizieren
- Nachrüstsatz beim Neukauf bereits enthalten
- Hersteller oder Herstellerin soll eine möglichst lange Lebensdauer des Geräts garantieren
- Sonstiges bzw. irrelevant

Während die ersten drei Kategorien uneingeschränkt umsetzbar sind, muss bei allen weiteren Kategorien der Originalhersteller oder die Originalherstellerin in den Nachrüstungsprozess mit einbezogen werden. Die exakte Zuordnung aller Antworten zu Kategorien kann anhand der Abb. 33 betrachtet werden.

Zusammenfassung:

- 1.) Bereitstellung eines Tutorials bzw. anderweitige Vermittlung wie die Nachrüstung umgesetzt werden kann: 4
- 2.) Nachrüstung einfach durchführbar: 3
- 3.) Nachrüstsatz kann bei Behebung bestehender Defekte behilflich sein: 1
- 4.) Garantieverlängerung: 1
- 5.) Hersteller soll im Zusammenhang mit modularer Erweiterung keinen Protektionismus praktizieren: 1
- 6.) Nachrüstsatz beim Neukauf bereits enthalten: 1
- 7.) Hersteller soll eine möglichst lange Lebensdauer des Geräts garantieren: 1
- 8.) Sonstiges bzw. irrelevant: 4

Welche Voraussetzungen müssten gegeben sein, dass du deine Meinung änderst und dich für einen Nachrüstsatz entscheidest?

Antwort	Anzahl	Prozent
Antwort	16	13.68%
Keine Antwort	1	0.89%
Nicht beendet oder nicht gezeigt	100	85.47%

ID	Antwort	
10	Garantieverlängerung	4
30	Wenn ich Lust habe sowas als reifen Projekt zu machen aber würde es nie machen um mehr nutzen zu haben mehr so aus Spaß mit Elektronik spielen und den nachrüstsatz verwenden um selbst mehr Features zu implementieren	8
35	Motivation und know-how müssen vorhanden sein	1
37	Der Nachrüstsatz müsste beim Erstkauf enthalten sein	6
40	Einfaches Tutorial im Internet	1
41	Die originale Maschine müsste bereits extrem reparierbar sein um die Lebensdauer zu garantieren um dann Erweiterungen und Zusatzkosten rechtfertigen. (Problem liegt meiner Meinung nach daher beim originalen Hersteller)	7
56	Ich kaufe mir keine neue Maschine, ich kann nicht anders als Geld zu sparen, sprich, selbst wenn ich mit der Maschine unzufrieden bin, solange sie ihre Grundfunktionen erfüllt, werde ich mir keine neue Maschine kaufen. Ich würde von sich aus eher zu einem Nachrüstsatz greifen, vorausgesetzt ich verspreche mir dadurch eine Lösung eines Problems und es ist preislich haltig.	3
67	Viel nutzen, einfacher einbau	2
69	leicht einbaubar zu sein	2
72	Ich müsste wissen was ich tue xD	1
82	Es müsste einfach umsetzbar sein	2
91	Wissen	1
94	Trinke noch immer kein kaffee aber macht auf jeden fall weiter so jungs thumbs_up	8
105	nichts	8
106	Das nachrüsten in erster Linie möglich ist und nicht behindert wird, siehe appleprodukte	5
116	trust	8

Abbildung 33. Kategorisierung Retrofitting-Voraussetzung Nachrüstsatz

Die Umfrage wurde mit LimeSurvey erstellt und den Teilnehmern und Teilnehmerinnen anhand eines QR-Codes zugänglich gemacht. Nach Einsendeschluss wurden die Daten ausgewertet. Dazu wurde sowohl LimeSurvey als auch das Microsoft-Office-Paket verwendet. Während mit LimeSurvey die Datensätze

durch verschiedene Filter aufbereitet werden konnten, wurde mit Microsoft Excel die Visualisierung vorgenommen. Obwohl LimeSurvey Visualisierungsfunktionen bereitstellt, sind jene nur eingeschränkt konfigurierbar, sodass die Daten in ein kompatibles Excel-Format exportiert wurden. Anhand der bereitgestellten Daten wurden in Excel passende Diagrammtypen ausgewählt, um die Daten möglichst einfach, verständlich und visuell ansprechend zu repräsentieren.

7.3 Beobachtung und Interview

Im Anschluss an die großangelegte Studie wurden mehrere Teilnehmer und Teilnehmerinnen mit und ohne IT-Background eingeladen, um jeweils an einer Beobachtung und einem Interview teilzunehmen. Bei der Beobachtung wurden Teilnehmer und Teilnehmerinnen bei der Nachrüstung jenes Nachrüstsatzes beobachtet, der im Zuge der autoethnografischen Studie entwickelt wurde. Das Interview wurde im Anschluss an die Beobachtung durchgeführt, wobei sowohl auf Nachhaltigkeitsthemen als auch auf die Nachrüstung und das Retrofitting im Allgemeinen eingegangen wurde, um möglichst nutzenbringende Informationen für die Beantwortung der Forschungsfragen zu erhalten. Bevor sechs reguläre Teilnehmer und Teilnehmerinnen eingeladen wurden, wurde anhand eines Testpilots ein Probelauf durchgeführt. Dabei konnten bisher unbeachtete Schwachstellen ermittelt und vor der Durchführung der regulären Läufe ausgebessert und optimiert werden.

7.3.1 Beobachtung

Vor jedem Beobachtungsdurchlauf wurden die Probanden und Probandinnen über den Ablauf sowie den Forschungsgegenstand informiert. Auf technische Umrüstungsdetails wurde nicht eingegangen, da davon ausgegangen wurde, dass die Anleitung ausreichend verständlich und mit grafischen Darstellungen versehen ist. Zudem wurde jedem Probanden und jeder Probandin mitgeteilt, dass ein Abbruch jederzeit möglich ist, für den Fall, dass etwas gefordert wird, was dem Probanden oder der Probandin zu weit geht. Jeder Beobachtungsdurchlauf verlief nach dem gleichen Prinzip, sodass vergleichbare Ergebnisse zustande kamen. Für die Nachrüstung wurde den Teilnehmern und Teilnehmerinnen eine Anleitung (siehe Appendix), ein Schraubenzieher-Set, ein Notebook, ein passender Kaffeevollautomat sowie der Nachrüstsatz zur Verfügung gestellt. Die Nachrüstungsergebnisse aller Beobachtungen wurden anhand von acht Schritten in

Anlehnung an die Anleitung miteinander verglichen und ausgewertet. Zusätzlich wurden die Erfahrungen mit der Bedienung der Webanwendung gesammelt und miteinander verglichen.

Zu Anfang war es erforderlich, die Kaffeemaschine vom Stromnetz zu trennen und zwei Schrauben mit einem Schraubenzieher herauszudrehen. Alle Probanden und Probandinnen führten diesen Schritt auf ähnliche Weise durch. Zunächst vergewisserten sie sich, dass der Kaffeevollautomat abgesteckt ist und in weiterer Folge wurde ein passender Schraubenzieher aus der Schraubenzieher-Box entnommen, um die beiden Schrauben zu lösen. Es konnten keine Auffälligkeiten oder Probleme erkannt werden.

Im zweiten Schritt wurde die seitliche Abdeckung, die im ersten Schritt aufgeschraubt wurde, vom Kaffeevollautomaten gelöst. Während vier von sechs Personen den Deckel auf Anhieb lösen konnten, hatten zwei Personen geringfügige Probleme damit. Das Problem für die beiden Personen bestand darin, dass sie nicht wussten, in welche Richtung der Deckel herausgezogen werden sollte. Nach einigen Versuchen konnten die beiden Personen den Deckel lösen.

Als Nächstes sollte jener Stecker, der die Bedienplatine mit der Hauptplatine verbindet, herausgezogen werden. Auch hier konnten vier von sechs Teilnehmern und Teilnehmerinnen den Stecker sofort lokalisieren, während die beiden anderen Personen danach suchen mussten. Zwei von sechs Personen konnten den Stecker problemlos rausziehen, zwei weitere Personen waren sich unsicher, wie der Stecker zu lösen ist, konnten es dennoch sofort erledigen. Die letzten beiden Testpersonen hatten Schwierigkeiten und brauchten mehrere Anläufe. Alle sechs Teilnehmer und Teilnehmerinnen waren sich bei zwei Punkten einig: Die Anleitung enthielt keine Informationen darüber, in welche Richtung der Stecker rausgezogen werden soll und ob es beim Rauslösen weiteres zu beachten gibt.

Anschließend sollte im vierten Schritt das Nachrüst-Kit bereitgestellt werden. Alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen konnten den Nachrüst-Kit unverzüglich identifizieren und bereitstellen.

Im nächsten Schritt wurden die Probanden und Probandinnen dazu aufgefordert, den Nachrüstsatz im Kaffeevollautomaten zu platzieren. Alle sechs Personen konnten den Nachrüstsatz sofort korrekt platzieren, wobei diverse Unsicherheiten auftraten. Aufgrund der fehlenden Rastposition waren sich alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen unsicher, inwieweit der Nachrüstsatz hineingeschoben werden soll und ob er dort lose zu platzieren ist. Darüber hinaus äußerten zwei Personen Sorgen darüber, ob der Nachrüstsatz nicht zu weit heraushänge, sodass die seitli-

che Abdeckung nicht mehr korrekt angebracht werden könnte. Daraufhin wurde im sechsten Schritt der Stecker des Nachrüstsatzes mit der Hauptplatine verbunden. Während fünf von sechs Teilnehmern und Teilnehmerinnen den Stecker sowie den Gegenstecker direkt identifizieren konnten, konnte eine Testperson den Gegenstecker erst nach kurzer Suche auffinden. Nachfolgend konnten vier von sechs Probanden und Probandinnen die beiden Stecker, ohne die Steckrichtung zu vertauschen, problemlos miteinander verbinden. Eine Testperson brauchte mehrere Anläufe, um die Stecker zu verbinden, und ein weitere Person konnte nach anfänglich falscher Steckrichtung die beiden Stecker schließlich korrekt anschließen.

Im vorletzten Schritt wurde der zweite Stecker des Nachrüstsatzes mit dem Stecker der Frontplatine verbunden. Bis auf eine Testperson konnten alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen beide Stecker identifizieren. Eine Testperson empfand die Beschreibung an dieser Stelle als verwirrend, wodurch die beiden Stecker nicht unmittelbar identifiziert werden konnten. Nach kurzer Überlegung konnten die beiden Stecker schließlich intuitiv gefunden werden. Alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen konnten die Stecker miteinander verbinden, wobei die Hälfte davon es mehrmals probieren musste. Allerdings wurde die Steckrichtung von allen Teilnehmern und Teilnehmerinnen korrekt erkannt. Die Teilnehmer und Teilnehmerinnen waren kollektiv der Meinung, dass eine Führungsschiene und Clips-Funktion die Anschlussfunktion wesentlich erleichtern würden.

Abschließend sollten die fehlende Seitenbekleidung wieder befestigt, die beiden Schrauben festgeschraubt sowie die Kaffeemaschine mit dem Stromkreis verbunden werden. Die Hälfte aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen konnten die Seitenverkleidung auf Anhieb platzieren, die andere Hälfte benötigte dafür mehrere Anläufe. Alle Probanden und Probandinnen konnten die Schrauben problemlos festziehen und den Kaffeevollautomaten mit dem Stromkreis verbinden.

Sobald die Nachrüstung erfolgt ist, konnte der Kaffeevollautomat per Webapplikation genutzt werden. Während fünf von sechs Probanden und Probandinnen die Webapplikation problemlos aufrufen und sich auf der Webseite zurechtfinden konnten, hatte eine Person Probleme damit. Da die Webseite durch die Testperson nicht aufgefunden werden konnte, musste eingegriffen werden. Allerdings konnten alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen sämtliche Befehle auf der Webseite klar identifizieren. Die Kaffeemaschine konnte von fünf Personen reibungslos eingeschaltet werden. Aufgrund mehrfacher Funktionsaufrufe ging bei einer Testperson die Kaffeemaschine an und schaltete sich gleich darauf wieder

aus; der Testperson war nicht bewusst, dass sie nach einem Funktionsaufruf auf die Ausführung warten musste. Nachdem die Kaffeemaschine eingeschaltet wurde, konnten alle sechs Teilnehmer und Teilnehmerinnen erfolgreich einen Kaffee über die Webseite zubereiten. Fünf von sechs Personen beendeten nach diesem Schritt den Nachrüstvorgang und gingen zum Interview über. Eine Person testete noch weitere Funktionalitäten. So wurde nach der Kaffeezubereitung die Kaffeemaschine wieder ausgeschaltet und nachfolgend wurden verschiedene Funktionalitäten auf der Webseite betätigt. Die Applikation reagierte korrekt und initiierte keine weiteren Funktionalitäten im Off-Modus. Anschließend wurde die Kaffeemaschine physisch per Bedienplatine eingeschaltet, auch das funktionierte ohne Probleme. Während die Kaffeemaschine eingeschaltet wurde, wählte die Testperson per Webseite die Ausschaltfunktion. Die Kaffeemaschine reagierte korrekt, indem sie zunächst den Einschaltprozess abgeschlossen hatte und anschließend den Ausschaltprozess durchführte. Nachdem die Kaffeemaschine wieder eingeschaltet wurde, hat die Testperson das Potentiometer voll aufgedreht und gleichzeitig die Funktion ‚Doppelte Tasse Kaffee‘ per Webapplikation betätigt. Auch diese Befehle wurden korrekt ausgeführt. Da der Wasserstand zu gering war, schloss auch die sechste Testperson den Nachrüstvorgang inklusive Tests ab.

Der Nachrüstvorgang konnte trotz erwähnter Probleme durch alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen erfolgreich durchgeführt werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass das Ergebnis des Reverse-Engineering-Prozesses in Form eines Retrofitting-Moduls durch Anwender und Anwenderinnen genutzt werden kann.

7.3.2 Interview

Im Anschluss an die Beobachtung wurden alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen zu einem Interview eingeladen. Für das Interview wurden im Vorhinein Fragen festgelegt, wobei die Fragen in chronologischer Reihenfolge behandelt wurden. Die Fragen bezogen sich auf drei Kernbereiche: die durchgeführte Nachrüstung, das Retrofitting im Haushaltsbereich und Nachhaltigkeit. Jedes Interview dauerte im Durchschnitt 15 bis 20 Minuten, es gab jedoch kein zeitliches Limit. Die Interviewergebnisse wurden in Anlehnung an den Fragenkatalog (siehe Appendix) ausgewertet und miteinander verglichen.

Bei der ersten Frage danach, ob die Testperson den Nachrüstvorgang erfolgreich durchführen konnte, wurden folgende Antworten, gesammelt:

Alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen waren der Meinung, dass die Nachrüstung

sehr einfach durchzuführen war. Ein Teil davon hatte keine Schwierigkeiten und empfand den Nachrüstvorgang als schnell erledigt. Zwei Testpersonen stimmten überein, dass bei teilweiser gegebener Affinität zur Technik die Nachrüstung durch die Mehrheit an Personen funktionieren sollte. Während zwei Testpersonen mit der Anleitung trotz der schrittweisen Beschreibung nicht besonders gut zurecht kamen, empfanden zwei andere Testpersonen die Anleitung als gut beschrieben. Die Hälfte der Teilnehmer und Teilnehmerinnen war sich einig, dass insbesondere beim Umstecken der Stecker die Steckrichtung beachtet werden musste, aber ansonsten keine Komplexität vorlag. Eine Testperson beschrieb die Tatsache, dass nichts zusammengelötet, sondern nur etwas umgesteckt werden musste, als großartig. Eine andere Testperson empfand die Nachrüstung als spannend, für einen ‚Joy of Hacking‘ jedoch den Umfang als zu gering und unterschwellig, denn sie hatte das Gefühl, dass die Nachrüstung keine große Hürde darstellt und innerhalb von wenigen Minuten erledigt werden kann.

Die zweite Frage des Interviews zielte darauf ab, ob die Teilnehmer und Teilnehmerinnen die Nachrüstung mit Nachhaltigkeit verbanden.

Zwei Testpersonen konnten beim aktuellen Nachrüstsatz im Sinne der Nachhaltigkeit keinen Mehrwert erkennen, während durch weitere mögliche Funktionserweiterungen, beispielsweise durch einen intelligenten Ein- und Ausschaltmechanismus, dies der Fall wäre. Ein weitere Testperson war der Überzeugung, dass der Nachrüstsatz nur unter der Bedingung als nachhaltig gelten kann, wenn der gezielte Bedarf an der Vernetzung eines Haushaltsgeräts besteht. Einer anderen Testperson schien das Konzept als gute Idee, da keine neue Maschine gekauft werden muss und ein Gerät länger genutzt werden kann, was als nachhaltig bewertet wurde und positive finanzielle Folgen hat. Darüber hinaus ist das Konzept auf andere Haushaltsgeräte übertragbar, was ebenfalls zur Nachhaltigkeit beiträgt und insbesondere von einer Testperson befürwortet wird.

Durch die nächste Frage wurde der Aspekt behandelt, was gegeben sein müsste, damit der Teilnehmer oder die Teilnehmerin sich für den Nachrüstsatz und gegen eine Neuanschaffung entscheiden würde.

Für vier Testpersonen spielte der Preis eine Rolle, wobei für zwei davon der monetäre Aspekt das wichtigste Kriterium war. Zudem sollte der interessierte Kunde oder die interessierte Kundin auf die Nachrüstung aufmerksam gemacht werden und eine Art zusätzliche Garantieverlängerung erhalten, antworteten einzelne Teilnehmer und Teilnehmerinnen. Die Hälfte der Teilnehmer und Teilnehmerinnen vertrat die Meinung, dass der Wunsch nach dieser Funktionalität gegeben sein

müsste. Sofern der Kauf einer teuren Kaffeemaschine verhindert werden kann, kann sowohl dem Konsumzwang entgegen gewirkt werden als auch der zunehmenden Abfallmenge und der Gewöhnung an ein neues Gerät vorgebeugt werden, was laut einer Testperson nachhaltig und für die Kaufentscheidung relevant ist. Für eine weitere Testperson müsste es sich beim aufzurüstenden Gerät um ein ‚kultiges‘ Gerät handeln, bei dem eine bestimmte persönliche Bindung gegeben ist und das Design sowie alles andere rundherum inkl. des Mehrwerts passt.

Anschließend wurden die Teilnehmer und Teilnehmerinnen danach gefragt, welchen monetären Wert sie einem Nachrüstsatz, wie jenem, den sie angewendet haben, beimessen.

Hier waren sich vier von sechs Teilnehmer und Teilnehmerinnen einig, dass 20 bis 30 Euro ein angemessener Preis in Anbetracht der wirtschaftlichen Aspekte wäre. Eine Testperson würde ein Drittel des Neupreises für einen Nachrüstsatz ausgeben. Laut einer anderen Testperson stellt alles, was unterhalb von 20 Euro liegt, keine Hürde dar, wobei die Hochwertigkeit des aufzuwertenden Geräts eine wesentliche Rolle einnimmt. Eine Testperson würde den Nachrüstsatz ‚just for fun‘, ohne weitere Aspekte für zehn Euro kaufen.

Die nächste Frage bezog sich darauf, ob die Nachhaltigkeit für die Teilnehmer und Teilnehmerinnen eine Rolle spielt.

Die Hälfte aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen gab an, eher nachhaltig zu leben. Eine Testperson gehe mit Ressourcen sehr bewusst um; alles, was genutzt werden kann, wird auch benutzt, und was nicht mehr genutzt werden kann, wird ordentlich entsorgt. Eine andere Testperson achtet darauf, dass mit Lebensmitteln sorgsam umgegangen wird, heizt wenig, nutzt einen Ökostromanbieter und verwendet ausschließlich Steckerleisten. Als besonders nachhaltig innerhalb der westlichen Welt schätzte sich eine weitere Testperson ein. Sie besitzt weder Smartphone noch Auto, isst wenig Fleisch, kauft selten etwas Neues, fliegt wenig und nutzt ihr Handy seit sieben Jahren. Allerdings maßen zwei Testpersonen anderen Aspekten, beispielsweise Wirtschaftlichkeit, Komfort und Zeit, eine weitaus wichtigere Rolle als der Nachhaltigkeit bei. Sofern sich diese Aspekte mit der Nachhaltigkeit vereinbaren ließen, würden sie darauf eingehen.

Anschließend wurde die Nachhaltigkeitsfrage auf einen konkreten Bereich reduziert und die Teilnehmer und Teilnehmerinnen wurden befragt, ob sie beim Kauf elektronischer Geräte auf Nachhaltigkeit achten würden.

Die Mehrheit aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen, fünf von sechs, gaben an, auf unterschiedliche Aspekte in diesem Zusammenhang zu achten. Die Hälfte aller

Teilnehmer und Teilnehmerinnen gebe darauf acht, dass elektronische Geräte möglichst lange halten; in den meisten Fällen beruhen diese Entscheidungen auf Erfahrungswerten und Testberichten. Als Indikator für Nachhaltigkeit wird durch eine Testperson auch der Energieverbrauch beachtet, wobei die Energieverbrauchslabels miteinander verglichen werden. Eine andere Testperson legt darauf Wert, dass ein bestimmtes Maß an Reparierbarkeit gegeben ist, sodass bei einem Defekt eine Reparatur durchgeführt werden kann. Zudem sollten die Kernfunktionalitäten langfristig solide funktionieren, wodurch Geräte mit vielen Zusatz- und Luxusfeatures eher gemieden werden.

Bei der vorletzten Frage wurden die Teilnehmer und Teilnehmerinnen dazu befragt, ob sich das Retrofitting im Haushaltsbereich als Nachhaltigkeitsmethode etablieren könne.

Alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen waren sich einig, dass sich das Retrofitting im Haushaltsbereich unter gewissen Bedingungen als Nachhaltigkeitsmethode etablieren könne. Eine Testperson vertrat die Meinung, dass so Geräte aus der Vergangenheit aufgewertet werden können und für die Zukunft nichts weggenommen würde. Zudem verbindet das Retrofitting die Welten aus alt und neu miteinander, was als positiv bewertet wird. Allerdings sei der Lebenszyklus für bestimmte Geräte endgültig vorbei, da sich einige Aspekte, beispielsweise der Energieverbrauch, nicht reduzieren lassen. Abschließend wurden alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen dazu befragt, was gegeben sein müsste, damit sich das Retrofitting als Nachhaltigkeitsmethode etabliert.

Vier von sechs Teilnehmern und Teilnehmerinnen vertraten die Meinung, dass insbesondere die Originalhersteller und Originalherstellerinnen einen Beitrag in Form von ablassendem Protektionismus und Kooperation mit dem Kit-Hersteller und Kit-Herstellerinnen leisten müssten. Im Gegenzug könnten sich laut einer Testperson die Hersteller und Herstellerinnen mit einem Nachhaltigkeitssiegel schmücken. Zudem war dieselbe Testperson der Meinung, dass bei ähnlich geringem Komplexitätsgrad wie jenem beim durchgeführten Umrüstvorgang viele Personen die Nachrüstung durchführen könnten. Eine andere Testperson war der Auffassung, dass der Fortschritt durch den Kunden oder die Kundin erkennbar sein und einen Mehrwert liefern muss. Für eine weitere Testperson müssten die Produkte mechanisch langlebig sein und es müsste eine Verbundstrategie ins Leben gerufen werden, damit das Retrofitting bereits bei der Produktentwicklung als Teil einer umfassenden Strategie inkludiert wird.

Kapitel 8

Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Forschungsergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen mit der erarbeiteten Theorie interpretativ diskutiert. Nach einer thematischen Einleitung und Rekapitulation aller Ergebnisse wird auf die Forschungsergebnisse interpretativ eingegangen, wobei diskutiert wird, inwiefern persönliche Erwartungen erfüllt wurden, wie die Ergebnisse in den definierten Rahmen passen und ob die erwünschten Resultate zu neuen Erkenntnissen führen. Im Anschluss wird auf die Grenzen der Forschungsarbeit und deren Auswirkungen eingegangen. Dabei werden Ansatzpunkte erwähnt, auf denen andere Forschende mit weiteren Untersuchungen aufbauen können. Abschließend wird die Arbeit in Relation zu ähnlichen Arbeiten gesetzt, um die Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

Die Gesellschaft hat sich daran gewöhnt, in zunehmend kürzeren Zyklen bestehende Haushaltsgeräte durch neue zu ersetzen. Der dadurch entstehende Elektroschrott nimmt weltweit zu, insbesondere in den Industrieländern, und trägt in seiner Gesamtheit zur raschen Klimaerwärmung bei. Mittels bestehender und neuer Methoden soll eine Abkehr davon erreicht werden, hin zu einem nachhaltigeren System in Form einer funktionierenden und optimierten Kreislaufwirtschaft. Altbewährte und liebgewonnene Haushaltsgeräte sollen aufgerüstet werden, um ihre Lebenszeit zu verlängern. Daraus ergeben sich vielseitige nachhaltige Effekte. Eine vorzeitige Entsorgung kann verhindert werden, der Ressourcenverbrauch und Emissionsausstoß werden gesenkt sowie Kosten gespart.

8.1 Reverse-Engineering-Prozess

Aus der Überlegung heraus, einen Reverse-Engineering-Prozess anhand eines Haushaltgeräts durchzuführen, entstand die Idee, einen Nachrüstsatz für einen Kaffeevollautomaten zu entwickeln und gleichzeitig sämtliche Erfahrungen, Ressourcen und Artefakte, die im Zuge dieses Prozesses gesammelt und erstellt wurden, zu dokumentieren. Die gesamte Entwicklung als autoethnografische

Studie zu beschreiben, bot nicht nur einen großen Freiraum, verschiedene Wege auszuprobieren, sondern auch die Notwendigkeit, alle durchgeführten Schritte zu beschreiben und zu reflektieren. Insbesondere der Umstand, als Wirtschaftsinformatiker mit IT-Background tätig zu sein, jedoch vor der Entwicklung dieser Arbeit mit Elektrotechnik und Programmierung von Embedded Systems noch keine Erfahrungen gesammelt zu haben, machte das Vorhaben als Neueinsteiger herausfordernd - zum einen, da kaum autoethnografische Studien im Bereich der Softwareentwicklung existieren, und zum anderen, weil der Prozess, sich Wissen in gänzlich neuen Fachbereichen anzueignen und es mit bestehenden Kenntnissen sowie Fähigkeiten eines anderen Fachbereichs zu kombinieren, zahlreiche Herausforderungen mit sich bringt. Die wichtigsten Erkenntnisse liefert dabei jenes Artefakt, das in Form eines generischen Templates im Zuge der Entwicklung definiert wurde und somit eine zielführende Durchführung eines Reverse-Engineering-Prozesses im Haushaltsbereich durch Neueinsteiger und Neueinsteigerinnen ermöglicht hat. Während der Entwicklung dieses Artefakts wurden zahlreiche Entscheidungen getroffen und Tätigkeiten durchgeführt, die zum Teil aufgrund diverser praxisbezogener Vorerfahrungen und zum anderen auf theoriebezogenem Vorwissen sowie Wissen beruht, das zeitgleich zur Entwicklung angeeignet wurde.

In Anbetracht des durchgeführten Beispiels anhand des generischen Templates konnte festgestellt werden, dass der Durchführungsprozess strukturiert und chronologisch, mit fest definierten Schritten sowie diversen Zusatzinformationen und optionalen Vorgängen ausgeführt werden kann. Sofern die beiden Herangehensweisen, mit und ohne Durchführungsprozess, miteinander verglichen werden, kann davon ausgegangen werden, dass der Entwicklungsprozess mit einem generischen Durchführungsplan performanter und effektiver ist. Aus Sicht der zeitlichen Komponente kann sich die durchzuführende Person einerseits Irrwege ersparen und andererseits auf Erfahrungen zurückgreifen, die aus Sicht eines Neueinsteigers oder einer Neueinsteigerin zur raschen Umsetzung führen. Üblicherweise erstellt ein sachkundiger Experte oder eine sachkundige Expertin ein Artefakt für eine bestimmte Zielgruppe, beispielsweise für Neueinsteiger und Neueinsteigerinnen. Dabei relativiert der Experte oder die Expertin aufgrund eines breiten Wissensspektrums in bestimmten Fällen die Komplexität, wodurch Neueinsteiger oder Neueinsteigerinnen leicht überfordert werden. In der vorliegenden Arbeit wurde das Artefakt ohne Vorwissen und durch zeitgleiches Aneignen von Fachwissen durch einen Neueinsteiger erstellt und erprobt. Aus diesem Grund eignet sich das

Artefakt auch für andere Neueinsteiger und Neueinsteigerinnen, die unkompliziert und effektiv zu einem brauchbaren Ergebnis kommen wollen.

Als besonders zeitintensiv hat sich die Erprobung von Optionen während des Aufzeichnens, Auslesens und der Interpretation einzelner Bitmuster ergeben, die zwischen der Haupt- und Bedienplatine erfasst werden. Zunächst wurden alle Bitmuster per Mikrocontroller ausgelesen. Aufgrund der hohen Latenzzeit des Mikrocontrollers sowie der großen Menge an Datenpunkten, die innerhalb kürzester Zeit erfasst werden mussten, führte jede kurzzeitige Sammlung an Datenpunkten zu einer Überlastung des Mikrocontrollers und somit zu einem Absturz. Die Datenerfassung mittels Mikrocontroller erfolgte anhand unterschiedlich gewählter Parameter. So wurde auch die Sampling-Rate verringert. Allerdings änderten alle vier Datenkanäle zeitweise binnen Mikrosekunden mehrmals den Zustand, wodurch der Mikrocontroller nur bestimmte Teile erfassen und ausgeben konnte. Da für die korrekte Wiedergabe allerdings alle Datenpunkte gesammelt werden mussten, wurde ein Logic-Analyzer eingesetzt. Der Logic-Analyzer von Saleae lieferte die gewünschten Ergebnisse und trug zu einem raschen Fortschritt bei. Weiterhin ermöglichten auch die vorzeitige Aneignung der Basics in der Elektrotechnik und die korrekte Abbildung aller relevanten elektrotechnischen Komponenten, die für die Entwicklung benötigt und in Form von Schaltplänen dokumentiert wurden, ein rasches Voranschreiten innerhalb des Projekts. Durch eine Kombination von Wissen, Schaltplänen und der Erfassung aller Bitmuster konnten Funktionalitäten infolge von logischen Schlussfolgerungen identifiziert und mittels Mikrocontroller reproduziert werden. Ohne Aneignung der Basics und ohne Erstellung der Schaltpläne wäre zwar ein einfaches Auslesen mittels Logic-Analyzer und eine Simulation der Funktionalitäten anhand der erfassten Bitmuster möglich, allerdings würde dies nicht durchgehend funktionieren, da es einerseits unterschiedliche Signalphasen und andererseits analoge Werte für die beiden Drehknöpfe gibt. Da jeder Drehknopf einen Wert zwischen null und 1024 annehmen kann, können sich potenziell über eine Million verschiedener Kombinationen und somit Möglichkeiten ergeben. Daher wäre es für alle Neueinsteiger und Neueinsteigerinnen empfehlenswert, die Kombination aus den drei zuvor genannten Elementen zu befolgen. So kann die Wahrscheinlichkeit für gefährliche Unfälle und kostspielige Aktivitäten, beispielsweise Stromstöße, Kurzschlüsse etc. reduziert und das Projekt effektiv umgesetzt werden.

Während in der vorliegenden Arbeit weder die bestehende Hardware noch die Software beim Nachrüstvorgang verändert wurden, kann eine Nachrüstung auch

durch die Hinzunahme und Anbindung neuer elektronischer Bauelemente an die bestehende Hardware mittels Lötvorgängen erfolgen. Zwar bietet dies den Vorteil, dass die Kommunikationsmuster nicht erfasst und dechiffriert werden müssen, allerdings wird so die bestehende Hardware verändert, was aus Sicht der Modularität und Portierbarkeit kontraproduktiv ist. Demzufolge wäre die Nachrüstung an eine bestimmte Hardware gebunden, wodurch Austauschbarkeit und Anpassbarkeit nicht vollständig gegeben sind bzw. nur in einem stark eingeschränkten Umfang. Zudem kann die Nachrüstung nicht wiederverwendet werden, bis auf die modifizierte Platine als Ganzes. Erweiterungen sind bis auf die vorhandenen Funktionalitäten nicht möglich. Demgegenüber kann mithilfe des vorliegenden Nachrüstsatzes sowohl das Gerät per Applikation als auch per Bedienplatine gesteuert werden, wodurch dem Gerät zusätzlich zur bestehenden Funktionalität weitere Funktionen zugeteilt werden. Somit lässt sich schließen, dass eine Hardwaremodifikation im Vergleich zu einem Nachrüstsatz kaum Vorteile bietet.

Obwohl die unternommenen Untersuchungen ein breites Spektrum abdecken, wurden auch Grenzen bei der Forschungsarbeit wahrgenommen und bewusst gesetzt. Es ist nicht Ziel dieser Arbeit gewesen, einen Ansatz für fortgeschrittene Personen und Fachpersonen im Bereich des Retrofittings zu erstellen. Der Durchführungsprozess wurde in erster Linie für Neueinsteiger und Neueinsteigerinnen konzipiert, um einfache und fortgeschrittene Projekte durchführen zu können. Somit besteht die Möglichkeit, dass bei komplexeren Projekten, bei denen beispielsweise chiffrierte Kommunikationsformen verwendet werden, mit dem beschriebenen Ansatz keine Lösung gefunden werden kann. Ebenso sollten Lesende beachten, dass der Ansatz generisch aufgebaut ist und möglicherweise nicht alle Schritte für abweichende Nachrüstungsarten beinhaltet. Dennoch können neue Elemente und Schritte problemlos integriert werden. Auf das umgesetzte Beispiel hatten diese Limitationen keine Auswirkungen.

Weiterhin würde es über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen, den Ansatz anhand mehrerer Beispiele zu erproben. Zwar wurde die Umsetzung durch ein konkretes Beispiel illustriert und durchgeführt, allerdings wurde der Durchführungsprozess keinen weiteren Anwendungsfällen ausgesetzt. Infolgedessen können keine allgemeinen Aussagen zur Durchführbarkeit und Anwendbarkeit anderer Projekte getroffen werden. Dennoch würde eine erneute Durchführung anhand des gleichen Beispiels zu ähnlichen Ergebnissen führen, woraus sich schließen lässt, dass gleiche oder ähnliche Projekte ohne weitere Adaptierung des Durch-

führungsprozesses umgesetzt werden könnten.

Die Auswahl und Erprobung von Soft- und Hardware beim Reverse-Engineering-Prozess erfolgte in eingeschränktem Rahmen. Für das durchgeführte Beispiel wurden als Hardware ein Logic-Analyzer und ein Mikrocontroller ausgewählt, wobei keine weiteren vergleichbaren Hardwarekomponenten verwendet wurden. Somit kann keine Aussage dazu getroffen werden, ob die Nachrüstung mit anderen Hardware-Komponenten durchgeführt werden kann. Auch ein Hardware-Vergleich zu Machbarkeit und Effektivität im Sinne der Umsetzung kann anhand der vorliegenden Forschungsarbeit nicht ausgewertet werden. Sofern alle relevanten Parameter und Anforderungen in diesem Zusammenhang beachtet werden, kann davon ausgegangen werden, dass vergleichbare Hardware-Komponenten zu einem ähnlichen Ergebnis führen können.

8.2 Retrofitting anhand eines Beispiels im Sinne der Nachhaltigkeit und Zukunft

Im Anschluss an die erfolgreiche Umsetzung eines Prototyps mittels autoethnografischer Studie wurden einerseits eine Studie realisiert und andererseits Beobachtungen und Interviews durchgeführt, um auf alle weiteren Forschungsfragen Antworten zu erhalten. Zum Erlangen einer repräsentativen Meinung zum Retrofitting wurde eine vorwiegend quantitative Studie mit einzelnen qualitativen Fragen durchgeführt, wobei hauptsächlich Informatik-Studierende befragt wurden. Jene Zielgruppe wurde ausgewählt, da sie zum einen mit dieser Thematik bereits mehr oder weniger vertraut ist und zum anderen einer Generation angehört, die zukünftig eine entscheidende Rolle für das Fortbestehen der Menschheit innehaben wird. Zudem handelt es sich um eine Generation, die bereits mit dem Nachhaltigkeitsparadigma aufgewachsen ist und stärker als alle vorhergehenden Generationen auf Nachhaltigkeitsalternativen setzt, was auch anhand der Daten zur Nachhaltigkeit in der durchgeführten Studie ersichtlich ist. Obwohl jene Zielgruppe nicht für alle anderen Gruppen repräsentativ wirkt, kann ihr in diesem Zusammenhang eine Vorreiterstellung beigemessen werden, die zu einer schrittweisen Etablierung in der Gesellschaft führen kann. Im Anschluss wurden Beobachtungen und Interviews mit sechs Teilnehmern und Teilnehmerinnen aus zwei gegensätzlichen Gruppen durchgeführt. Während die eine Hälfte über einen IT-Background verfügte, hatte die andere Gruppe keine oder nur Grundkenntnisse in der IT. Der Unterschied zwischen der Studie und den Interviews sowie

den Beobachtungen bestand in zwei Elementen. Während bei der Studie der Nachrüstvorgang vorgeführt wurde und die quantitativen Antworten zwar in großer Menge und in bestimmter Korrelation, aber ohne Kausalzusammenhang ausgewertet werden konnten, konnte bei der Beobachtung und beim Interview die Testperson den Nachrüstvorgang selbstständig durchführen und die Akzeptanz des Retrofittings im Sinne der Nachhaltigkeit konnte ausführlicher diskutiert werden. Hierbei konnten insbesondere individuelle Ansichten erfasst werden, da jeder Teilnehmer und jede Teilnehmerin einen anderen Zugang zum Versuch hatte.

Mithilfe der drei wissenschaftlichen Methoden Studie, Beobachtung sowie Interview konnten die beiden Forschungsfragen danach beantwortet werden, in welchem Ausmaß das Ergebnis des Reverse-Engineering-Prozesses in Form eines Retrofitting-Moduls durch Benutzer und Benutzerinnen im Sinne der Nachhaltigkeit genutzt werden kann, sowie inwiefern das Retrofitting im Haushaltsbereich zur Nachhaltigkeit beitragen kann und ob es eine akzeptable Alternative zu bewährten Methoden darstellt. Sowohl aus Sicht der Studienteilnehmer und Studienteilnehmerinnen, die zu 80 Prozent der Meinung waren, dass das vorgestellte Ergebnis in Form eines Retrofitting-Moduls zumindest teilweise einen wesentlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit erbringt, als auch aller sechs Interviewpartner und Interviewpartnerinnen, die den Nachrüstsatz erfolgreich einbauen konnten und unter bestimmten Bedingungen das Retrofitting-Modul im Sinne der Nachhaltigkeit nutzen würden, besteht die übereinstimmende Meinung, dass das Retrofitting im Haushaltsbereich eine Zukunft hat und sich etablieren wird. Somit lässt sich im Allgemeinen eine positive Tendenz in Richtung Nachhaltigkeit und Nutzung von Retrofittings erkennen. Obwohl bestimmte Bedingungen gegeben sein müssen, wie das Vorhandensein eines Mehrwerts für den Nachzurüstenden sowie ein angemessenes Preis-Leistungs-Verhältnis, und somit gängige Kriterien beim Produktkauf darstellen, ergeben sich zusätzliche Bedingungen, die insbesondere bei Retrofitting-Modulen eine wesentliche Rolle spielen. So nimmt der monetäre Wert sowie der persönliche Bezug zu einem nachzurüstenden Gerät eine relevante Position in Anbetracht des Retrofittings ein. Während für günstige Haushaltsgeräte ein Retrofitting-Ansatz sowohl aus ökonomischen als auch geplanten Obsoleszenz-Gründen keine Bedeutung hätte, könnte es den Wert eines Geräts nochmals steigern und gleichzeitig positive Effekte mit sich bringen. Durch einen möglichen modularen Aufbau könnten Geräte jederzeit durch verschiedene Module aufgerüstet werden. Jene Komponenten, die defekt

sind, können ausgetauscht werden und Komponenten, die in einem defekten Gerät verbaut sind, können als Ersatzteile für andere Geräte verwendet werden. Dies wiederum würde die Nachhaltigkeit steigern und einen signifikanten Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten. In der Praxis existieren Hersteller und Herstellerinnen sowie Business-Modelle, die mit solchen Ansätzen bereits erfolgreich sind. So bietet das Unternehmen Fairphone nachhaltig produzierte Smartphones mit modularem Aufbau an. Seit 2017 konnten die Verkaufszahlen verdreifacht werden [13], was den Erfolg dieses Konzepts deutlich widerspiegelt. Das modulare Notebook von Framework ist ein weiteres Beispiel für dieses Konzept und laut Stiftung Warentest auch nachhaltiger als andere Notebook-Hersteller und Notebook-Herstellerinnen [46]. Auch das Unternehmen Bugaboo setzt auf Modularität sowie Nachhaltigkeit und produziert Kinderwagen, die auf Langlebigkeit und Austauschbarkeit hin konzipiert sind. Geräte, die nicht nur einen gewissen funktionellen Zweck erfüllen, sondern Kunden und Kundinnen auch begeistern und das Gefühl vermitteln, etwas Besonderes erworben zu haben, binden den Kunden und die Kundin. Die Bindung an sich führt zu einem nachhaltigeren Verhalten, da einerseits vermieden wird, dass bestehende, lieb gewonnene Geräte durch neue ersetzt werden, und andererseits die Wahrscheinlichkeit und der Wunsch steigen, bei bestimmten fehlenden Funktionalitäten Retrofitting-Module zu nutzen [50]. Allerdings erfordert all dies, dass Originalhersteller und Originalherstellerinnen nicht nur wertige Geräte bereitstellen und geplante Obsoleszenz vermeiden, sondern auch die Möglichkeit anbieten, Nachrüstungen bereitzustellen, beispielsweise in Form einer passenden Schnittstelle. Sofern keine eigenen Nachrüstungsmodule bereitgestellt würden, könnten Originalhersteller und Originalherstellerinnen eigene Schnittstellen-Lizenzen an Dritte vergeben und so einen Markt für Retrofitting-Module durch Dritte schaffen. Daraus lässt sich schließen, dass Retrofitting-Module wie jenes, das in der vorliegenden Arbeit umgesetzt wurde, wesentlich und fortwährend zur Nachhaltigkeit beitragen können. Unter Beachtung der definierten Bedingungen und der Voraussetzung, dass Originalhersteller und Originalherstellerinnen die nötigen Ressourcen und Möglichkeiten freigeben, wird sich Retrofitting als starkes wirtschaftliches Paradigma etablieren. Allem voran ist die Akzeptanz vorhanden und sind die Vorteile des Retrofittings auch im Sinne der Nachhaltigkeit einem großen Personenkreis geläufig. Die Lesenden sollten beachten, dass diese Arbeit auf ein konkretes Retrofitting-Beispiel ausgelegt war und somit diverse hypothetische Annahmen im Zuge der Forschungsarbeit getroffen werden mussten. Da weder der Wunsch nach jener

Funktionalität bestand, die durch das Retrofitting-Modul bereitgestellt wurde, noch eine emotionale Bindung zum Testgerät existierte, wurden die teilnehmenden Testpersonen teilweise unter hypothetischen Annahmen befragt. Obwohl die Annahmen eine Grenze der Forschungsarbeit darstellen, da reale Situationen ein abweichendes Bild ergeben können, kann davon ausgegangen werden, dass unter hypothetischen Annahmen eine entscheidende Mehrheit den Retrofitting-Ansatz positiv einstufen und ihn nutzen würde.

In dieser Arbeit wurden ausgewählte Personengruppen zu Retrofitting- sowie Nachhaltigkeitsfragen befragt. Ein Teil davon wurde auch zur Nachrüstung eingeladen. In diesem Zusammenhang stellen die ausgewählten Personengruppen eine Grenze der vorliegenden Forschungsarbeit dar, indem das Forschungsergebnis nicht auf das Verhalten aller anderen schließen lässt. Daraus ergibt sich, dass Forschung zum behandelten Forschungsbereich mit äquivalenten Personengruppen aufgrund der ausreichend großen Stichprobe zu einem ähnlichen Ergebnis führen würde, aber bei abgewandelter Personengruppe möglicherweise andere Ergebnisse erhalten würden. Damit eine allgemeingültige und repräsentative Aussage getroffen werden kann, müsste eine geeignete Stichprobe mit möglichst diversen Personen- und Altersgruppen ausgewählt werden.

Es ist nicht Ziel dieser Arbeit gewesen, das Retrofitting als Nachhaltigkeitsmethode mit anderen Vorgehensweisen zu vergleichen. Als einzige Alternative zum Retrofitting wurde der Neukauf herangezogen, wobei keine Vor- und Nachteile im Detail erörtert wurden. Alternativen, wie der Vergleich mit dem Kauf gebrauchter Ware, wurden nicht betrachtet. Daher können sich auch Szenarien ergeben, bei denen sich Personen weder für ein Retrofitting-Modul noch für einen Neukauf entscheiden möchten. Allerdings wirkt sich dies auf die vorliegenden Forschungsergebnisse nicht aus, da es nicht Ziel war, die beste Vorgehensweise zu definieren, sondern das Retrofitting als alternative Nachhaltigkeitsmethode zu analysieren.

Abschließend lässt sich diese Arbeit mit anderen Arbeiten in Relation setzen. Der Fokus der vorliegenden Arbeit beruht auf drei Kernelementen: Nachhaltigkeit, Retrofitting und Haushaltsgeräte. Während bei der vorliegenden Arbeit der Retrofitting-Ansatz eine allgemeine Gültigkeit für unterschiedliche Haushaltsgeräte aufweist, behandeln beispielsweise die Arbeiten [3], [6], [26] oder [28] ausschließlich eine konkrete Retrofitting-Funktionalität für eine ausgewählte Modellgruppe an Kaffeemaschinen bzw. für ein bestimmtes Kaffeemaschinenmodell. Weitere Arbeiten wie [34], [7] oder [47] behandeln das Thema Retrofitting

geräteübergreifend, allerdings wird die Nachhaltigkeit nicht als zentraler Punkt thematisiert, sondern als Endprodukt bei der Durchführung eines Retrofittings angesehen. Zudem liegt der Schwerpunkt bei diesen Arbeiten auf der Umsetzung einer vordefinierten Funktionalität bzw. Technologie - wohingegen bei der vorliegenden Arbeit die Nachhaltigkeit gemeinsam mit dem Retrofitting sowie deren Zusammenwirken als leitende Elemente untersucht wurden. Ein weiterer wesentlicher Unterschied besteht darin, dass bei der vorliegenden Arbeit im Vergleich zu den genannten Arbeiten eine geringere Einstiegshürde bei der erneuten Durchführung von bestimmten Projektschritten besteht. Während bei den Arbeiten [6] oder [3] davon ausgegangen wird, dass der Leser oder die Leserin entsprechendes fachspezifisches Wissen aufweist, um die Schritte zu rekonstruieren, wird der Leser oder die Leserin bei der vorliegenden Arbeit mit fachspezifischem Basiswissen versorgt und Schritt für Schritt durch das Projekt geleitet. Ein weiterer Unterschied zu den ähnlichen Arbeiten [28], [26], [6] oder [40] ist, dass die vorliegende Arbeit als Ergebnis ein Artefakt in Form eines Templates liefert, um Retrofittings unabhängig von der Art des Haushaltgeräts sowie der Retrofitting-Funktionalität durchführen zu können. Anhand der autoethnografischen Fallstudie wurden sowohl anleitende Schritte dokumentiert als auch Alternativen sowie Best-Practices zur Verfügung gestellt. Ausgehend von den genannten Punkten kann angenommen werden, dass die vorliegende Arbeit innovativ ist und einen Mehrwert für die Wissenschaft darstellt.

Kapitel 9

Resümee

Als Ausgangspunkt galt es zu untersuchen, wie ein Reverse-Engineering-Prozess im Haushaltsbereich durch Neueinsteiger und Neueinsteigerinnen zielführend durchgeführt werden kann. Infolgedessen wurde ein Retrofitting-Ansatz für den Haushaltsbereich im Zuge eines Reverse-Engineering-Prozesses entwickelt. Das Ergebnis, ein IoT-Nachrüstsatz für eine Kaffeemaschine, wurde anschließend verwendet, um Nachhaltigkeitsaspekte zu untersuchen. Es wurde unter anderem analysiert, in welchem Ausmaß das Ergebnis eines Reverse-Engineering-Prozesses in Form eines Retrofitting-Moduls durch Benutzer und Benutzerinnen im Sinne der Nachhaltigkeit genutzt werden kann und inwiefern das Retrofitting im Haushaltsbereich zur Nachhaltigkeit beiträgt sowie, ob es eine akzeptable Alternative zu bewährten Methoden darstellt.

Mittels einer autoethnografischen Studie wurde anhand eines generischen Templates, das synchron zur Entwicklung eines Beispiels definiert wurde, ein Reverse-Engineering-Prozess durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Als Ergebnis stehen sowohl der dokumentierte Weg aus Sicht des Neueinsteigers als auch ein wiederverwendbares Artefakt und ein Prototyp für weitere Anwendungszwecke zur Verfügung. In weiterer Folge wurde der Reverse-Engineering-Prozess inklusive Prototyp vor einem Auditorium von über 100 Teilnehmern und Teilnehmerinnen präsentiert und anhand einer synchron durchgeführten Studie durch alle Anwesenden auf Retrofitting- und Nachhaltigkeitsaspekte hin evaluiert. Das Ergebnis der Studie illustriert, dass die Nutzung des Retrofitting-Moduls im Sinne der Nachhaltigkeit bereits von über 60 Prozent aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen befürwortet wird. Darüber hinaus würden sich über 80 Prozent der Teilnehmer und Teilnehmerinnen zutrauen, den Nachrüstsatz anzuwenden sowie den Nachrüstsatz möglicherweise als akzeptable Alternative zum Neukauf vorzuziehen. Abschließend wurde eine Beobachtung inklusive eines Interviews mit sechs Teilnehmern und Teilnehmerinnen durchgeführt. Hier wurde einerseits bewertet, ob ein Retrofitting-Modul durch Benutzer und Benutzerinnen selbstständig nachgerüstet werden kann und so zur Nachhaltigkeit beiträgt und andererseits wurden anhand der Interviews Meinungen dazu erfasst, ob das Retrofitting-Modul im

Sinne der Nachhaltigkeit genutzt werden kann und eine akzeptable Alternative zu bestehenden Möglichkeiten darstellt. Trotz geringfügiger Hürden konnten alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen den Nachrüstvorgang erfolgreich abschließen und die Funktionalitäten testen. Anhand der Interviews konnte festgestellt werden, dass der Nachrüstsatz unter bestimmten Bedingungen zur Nachhaltigkeit beiträgt. Zudem waren sich alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen einig, dass sich das Retrofitting im Haushaltsbereich als Nachhaltigkeitsmethode etablieren und so eine Alternative zum Neukauf darstellen kann. Die Zielsetzung der Masterarbeit wurde somit vollständig erreicht, indem ein Mixed-Methods-Ansatz eingesetzt wurde.

9.1 Ausblick

In Anbetracht der durchgeführten Untersuchungen und der Grenzen ergibt sich in vielerlei Hinsicht Forschungsbedarf. Im ersten Schritt könnte der Retrofitting-Ansatz anhand weiterer Beispiele erprobt werden. Damit kann einerseits auf Machbarkeit sowie Effektivität des Ansatzes hin getestet werden, andererseits können Aussagen zur allgemeinen Gültigkeit getätigt werden. Mögliche Schwachstellen, die bisher unentdeckt blieben, könnten identifiziert werden und zur Optimierung des Ansatzes beitragen. Darüber hinaus kann der Ansatz für fortgeschrittene Personen und Fachpersonen erweitert werden. Unter Einbindung weiterer Soft- und Hardwarekomponenten, beispielsweise in Form von Tests mit verschiedenen Mikrocontrollern können Vergleiche angestellt werden und so effiziente Settings für bestimmte Umsetzungen definiert werden. Infolgedessen könnten so relevante Schritte in Richtung einer Standardisierung vorgenommen werden. Im Anschluss an den Retrofitting-Ansatz können sich weitere Forschungsarbeiten auf technischer und wirtschaftlicher Ebenen ergeben. Auf technischer Ebene kann untersucht werden, wie und mit welchem Aufwand Retrofitting-Applikationen wie jene, die vorliegt, als Teil einer größeren Software integriert werden können, beispielsweise als Teil eines Smart-Home-Systems. Hier sollte einerseits die Machbarkeit beleuchtet werden, andererseits, wie effizient jene Schritte durchgeführt werden können, welcher Mehrwert für den Nutzer oder die Nutzerin entsteht und ob dieser Mehrwert optimiert werden kann. Weitere Untersuchungen können im wirtschaftlichen Bereich durchgeführt werden, hier insbesondere die Frage danach, wie vom aktuellen ökonomischen Modell auf nachhaltigere ökonomische Modelle übergegangen werden kann und welche Alternativen aus einer

Wegwerf-Gesellschaft führen können. Hierbei sollen jene Themen insbesondere in Kombination mit dem Retrofitting betrachtet werden, das als wesentlicher Teil dieser Transformation fungieren und einen bedeutenden Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten würde. Als Fallbeispiele könnten aktuelle Geschäftsmodelle herangezogen werden, die im Sinne eines nachhaltigeren ökonomischen Modells transformiert werden könnten. Es könnte ein Vergleich zwischen einem aktuellen Businessmodell und einem optimierten Businessmodell mit Retrofitting als wesentlichem Teil-Geschäftsbereich aufgestellt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Adtance: Is a Retrofit the Right Option?, <https://www.adtance.com/en/blog/2021/retrofit-digitization-sustainability-in-engineering>, Zugriffen am: 2021-11-14
- [2] Bergmann, Y., Leippert, M., Kuehnle, J., Kristan, J., Jeroschewski, S.E., Roemer, L., Knaus, P., Wogawa, A.: An IoT Solution for Condition Monitoring of a Lithography Coater Tool in a Semiconductor Fab. In: 2022 IEEE 5th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). pp. 01–06 (2022)
- [3] Burggräf, P., Wagner, J., Koke, B., Manoharan, K.: Sensor retrofit for a coffee machine as condition monitoring and predictive maintenance use case. In Proceedings of the Wirtschaftsinformatik p. 62–66 (2019)
- [4] Buresi, G., Ermini, S., Bernabini, D., Lorusso, M., Gelli, F., Frustace, D., Rizzo, A.: Smart Retrofitting by Design Thinking Applied to an Industry 4.0 Migration Process in a Steel Mill Plant. In: 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). pp. 1–6 (2020)
- [5] Business Upper Austria: Digital Retrofit Guide, https://www.biz-up.at/fileadmin/user_upload/Projektwebsites/digital-region/2020/Statische_Seiten/RZ_DigitalRetrofitGuide_2020_Web.pdf, Zugriffen am: 2021-11-12
- [6] Busse, L.: Implementierung eines Debit-Abrechnungssystems für Jura-Kaffeevollautomaten. Master’s thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München (2017)
- [7] Cho, H., Kim, H.J., Lee, J., Kim, C.M., Bae, J., Nam, T.J.: IoTIZER: A Versatile Mechanical Hijacking Device for Creating Internet of Old Things. In: Proceedings of the 2021 ACM Designing Interactive Systems Conference. p. 90–103 (2021)
- [8] Colordynetech: Top Five Reasons to Retrofit, <https://colordynetech.com/news-events/news/top-five-reasons-to-retrofit/>, Zugriffen am: 2021-11-14
- [9] De Schoenmakere, M., Gillabel, J.: Circular by Design. Products in the Circular Economy. European Environment Agency (6) (2017)
- [10] Ehrenfeld, J.R.: The Roots of Sustainability. MIT Sloan Management Review 46(2), 23 (2005)
- [11] Ermini, S., Bernabini, D., Buresi, G., Lorusso, M., Rizzo, A.: Human-Centered Retrofitting. In: Proceedings of the 32nd European Conference on Cognitive Ergonomics (2021)

- [12] Eurostat: Elektro- und elektronischrott in der eu: Zahlen und fakten (infografik), <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20201208ST093325/elektroschrott-in-der-eu-zahlen-und-fakten-infografik>, zugegriffen am: 2021-11-27
- [13] Fairphone Community: Fairphones sold 2013-2022, <https://forum.fairphone.com/t/fairphones-sold-2013-2022/63123>, Zugegriffen am: 2023-09-24
- [14] FindThisBest: Top 18 Best Logic Analyzers, <https://www.findthisbest.com/best-logic-analyzers>, Zugegriffen am: 2022-11-13
- [15] Guerreiro, B.V., Lins, R.G., Sun, J., Schmitt, R.: Definition of Smart Retrofitting: First Steps for a Company to Deploy Aspects of Industry 4.0. In: Advances in Manufacturing. pp. 161–170. Springer International Publishing (2018)
- [16] Harting: Digital Retrofit, The Key to Industry 4.0 Success?, <https://www.rs-online.com/designspark/digital-retorift-1>, Zugegriffen am: 2021-11-13
- [17] Hák, T., Janoušková, S., Moldan, B.: Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators. Ecological Indicators 60, 565–573 (2016)
- [18] Ilari, S., Carlo, F.D., Ciarapica, F.E., Bevilacqua, M.: Machine Tool Transition from Industry 3.0 to 4.0: A Comparison between Old Machine Retrofitting and the Purchase of New Machines from a Triple Bottom Line Perspective. Sustainability 13(18) (2021)
- [19] Informationstechnikzentrum Bund: V-Modell XT Bund, https://www.cio.bund.de/Webs/CIO/DE/digitaler-wandel/Achitekturen_und_Standards/V_modell_xt/V_modell_xt_bund/v_modell_xt_bund-node.html, Zugegriffen am: 2023-09-24
- [20] Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.A.: A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters 3, 18–23 (2015)
- [21] Lins, T., Oliveira, R.A.R.: Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0. Computers Industrial Engineering 139, 106193 (2020)
- [22] McMichael, A.J., Butler, C.D., Folke, C.: New Visions for Addressing Sustainability. Science 302(5652), 1919–1920 (2003)

- [23] Mensah, J.: Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Social Sciences* 5(1), 1653531 (2019)
- [24] Moore, J.E., Mascarenhas, A., Bain, J., Straus, S.E.: Developing a comprehensive definition of sustainability. *Implementation Science* 12(1), 1–8 (2017)
- [25] Muthuvel, P., Daniel, S.A., Yazhini, D.: Retrofitting domestic appliances for PV powered DC Nano-grid and its impact on net zero energy homes in rural India. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19(4), 1836–1844 (2016)
- [26] Ni, H.: Smart coffee maker. Bachelor’s thesis, Blekinge Institute of Technology (2017)
- [27] Oberle, M., Stöhr, M., Brandstetter, A., Gärtner, S.: Design and Development of a Cyber-Physical System E-Bike Retrofit Prototype. In: 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). pp. 1–8 (2022)
- [28] Off, F.: Reverse-engineering a De’Longhi Coffee Maker to precisely bill Coffee Consumption. Bachelor’s thesis, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (2018)
- [29] Ożadowicz, A., Grela, J., Wisniewski, L., Smok, K.: Application of the Internet of Things (IoT) Technology in Consumer Electronics - Case Study. In: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). vol. 1, pp. 1037–1042 (2018)
- [30] Paessler: IT Explained: Retrofitting, <https://www.paessler.com/it-explained/retrofitting>, Zugriffen am: 2021-11-13
- [31] Pavithra, D., Balakrishnan, R.: IoT based monitoring and control system for home automation. In: 2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT). pp. 169–173 (2015)
- [32] Pufé, I.: Nachhaltigkeit, vol. 3667. UTB GmbH (2017)
- [33] Purvis, B., Mao, Y., Robinson, D.: Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability science* 14(3), 681–695 (2019)
- [34] Ramakers, R., Anderson, F., Grossman, T., Fitzmaurice, G.: RetroFab: A Design Tool for Retrofitting Physical Interfaces using Actuators, Sensors and 3D Printing. In: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. p. 409–419 (2016)

- [35] Ratering, K.: Product optimization to increase consumer acceptance of refurbished domestic appliances. Master's thesis, Delft University of Technology (2020)
- [36] Ravi, D., Honnavalli, P.B., Vijay, C.N., R, C.B.: A System to Retrofit Existing Infrastructure to be Smart and IoT Ready. In: Proceedings of the 2020 4th International Conference on Vision, Image and Signal Processing. Association for Computing Machinery (2021)
- [37] Rollmann, S.A.: Entwicklung eines integrierten Frameworks für Industrie 4.0 Retrofit-Lösungen. Master's thesis, Technische Universität Wien (2020)
- [38] Saleae: Tech Specs, <https://www.saleae.com/>, Zugriffen am: 2022-11-13
- [39] Seibert Media: Qualität, funktionale und nichtfunktionale Anforderungen in der Software-Entwicklung, <https://blog.seibert-media.net/blog/2018/05/14/qualitaet-funktionale-und-nichtfunktionale-anforderungen-in-der-software-entwicklung/>, Zugriffen am: 2022-10-24
- [40] Sieck, J., Rohrer, M.: Bedienung und Verwaltung von Haushaltsgeräten mittels NFC am Beispiel eines Kaffeevollautomaten (2012), https://inka.htw-berlin.de/sieck/Stud_Projekte/rohrer_fp1.pdf, Zugriffen am: 2024-08-18
- [41] Sigrok: Logic analyzer comparison, https://sigrok.org/wiki/Logic_analyzer_comparison, Zugriffen am: 2022-11-13
- [42] Statista GmbH: Entwicklung der Weltbevölkerungszahl von Christi Geburt bis zum Jahr 2020 (in Milliarden), <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1694/umfrage/entwicklung-der-weltbevoelkerungszahl/>, Zugriffen am: 2021-11-27
- [43] Statista GmbH: Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung von 2010 bis 2100 (in Milliarden), <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1717/umfrage/prognose-zur-entwicklung-der-weltbevoelkerung/>, Zugriffen am: 2021-11-27
- [44] Statistik Austria: Monatliche Verbrauchsausgaben der privaten Haushalte - Hauptergebnisse der Konsumerhebung 2019/20, https://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_PDF_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=126015, Zugriffen am: 2021-11-27

- [45] Statistisches Bundesamt: Eu-weit 4 Millionen Tonnen Elektroschrott im Jahr, <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/Elektroschrott.html>, Zugriffen am: 2021-11-27
- [46] Stiftung Warentest / Ralph Kaiser: Framework-Laptop im Test - Nachhaltiger als andere, <https://www.test.de/Framework-Laptop-im-Test-Nachhaltiger-als-andere-5915596-0/>, zugriffen am: 2023-10-08
- [47] Stippich, A., Sewergin, A., Engelmann, G., Gottschlich, J., Neubert, M., van der Broeck, C., Schuelting, P., Goldbeck, R., De Doncker, R.: From Ac to Dc: Benefits in Household Appliances. In: International ETG Congress 2017. pp. 1–6 (2017)
- [48] Terzioğlu, N.G.: Extending the lifespan of small kitchen appliances for sustainable design: a research on product maintenance and repair with technical services in Ankara. Master's thesis, Middle East Technical University (2013)
- [49] Tran, T.A., Ruppert, T., Eigner, G., Abonyi, J.: Retrofitting-Based Development of Brownfield Industry 4.0 and Industry 5.0 Solutions. IEEE Access 10, 64348–64374 (2022)
- [50] Williams, K., Pulivarthy, R., Hudson, S.E., Hammer, J.: The Upcycled Home: Removing Barriers to Lightweight Modification of the Home's Everyday Objects. In: Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. p. 1–13 (2020)
- [51] WolleP: Delonghi Leistungsplatine 3560203119 Kabelanschlüsse und Bauteilübersicht, <http://www.forum-electromenager.com/depannage/schema-electrique-ecam22.110.pdf>, Zugriffen am: 2022-11-02
- [52] World Health Organization: Millennium Development Goals. Tech. rep., WHO Regional Office for South-East Asia (2004)