

Ökologie & Arbeit e.V., Karlsruhe
IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung

**Ökologische Optimierung
von Gebrauchsgerten**

**Entwicklung von technischen Lösungen zur
energieeffizienten Aufrüstung von
gebrauchten Waschmaschinen**

Siegfried Behrendt, Lorenz Erdmann, Otmar Baldas,
Prof. Dr. Klaus Wolfrum
unter Mitarbeit von
Prof. Dr. Jürgen Gentner und Lutz Stebis

Werkstattbericht Nr. 62

Abschlussbericht über ein Modellprojekt, gefördert unter dem
Az: 18405 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

in Kooperation mit
AEG Hausgeräte GmbH, Nürnberg
Fachhochschule Karlsruhe

Berlin, Januar 2004

ISBN 3-929173-62-X

© 2004 IZT

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

**(Werkstattberichte / IZT, Institut für Zukunftsstudien und
Technologiebewertung ; Nr. 62)**

ISBN 3-929173-62-X

© 2004 **IZT** by Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung – Berlin

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Printed in Germany

Abstract

The project investigates possibilities to reduce energy and water consumption of used washing machines. The idea behind is, that upgraded washing machines do not have inevitably environmental advantages compared to new washing machines, as the latter usually consume much less energy and resources in the use phase. Generally energy and resource consumption reducing innovations are only applied to new washing machines. However, used washing machines hold a high energy and resource saving potential. Therefore, in addition to the advantage of waste reduction by upgrading, the aim is to optimise consumption parameters for the second use phase.

Several upgrading measures were tested and their environmental and economic performances were analysed. It was tested

- the optimisation of the washing programme using a microcontroller,
- the installation of a jet-system and
- the installation of a warm water supply.

This pilot study has unveiled the following key findings:

- Upgrading with microcontroller and warm water supply reduce cumulated primary energy demand below the level of the new reference machine.
- Water consumption in the use phase can be reduced by the microcontroller, but not to the level of the new washing machine.
- The installation of a jet-system has a marginal impact on water consumption and doesn't lead to a reduction of electricity consumption as the additional pumps need energy themselves.

The pilot study demonstrated that energy efficiency of used washing machines can be improved by technical upgrading. The key measure to reduce electricity and water consumption is to install a microcontroller and to adjust it to the individual washing machine characteristics. A prototype demonstrates the technical feasibility of an energy efficient upgrading of used washing machines. For the microcontroller - as a substitute for a mechanical control unit - the patent No. 102 27 240.9-26 has been registered at the German Patent Office (Deutsches Patentamt).

Abstract

Das Projekt untersucht Möglichkeiten zur Senkung des Strom- und Wasserverbrauchs von gebrauchten Waschmaschinen. Hintergrund ist, dass aufgearbeitete Altgeräte nicht zwangsläufig umweltfreundlicher als Neugeräte sind, da diese meist erheblich weniger Energie und Ressourcen zum Betrieb benötigen als Altgeräte. Üblicherweise kommen solche Innovationen nur bei Neugeräten zur Anwendung. Gerade bei Gebrauchtgeräten ist jedoch ein besonders hohes Energie- und Ressourceneinsparpotential vorhanden. Ziel ist es, über den mit der Aufarbeitung von Waschmaschinen erzielten Vorteil der Abfallvermeidung hinaus, die Zweitnutzung auch unter Verbrauchsgesichtspunkten zu optimieren.

Es wurden verschiedene Maßnahmen einer Testreihe unterzogen und nach ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten analysiert. Geprüft wurde

- die Optimierung eines Waschprogramms mit einem Microcontroller,
- die Nachrüstung eines Jet-Systems und
- die Nachrüstung eines Warmwasserzulaufes.

Folgende Kernergebnisse können aus dem Modellprojekt abgeleitet werden:

- Microcontroller und Warmwasseranschluss führen zur Reduzierung des kumulierten Primärenergieaufwandes unter das Niveau der gemessenen Neumaschine.
- Der Wasserverbrauch in der Nutzungsphase kann durch Microcontroller deutlich reduziert werden, jedoch nicht bis auf das Niveau der getesteten Neumaschine.
- Der Einbau eines Jetsystems hat nur marginale Auswirkungen auf den Wasserverbrauch und führt zu keiner Ansenkung des Stromverbrauchs, da das Pumpsystem selbst Strom benötigt.

Das Modellprojekt konnte zeigen, dass durch verschiedene technische Maßnahmen gebrauchte Waschmaschinen energieeffizienter aufgearbeitet werden können. Die Senkung von Strom- und Wasserverbrauch ist primär durch den Einbau einer neuen und auf die Anforderungen gebrauchter Waschmaschinen angepassten Microcontroller-Steuerung möglich. Ein Prototyp demonstriert die technische Machbarkeit einer energieeffizienten Aufarbeitung von gebrauchten Waschmaschinen. Auf eine Microcontroller-Steuerung - als Ersatz für das mechanische Schaltwerk - wurde beim Deutschen Patentamt unter der Nr. 102 27 240.9-26 ein Patent angemeldet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
2	Aufarbeitungsvarianten	16
2.1	Ansätze.....	16
2.1.1	Mechanik	16
2.1.2	Zeit.....	17
2.1.3	Chemie / Biologie.....	17
2.1.4	Temperatur	17
2.1.5	Wasser	17
2.2	Waschtechnik.....	18
2.2.1	Programmablauf	18
2.2.2	Wasserstand	18
2.2.3	Erwärmung	18
2.3	Aufrüstungsoptionen.....	19
2.3.1	Mechanische Baugruppen	19
2.3.2	Hydraulische Komponenten	19
2.3.3	Thermische Isolierung	19
2.3.4	Warmwasserzulauf	20
2.3.5	Elektrische Änderungen	20
2.3.6	Programmtechnik.....	20
2.4	Umrüstungsvarianten.....	22
3	Testreihe	23
3.1	Übersicht Messreihen	23
3.2	Messaufbau	23
3.3	Messbedingungen	24
3.3.1	Wasserzulauftemperatur	25
3.3.2	Wäsche.....	25
3.3.3	Waschmittel.....	26
3.3.4	Testgewebe	27
3.4	Messergebnisse.....	27
3.4.1	Vergleichsmessung verschiedener Waschmaschinentypen.....	27

3.4.2	Parametergesteuerter Programmablauf mit SPS.....	28
3.4.3	Nachrüstung eines Jet-Systems	30
3.4.4	Veränderungen gegenüber dem Originalprogramm	31
3.4.5	Nachrüsten eines Warmwasserzulaufes	31
3.5	Funktions- und Sicherheitsaspekte	32
3.6	Waschergebnisse.....	33
3.7	Fazit.....	33
4	Abschätzung der ökologischen Effekte	35
4.1	Methode	35
4.2	Zieldefinition und Untersuchungsrahmen	35
4.3	Bilanzierung der neuen Referenzmaschine.....	37
4.3.1	Teilbilanz Produktion	37
4.3.2	Teilbilanz Nutzung	40
4.3.3	Teilbilanz Transport	41
4.3.4	Teilbilanz End of Life	41
4.3.5	Die neue Referenzmaschine im ökologischen Vergleich	42
4.4	Aufarbeitungsvarianten im ökologischen Vergleich	43
4.4.1	Kumulierter Primärenergieaufwand	43
4.4.2	Wasserverbrauch	46
4.4.3	Abfall	48
4.5	Fazit aus ökologischer Sicht	49
5	Kostenbetrachtungen	50
5.1	Kosten für herkömmliche Reparaturen	50
5.2	Kosten der Maßnahmen.....	51
5.3	Vergleich der Aufarbeitungsvarianten.....	52
5.4	Kosten unter optimierten Bedingungen	52
5.5	Kosten aus Kundensicht.....	53
5.6	Kosten und ökologischer Nutzen im Vergleich.....	57
6	Fazit	59

7	Literaturverzeichnis.....	63
8	Anhang.....	64
8.1	Zusammensetzung der Referenzmaschine	64
8.2	Fehlerrechnung.....	70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Vorgehensweise	14
Abbildung 2.1: Sinnerscher Kreis	16
Abbildung 2.2: Microcontroller.....	21
Abbildung 3.1: Messaufbau.....	24
Abbildung 3.2: Programmablaufsteuerung mit SPS oder Microcontroller	25
Abbildung 3.3: Originalprogramm AEG Lavamat 9720.....	29
Abbildung 3.4: Parametergesteuerter Programmablauf mit SPS ; Hauptwaschgang 21,9 l.....	29
Abbildung 3.5: Parametergesteuerter Programmablauf mit SPS ; Hauptwaschgang 16,7 l.....	30
Abbildung 3.6: Benötigte elektrische Energie bei Warmwasserzuführung	32
Abbildung 4.1: Sachlicher Bilanzraum bei der Ökobilanzierung von Waschmaschinen.....	36
Abbildung 4.2: Zusammensetzung der neuen Referenzmaschine nach Materialgruppen	38
Abbildung 4.3: Teilbilanz KEA der benötigten Materialien [GJ].....	39
Abbildung 4.4: Kumulierter Primärenergieaufwand der neuen Referenzmaschine im Vergleich.....	42
Abbildung 4.5: KEA der Aufarbeitungsvarianten im Vergleich.....	45
Abbildung 4.6: Sensitivität der Ergebnisse für KEA	46
Abbildung 4.7: Wasserverbrauch der Aufarbeitungsvarianten im Vergleich	47
Abbildung 5.1: Kosten der Aufarbeitungsvarianten.....	52
Abbildung 5.2: Aufarbeitungsvarianten bei Kostenoptimierung	53
Abbildung 5.3: Anschaffungspreis der aufgearbeiteten Maschinen.....	54
Abbildung 5.4: Jährliche Betriebskosten der aufgearbeiteten Maschinen	55
Abbildung 5.5: Lebenszykluskosten der aufgearbeiteten Maschinen im Vergleich	55
Abbildung 5.6: Szenarien für die Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Wäschezusammensetzung.....	26
Tabelle 3-2: Messergebnisse	28
Tabelle 3-3: Benötigte Energie bei Warmwasserzuführung	32
Tabelle 3-4: Strom- und Wasserverbrauch der untersuchten Maschinen.....	34
Tabelle 4-1: Annahmen für die Teilbilanz Transport der neuen Referenzmaschine.....	41
Tabelle 4-2: Daten zur Schätzung der eingesparten End-of-Life Abfallmenge durch Aufarbeitung	48
Tabelle 5-1: Durchschnittliche Reparaturkosten.....	51
Tabelle 5-2: Kosten der Aufarbeitungsmaßnahmen.....	51
Tabelle 5-3: Kostendifferenz und Primärenergieeinsparung der Aufarbeitungsvarianten gegenüber dem Referenzgerät.....	57
Tabelle 8-1: Zusammensetzung nach Grobfraktionen	64
Tabelle 8-2: Aufschlüsselung Metallfraktion.....	65
Tabelle 8-3: Aufschlüsselung Kunststofffraktion	65
Tabelle 8-4: Aufschlüsselung Schläuche und Dichtungen.....	66
Tabelle 8-5: Aufschlüsselung Elektronik und Schalter.....	67
Tabelle 8-6: Aufschlüsselung Pumpen.....	68
Tabelle 8-7: Aufschlüsselung Gehäuse	69
Tabelle 8-8: Aufschlüsselung Sonstiges.....	69

Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
BHKW	Blockheizkraftwerk
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DMM	Digitalmultimeter
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Monomer
HDPE	High Density Polyethylene
KEA	Kumulierter Primärenergieaufwand
µC	Microcontroller
NTC	Negative Temperature Coefficient
PA	Polyamid
PA-GF	Glasfaserverstärktes Polyamid
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PPT	Punched Paper Tape
RWD	Radial-Wellendichtung
SPS	Speicherprogrammierte Steuerung
TPE	Thermoplastisches Elastomer
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
WEEE	Directive on "Waste Electric and Electronic Equipment"

1 Einleitung

Jährlich werden in Deutschland über 250.000 Tonnen alte Waschmaschinen entsorgt. Aufgereiht entspricht dies einer Strecke von Dänemark bis nach Sizilien. Durch Aufarbeitung und Wiedervermarktung alter Waschmaschinen wird eine Zweitnutzung ermöglicht und somit Abfall vermieden. Im Produktlebenszyklus dieser Gerätegruppe entstehen die größten Umweltbelastungen aber in der Nutzungsphase, so dass eine Strategie der Nutzungsdauerverlängerung erst ökologisch optimal ist, wenn die Innovationsfortschritte beim Strom- und Wasserverbrauch von Neugeräten auch bei der Aufarbeitung von Altgeräten umgesetzt werden. Marktbeste Maschinen benötigen heute weniger als die Hälfte des Stroms von Waschmaschinen, die vor 10 Jahren verkauft wurden. Der Wasserverbrauch ging im gleichen Zeitraum von 100 Liter auf 50 Liter pro Kochwaschgang zurück. Altgeräte sind aufgrund dieser Entwicklungen deshalb nicht zwangsläufig umweltfreundlicher als Neugeräte. Gerade bei Gebrauchtgeräten ist jedoch ein besonders hohes Energie- und Ressourceneinsparpotenzial vorhanden.

Das Projekt zielt auf die Senkung des Strom- und Wasserverbrauchs von gebrauchten Waschmaschinen. Dazu sollten praktische Lösungen entwickelt werden, die technisch machbar, wirtschaftlich tragfähig und ökologisch sinnvoll sind.

Ziele

- Entwicklung technischer und wirtschaftlicher Lösungen zur Verbrauchsminderung von Gebrauchtgeräten,
- Entwicklung eines einfachen methodischen Verfahrens zur Bestimmung der optimalen ökologischen Lebensdauer von Vollwaschautomaten,
- Erschließung von ökologischen Entlastungspotenzialen durch Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen Nutzungsdauerverlängerung und technischen Fortschritten zur Effizienzsteigerung der Gerätenutzung,
- Aufschluss über Umweltentlastungspotentiale durch ökoeffiziente Aufarbeitung und Remarketing von gebrauchten Waschmaschinen verschiedener Gerätegenerationen,
- Verbesserung der wirtschaftlichen Bedingungen von sozial ausgerichteten Recyclingbetrieben durch Erschließung technischer Innovationspotenziale und neuer Kundensegmente.

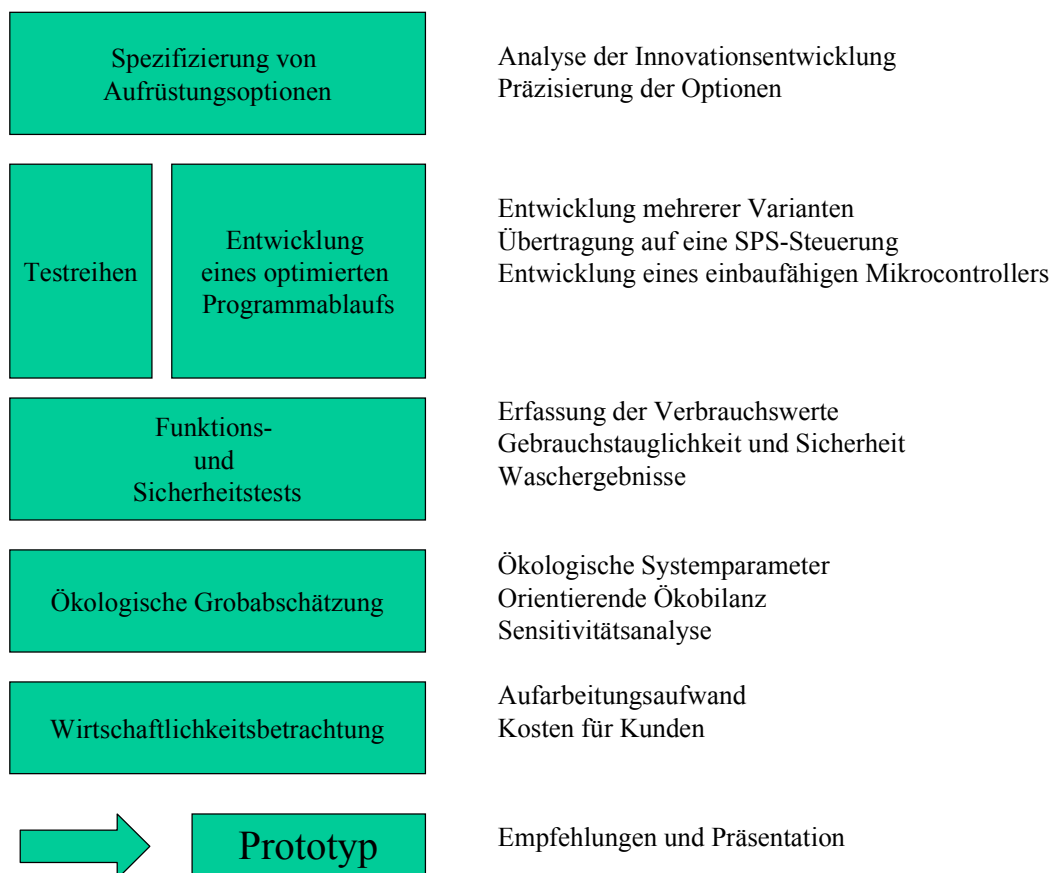
Die Durchführung des Modellprojekts basiert auf fünf Kernelementen:

- Erstens die Durchführung einer Testreihe und Entwicklung mehrerer Varianten in Abhängigkeit von Alter und Innovationsstufen eines Herstellers.
- Zweitens die Simulation eines Waschprogramms an einer Speicherprogrammierten Steuerung (SPS).

- Drittens die Entwicklung eines einbaufähigen Microcontrollers.
- Viertens die Analyse der ökologischen Effekte unter Life Cycle - Gesichtspunkten.
- Fünftens die Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte.

Die Vorgehensweise illustriert die folgende Abbildung:

Abbildung 1.1: Vorgehensweise



Die technischen Arbeiten wurden von Impuls Recycling durchgeführt. Darunter fällt auch die Demontage einer neuen Waschmaschine für die ökologische Grobabschätzung. Die Bauteile und Materialfraktionen sind detailliert im Anhang aufgeführt. Darüber hinaus wurde ein Video-Film über die Demontage zu Schulungszwecken erstellt. Die Konzipierung der Testreihe erfolgte in Kooperation mit der AEG Hausgeräte GmbH. Sie stellte auch Geräte zur Verfügung. Bezüglich des Microcontrollers wurde mit der Fachhochschule Karlsruhe zusammengearbeitet. Chemische Messungen im Zuge der Testreihe, z.B. von Waschmittlrückständen, konnten aufgrund fehlender technischer Voraussetzungen des Zentrallabors der Stadt Karlsruhe in der gewünschten Form nicht

vorgenommen werden. Das Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT hat das Projekt wissenschaftlich begleitet, um Aufschluss über die Umwelteffekte und Kosten der verschiedenen Maßnahmen zu erhalten.

2 Aufarbeitungsvarianten

2.1 Ansätze

Für den Waschvorgang entscheidend sind im wesentlichen die vier Einflussfaktoren, Mechanik, Zeit, Chemie/Biologie und Temperatur im Zusammenspiel mit Wasser. Dies wird am besten durch den Sinnerschen Kreis abgebildet.

Abbildung 2.1: Sinnerscher Kreis



Bei Änderungen eines der vier Faktoren müssen die übrigen Faktoren angepasst werden, damit ein vergleichbares Waschergebnis erzielt wird.

Die Bedeutung der Faktoren im einzelnen:

2.1.1 Mechanik

Die Waschmechanik entsteht durch die Bewegung der Wäsche. Sie ist nötig, um die Schmutzpartikel von der Faser zu trennen. Innerhalb der Waschmaschine sind für die Mechanik zwei Vorgänge entscheidend. Zum einen der Wasserstand, der die Fallhöhe der Wäsche bestimmt und der Waschrhythmus, der die Fallhäufigkeit bestimmt. Eine Reduzierung des Wasserstandes führt zwangsläufig zu einer höheren Fallhöhe und damit zu einer erhöhten Aufprallgeschwindigkeit der Wäsche auf die Wasseroberfläche. Dadurch wird die Beanspruchung der Wäsche erhöht, was bei strapazierfähigen Textilien erwünscht sein kann. Bei empfindlichen Textilien wird durch einen erhöhten Wasserstand eine schonendere Wäschebewegung angestrebt.

Eine zweite Einflussgröße ist die Drehzahl der Waschtrommel. Sie bestimmt mit der Anzahl der Umwerfer die Fallhäufigkeit. Es hat sich durch Versuche gezeigt, dass sich eine höhere Drehzahl positiv auf die Herauslösung der Schmutzpartikel auswirkt, während eine etwas geringere Drehzahl das Ausspülverhalten der Schmutzpartikel verbessert. Deshalb wird bei neuen Waschprogrammen zuerst mit einer etwas höheren Drehzahl der Schmutz herausgelöst und anschließend mit reduzierter Drehzahl ausgespült. Bei Wollwäsche wird auf eine Wäschebewegung weitgehend verzichtet. Bei Woll- und Feinwäsche wird grundsätzlich mit niedrigen Drehzahlen gearbeitet.

2.1.2 Zeit

Sowohl für die Waschbewegung als auch für das Einweichen wird Zeit benötigt. Eine Verlängerung der Waschzeit bringt in der Regel ein besseres Waschergebnis. Dem gegenüber steht der Wunsch des Nutzers nach einer möglichst geringen Waschzeit. In der Regel hat sich im Haushalt eine Washdauer von ca. zwei Stunden für Kochwäsche eingependelt. Besser wären zeitvariable Programme, die den individuellen Nutzerwunsch stärker berücksichtigen können.

2.1.3 Chemie / Biologie

Chemische und biologische Prozesse beim Waschen werden durch eine Mischung von speziellen Tensiden und Enzymen sowie einer Reihe von Zusatzstoffen für spezielle Aufgaben hervorgerufen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Waschmittelzugabe nach Herstellerangabe dosiert und über den gesamten Versuchszeitraum nicht verändert.

2.1.4 Temperatur

Für die Entfaltung der Waschaktivität ist eine gewisse Mindesttemperatur notwendig. Neuere Waschmittel benötigen in der Regel geringere Temperaturen. Zur Lösung von Eiweißverbindungen werden Enzyme dem Waschmittel zugefügt. Enzyme arbeiten nur bis ca. 40°C, weshalb in den Waschprogrammen die Temperatur in der Aufheizphase auf ca. 40°C begrenzt wird. Erst im Anschluss daran wird auf die Endtemperatur aufgeheizt, die dann über die restliche Waschzeit beibehalten wird.

2.1.5 Wasser

Das Wasser hat im Waschprozess die Aufgabe, die Schmutzpartikel zu lösen und aus dem Gewebe herauszuschwemmen. Man unterscheidet im allgemeinen zwischen der gebundenen und der freien Waschflotte. Die gebundene Waschflotte ist das Wasser mit Waschmittel, das im Gewebe gebunden ist. Die freie Waschflotte ist der Teil des Wassers (inkl. Waschmittel), der darüber hinaus vorhanden ist. 5 Kg Trockenwäsche können

über 12 l Wasser binden, so dass bei 16 l Wassermenge die freie Waschflotte ca. 4 l beträgt.

2.2 Waschtechnik

2.2.1 Programmablauf

In Waschvollautomaten sind spezielle Waschprogramme für den Ablauf der einzelnen Phasen verantwortlich. Es wird der Wasserzu- und -ablauf, die Bewegung der Waschtrommel und die Heizung gesteuert.

Die Waschprogramme sind einem steten Wandel unterzogen und berücksichtigen sowohl geändertes Nutzungsverhalten als auch Verbesserungen in der Waschchemie und der Waschtechnik. Bis vor wenigen Jahren wurden die Programmabläufe durch elektromechanische Programmschaltwerke gesteuert. Über eine Reihe von Steuerscheiben, die durch einen oder mehrere Synchronmotore weiterbewegt werden, werden die einzelnen Aggregate angesteuert. Änderungsoptionen werden durch schaltbare Überfahrstrecken realisiert.

Dieses Verfahren wird bis heute bei vielen Waschmaschinen der unteren Preisklasse eingesetzt. Die Programmschaltwerke werden in der Regel für ein bestimmtes Modell oder eine Modellreihe entwickelt oder modifiziert. Nachträgliche Änderungen der Programmparameter sind in der Regel nicht möglich. Programmschaltwerke von hochwertigen, komfortablen Waschmaschinen sind sehr aufwendig und dadurch sehr teuer. Die Ersatzteilbeschaffung verursacht Kosten bis zu 200 Euro.

2.2.2 Wasserstand

Der Wasserstand und eine annähernd konstante freie Waschflotte hat sowohl für die Behandlung der Wäsche als auch für den Wasserverbrauch eine zentrale Bedeutung. Ziel ist es, einen beladungsabhängigen Wasserzulauf zu erzielen.

2.2.3 Erwärmung

Die Erwärmung der Waschflotte hat einen hohen Anteil am Gesamtenergieverbrauch. Maßnahmen sollen den Energieverbrauch senken ohne die Waschwirkung zu verschlechtern. Eine optionale Einspeisung von Warmwasser zur Einsparung elektrischer Energie ist daher wünschenswert. Im Regelfall wird eine elektrische Heizung eingesetzt, die wesentlich ineffizienter ist als die zentrale Wassererwärmung durch Gas oder Öl.

2.3 Aufrüstungsoptionen

2.3.1 Mechanische Baugruppen

Mechanische Änderungen an der Trommel oder dem Laugenbehälter sind einerseits sehr wirksam, andererseits mit sehr hohen Kosten verbunden, so dass diese Option bei der Umrüstung von Altgeräten in der Regel nicht vertretbar ist.

2.3.2 Hydraulische Komponenten

Der Wasserstand wird in der Regel durch sogenannte Niveauschalter bestimmt. Diese Schalter reagieren auf den Druck der Wassersäule und verfügen über mehrere Bereiche (2-3 Niveaus) mit einer vorgegebenen Hysterese. Sie steuern in der Regel direkt den Wassereinlauf. Die Höhe des Wasserstands lässt sich konventionell durch den Austausch entsprechender Niveauschalter beeinflussen. Gemeinsam mit dem Programmschaltwerk kann durch wiederholtes Öffnen der Einlaufventile ein beladungsabhängiger Wasserzulauf und somit eine Reduzierung der Wassermenge realisiert werden.

Durch den Einbau eines analogen Drucksensors kann der Wasserstand kontinuierlich den Waschbedürfnissen angepasst werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Wasserspiegel stets die Heizung überdecken muss. Diese Option wird in Verbindung mit dem Einbau einer Microcontroller-Steuerung kostenmäßig interessant.

Die Wasserzuführung kann baulich mit vertretbarem Aufwand geändert werden.

Ein Teil des Zulaufwassers kann direkt der Wäsche zugegeben werden. Ein zusätzliches Sprühsystem kann zur besseren Durchfeuchtung der Wäsche bei minimaler freier Waschflotte führen. Durch den Einbau eines kompletten Jet-Systems, bestehend aus Umwälzpumpe, Ablaufpumpe und Heizung, kann der Wasserstand weiter gesenkt werden.

2.3.3 Thermische Isolierung

Um die Energieeinsparungseffekte von Isoliermaßnahmen abzuschätzen wurden die Energieverluste durch Abstrahlung und Konvektion ermittelt.

Es stellte sich heraus, dass selbst bei hohen Waschttemperaturen nur in einem relativ geringen Zeitbereich signifikante Wärmeverluste auftreten. Ursache dafür ist, dass der Laugenbehälter durch eine breite Luftschicht sehr gut isoliert ist und keine größeren Wärmebrücken vorhanden sind. Auch die Abstrahlung an der Glasscheibe ist im Vergleich zur gesamten Heizleistung gering.

2.3.4 Warmwasserzulauf

Um Aufheizenergie zu senken, wurde die Möglichkeiten geprüft, die Maschine mit bereits vorgewärmtem Wasser aus dem Leitungsnetz zu speisen. Geräte mit Warmwasseranschluss sind bei einzelnen Herstellern bereits im Programm. Ebenso werden Zusatzgeräte angeboten, die außerhalb des Gerätes das Wasser auf die benötigte Temperatur vormischen. Ein Problem dabei ist, dass in der Enzymphase (bei enzymhaltigen Waschmitteln) die Temperatur max. 40°C betragen darf. Auf eine elektrische Heizung kann daher nicht vollständig verzichtet werden.

2.3.5 Elektrische Änderungen

Eine Änderung der elektrischen Antriebskomponenten ist aufgrund des geringen zu erwartenden Einsparpotenzials bei gleichzeitig hohen Kosten nicht erfolgversprechend.

2.3.6 Programmtechnik

Die Programmsteuerung ist für den Energieverbrauch von großer Bedeutung. In das Programm fließen die Waschdauer, die Anzahl der Wasch- und Spülgänge, das Aufheizverhalten, der Wasserstand sowie nutzungsspezifische Einstellungen ein. Programmänderungen sind in einem konventionellen Programmschaltwerk in der Regel nicht. Deshalb wurden innerhalb dieser Machbarkeitsstudie Wege gesucht bestehende Waschmaschinen mit einem neuen Programm auszurüsten. Daher liegt es nahe, die Steuerung wie bei neuen Geräten der höheren Preislage üblich, mit einem Microcontroller auszurüsten.

Abbildung 2.2: Microcontroller

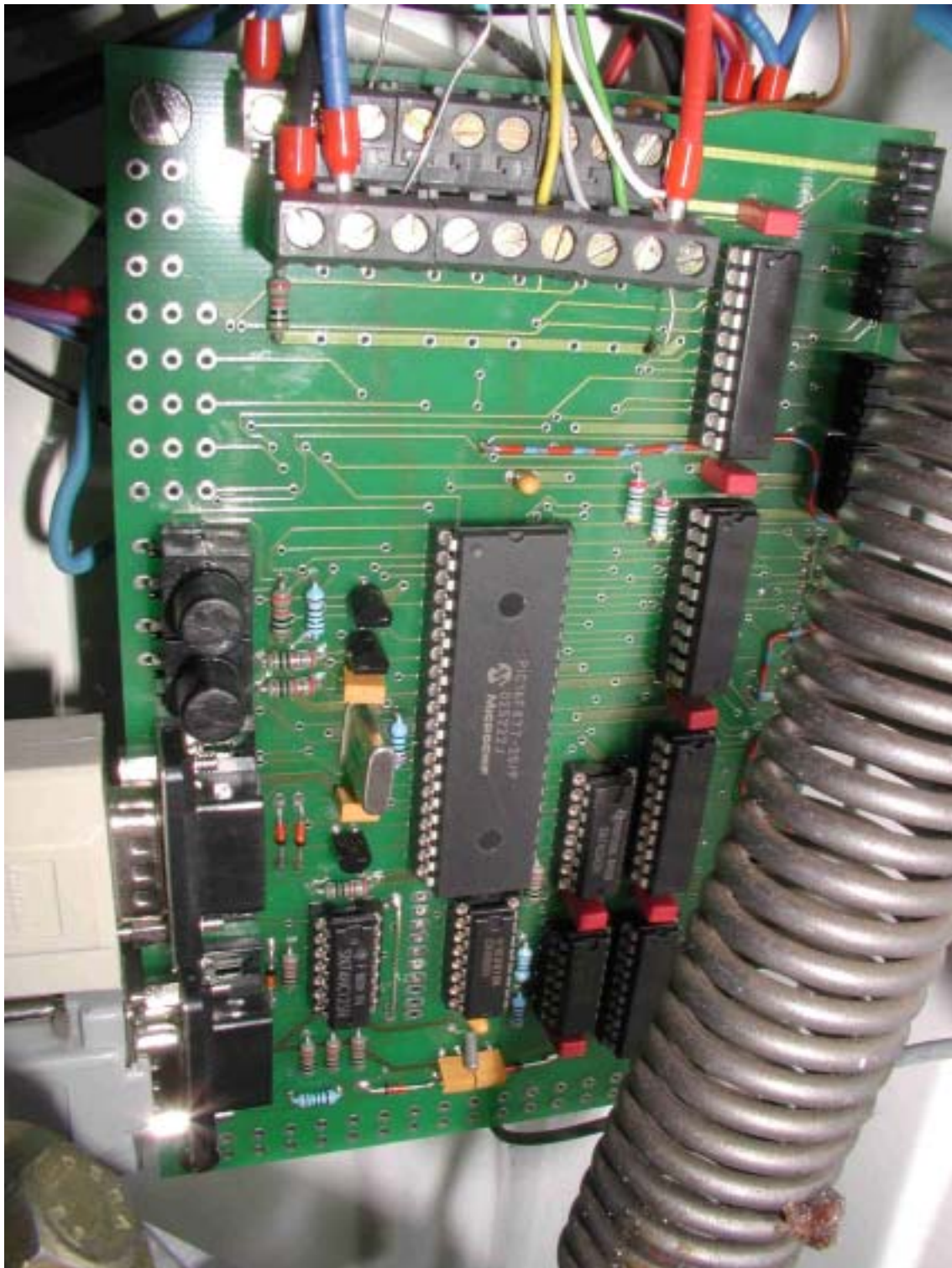


Foto: Wolfrum 2003

Um die Umbaukosten so gering wie möglich zu halten, war das Entwicklungsziel ein steckerkompatibler Baustein, der wie ein Original-Ersatzteil in eine bestehende Waschmaschine eingebaut werden kann. An die Stelle der mechanischen Wasserstandsgeber tritt ein analoger Drucksensor. Im wesentlichen wurden drei Umbauvarianten untersucht.

2.4 Umrüstungsvarianten

Aufbauend auf den untersuchten Aufrüstungsoptionen haben sich folgende Varianten aus technisch-ökonomisch erfolgversprechend herauskristallisiert:

- Optimierung eines Waschprogramms mit einem Microcontroller
- Nachrüstung eines Jet-Systems
- Nachrüstung eines Warmwasserzulaufes

Die Optimierung des Waschprogramms mit einem Microcontroller kann optional mit Jet-System und/oder Warmwasserzulauf kombiniert werden.

3 Testreihe

3.1 Übersicht Messreihen

In mehreren Messreihen wurden die verschiedenen Geräten mit folgenden Schwerpunkten untersucht.

1. Messreihe 1 diente zur Auswahl der möglichen Optimierungsvarianten bei AEG-Geräten.
2. Messreihe 2 untersuchte die neu entwickelte Microcontroller-Steuerung und verschiedene Nachrüstungsvarianten.

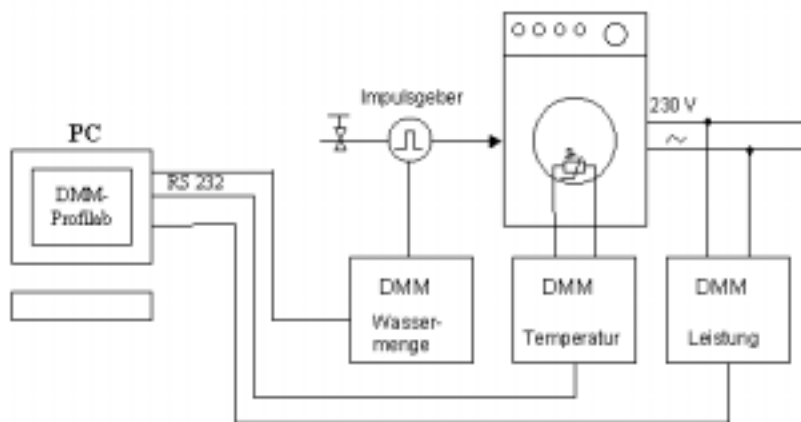
Alle Messungen wurden in den Waschprogrammen Koch-Buntwäsche bei 30, 60 und 95 Grad durchgeführt.

Um vergleichbare Verbrauchswerte der verschiedenen Geräte zu erhalten wurden alle Geräte unter gleichen Bedingungen getestet. Dabei wurde der akkumulierte Wasserverbrauch, die aufgenommene elektrische Leistung und der Temperaturverlauf dargestellt. Die benötigte Gesamtenergie wurde durch Integration der Leistung über der Zeit errechnet.

3.2 Messaufbau

Das Blockschaltbild des Messaufbaus ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Ein Durchflussmesser nach dem Flügelradprinzip gibt entsprechend der von der Waschmaschine aufgenommenen Wassermenge Impulse ab, die in einem Impulszähler (Digitalmultimeter DMM mit Zählerfunktion) gezählt werden. Zur Überwachung der Wassertemperatur dient ein NTC-Thermistor, der in der Nähe des Heizelements im Laugenbehälter zusätzlich eingebaut wurde. Der Widerstand des Thermistors wird mit einem DMM gemessen. Die von der Waschmaschine aufgenommene elektrische Leistung wird mit einem DMM mit Wirkleistungsmodus gemessen. Alle DMM sind über jeweils eine serielle Schnittstelle (RS 232) mit einem PC verbunden, wo die Messdaten mit der Software DMM-Profilab erfasst und abgespeichert werden. Die Abtastrate beträgt 2 Messungen pro Sekunde.

Bei einer Maschine (Referenzmaschine AEG Lavamat 9720) wurde zusätzlich ein analoger Drucksensor eingebaut, um den Wasserstand unabhängig von den serienmäßig vorhandenen Druckmessdosen messen zu können.

Abbildung 3.1: Messaufbau

Quelle: eigene Darstellung

Aufstellung der verwendeten Komponenten:

- Digitalmultimeter Metex, Typ M-3850M mit Software DMM-ProfiLab
- Durchflussmesser B.I.O- TECH, Serie DFM- Messing, Artikel- Nr.150175
- Thermistor Epcos Typ B57863-S863/10k
- Drucksensor Motorola, Typ MPXV 5004 G

3.3 Messbedingungen

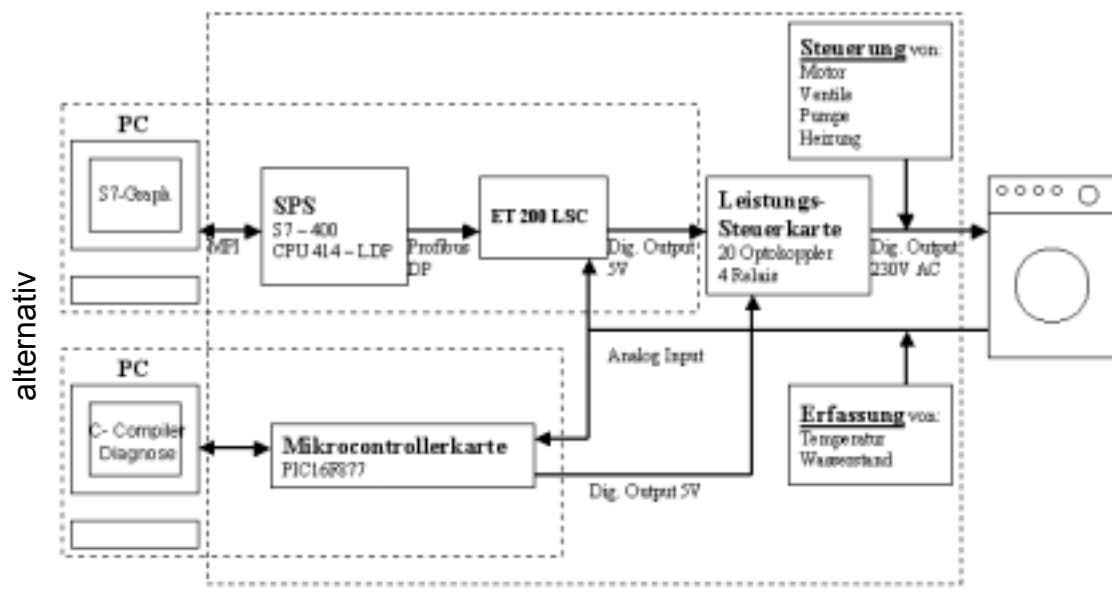
Die Messungen an den Waschmaschinen wurden im Originalzustand bei jeweils gleicher Wäschebelastung durchgeführt, um vergleichbare Werte zu erhalten. Bei der ausgewählten Referenzmaschine AEG Lavamat 9270 wurden im Anschluss an die Messungen im Originalzustand Messungen mit modifiziertem Programmablauf durchgeführt. Dazu wurde das Programmschaltwerk stillgelegt und über eine eigens entwickelte Leistungssteuerkarte eine Schnittstelle geschaffen, über die wahlweise eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) oder ein Microcontroller angeschlossen werden kann.

Die modifizierte Ablaufsteuerung wurde zunächst als Zustandsautomat entworfen und mit einer - aus der Automatisierungstechnik bekannten - grafischen Programmiersprache „Sequential Function Chart“ (DIN EN 6 1131-3) programmiert und simuliert. Als Testumgebung zur Verifikation dient eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) S7-400 (Fa. Siemens) mit entsprechender Hardwareschnittstelle zur Waschmaschine und den Programmpaketen S7-Graph, PLC-SIM, S7-Manager (Abb. 4-2). Nach erfolg-

reichem Test wurde der Programmablauf in die Programmiersprache C übersetzt und in den verwendeten Microcontroller PIC16F877 (Fa. Microchip) implementiert.

Soweit möglich, erfolgten die Messungen unter gleichen Bedingungen. Falls Parameter nicht beeinflussbar waren (z. B. Wasserzulauftemperatur), erfolgte eine Umrechnung der Messergebnisse auf Standardbedingungen.

Abbildung 3.2: Programmablaufsteuerung mit SPS oder Microcontroller



3.3.1 Wasserzulauftemperatur

Die Zulauftemperatur des Wassers ist ein wichtiger Faktor im Gesamtenergieverbrauch der Maschine. Bei den Messungen variierte die Temperatur zwischen 13 °C und 21,3 °C. Um die Energiemessergebnisse unserer Messreihen vergleichen zu können wurden darum alle Werte auf 15 °C normiert und entsprechend ihren Abweichungen von der Normtemperatur korrigiert.

3.3.2 Wäsche

Die Messungen wurden mit der vom Hersteller vorgegebenen Nennfüllmenge von 5 kg durchgeführt. Die Referenzwäsche hat in Anlehnung an die Norm IEC 60 456 dabei folgende Zusammensetzung:

Tabelle 3-1: Wäschezusammensetzung

Material	Gewicht /g
Hemden	930
Handtücher	1010
Jeans	880
Unterwäsche	400
Baumwoll T- Shirts	850
Wollhemden	430
Sweatshirts	500

Um die Messungen zu beschleunigen, wurden zwei Wäschefüllungen mit annähernd gleicher Zusammensetzung zusammengestellt, die im weiteren die Bezeichnungen A und B bekamen.

Nach jedem Waschgang wurde die Wäsche mit Hilfe eines Wäschetrockners (Stufe „extra Trocken“) getrocknet und vor Verwendung für die nächste Messung wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Der Gewichtsverlust der Wäsche im Wäschetrockner wurde durch regelmäßiges Wiegen kontrolliert und falls notwendig durch Nachfüllen von Wäschestücken die Sollmenge von 5 kg mit einer maximalen Toleranz von +/- 50 g wiederhergestellt.

3.3.3 Waschmittel

Aus Kostengründen wurde auf die Verwendung eines Spezialwaschmittels nach IEC 60 456 verzichtet. Da die Waschergebnisse unter realistischen Bedingungen verglichen werden sollten, wurde ein handelsübliches Waschmittel verwendet (Hersteller Erdal, Typ Frosch Color). Dem Härtegrad des Wassers entsprechend (Wasserhärte 24 im Stadtgebiet Karlsruhe) wurden pro Waschgang 100 ml zugegeben.

3.3.4 Testgewebe

Als Indikator für die Waschqualität wurden angeschmutzte Testgewebe mit einer Größe von 5 x 5 cm² bei jedem Waschgang verwendet.

Hersteller: wfk Testgewebe GmbH

Typ: Baumwolle

Order Code	Name	Anschmutzung
16053	90 RM	Ruß, Mineralöl
16063	90 PB	Blut, gealtert

Für die Messungen wurden die Teststreifen in eine Hemdtasche gegeben, weil sie sich sonst im Türgummi absetzen und so kein realistisches Waschergebnis liefern.

3.4 Messergebnisse

3.4.1 Vergleichsmessung verschiedener Waschmaschinentypen

Um Vergleichswerte zu erhalten, wurden Wasser-, Temperatur- und Energieverbrauchswerte von Waschmaschinen der Firmen AEG (Messreihe 1) aufgenommen. Die Altersspanne reichte dabei von aktuellen Modellen bis zu 20 Jahre alten Maschinen.

Bei den Messungen zeigte sich, dass sich der Wasserverbrauch in dieser Zeitspanne halbiert hat, von etwa 130 Liter auf 65 Liter. Die Einsparung im Hauptwaschgang beträgt aber lediglich 5 Liter. Der Rest wurde in den Spülgängen eingespart. Der Energieverbrauch wurde im gleichen Zeitraum um ein Drittel gesenkt, von ca. 1,8 kWh auf ca. 1,2 kWh.

Die Wasserersparnis ist hauptsächlich auf die Weiterentwicklung der Trommel- und Laugenbehältergeometrie, dem Einsatz von Jet-Systemen, Microcontrollern für eine intelligente Wassereinlaufsteuerung und den Wegfall des vierten bzw. fünften Spülganges zurückzuführen.

Als Ergebnis der Vergleichsmessungen zeigte sich zum einen, dass die Energieeinsparpotenziale von neueren Gebrauchsmaschinen (ca. 5 Jahre alt) relativ gering sind, zum anderen ist zu vermuten, dass bei älteren Gebrauchsmaschinen (älter als 10 Jahre) sich eine öko-effiziente Aufarbeitung aufgrund der geringen Restlaufzeit nicht ökonomisch darstellen lässt. Für eine öko-effiziente Aufarbeitung sind daher vor allem 7-10 Jahre alte Gebrauchsmaschinen geeignet. Als Referenzmaschine wurde für

alte Gebrauchsmaschinen geeignet. Als Referenzmaschine wurde für die weitere Untersuchung das Modell AEG Lavamat 9270 (10 Jahre alt) gewählt.

3.4.2 Parametergesteuerter Programmablauf mit SPS

Bei der Referenzmaschine AEG Lavamat 9720 wurde der im Programmschaltwerk implementierte Programmablauf mit dem SPS-Programm nachgebildet (vgl. Abbildung 3.3). Zur ökologischen Optimierung wurde zunächst der Wasserstand schrittweise reduziert, wobei die Waschqualität durch Mitwaschen der Testgewebe überprüft wurde. Um die Messergebnisse miteinander vergleichen zu können wurden die Energiewerte auf 15 °C (Einlauftemperatur) und 58 °C (Waschtemperatur) normiert. Ausserdem kam es zu Verbrauchsunterschieden durch unterschiedliche Schleuderdrehzahlen bzw. Ausfall eines Schleuderganges. Deswegen wurde zusätzlich auch noch W_{Gesamt} auf einen gemeinsamen Energiewert für das Schleudern normiert.

Die nach der Normierung erhaltenen Energiewerte stimmen mit den erwarteten Werten überein. Die maximale Energieersparnis durch das Absenken des Wasserstandes im Hauptwaschgang beträgt etwa 0,25 kWh pro Waschgang.

Auch der gesamte Wasserverbrauch konnte gegenüber dem Originalprogramm um bis zu 30 Liter reduziert werden. Die Einsparung hatte keinen sichtbaren negativen Einfluss auf die Waschqualität. Ob beim Spülen auch alle Waschmittelrückstände entfernt wurden, konnte nicht festgestellt werden.

Tabelle 3-2: Messergebnisse

Programm	Wasser /l	Wasser gesamt/l	W _{Hauptwaschgang} /kWh (bei ϑ inref = 15 °C) (bei ϑ maxref = 58 °C)	W _{Schleudern} /kWh	W _{Gesamt} /kWh gleiches Schleudern (0,35 kWh)
Originalprogramm	21,5	107,5	1,21	0,17	1,59
Parametergesteuert	21,9	99,7	1,26	0,26	1,65
Parametergesteuert	16,7	77,2	0,98	0,19	1,36
Jet - System Parametergesteuert	20,1	81,3	1,30	0,27	1,72
Jet - System Parametergesteuert	14,6	76,7	0,88	0,22	1,28
Messunsicherheiten	(+/- 0,4 - 0,7)	(+/- 2,3 - 3,2)	(+/- 0,07 - 0,11)	(+/- 0,01 - 0,02)	(+/- 0,09 - 0,12)

Quelle: eigene Erhebungen

Abbildung 3.3: Originalprogramm AEG Lavamat 9720

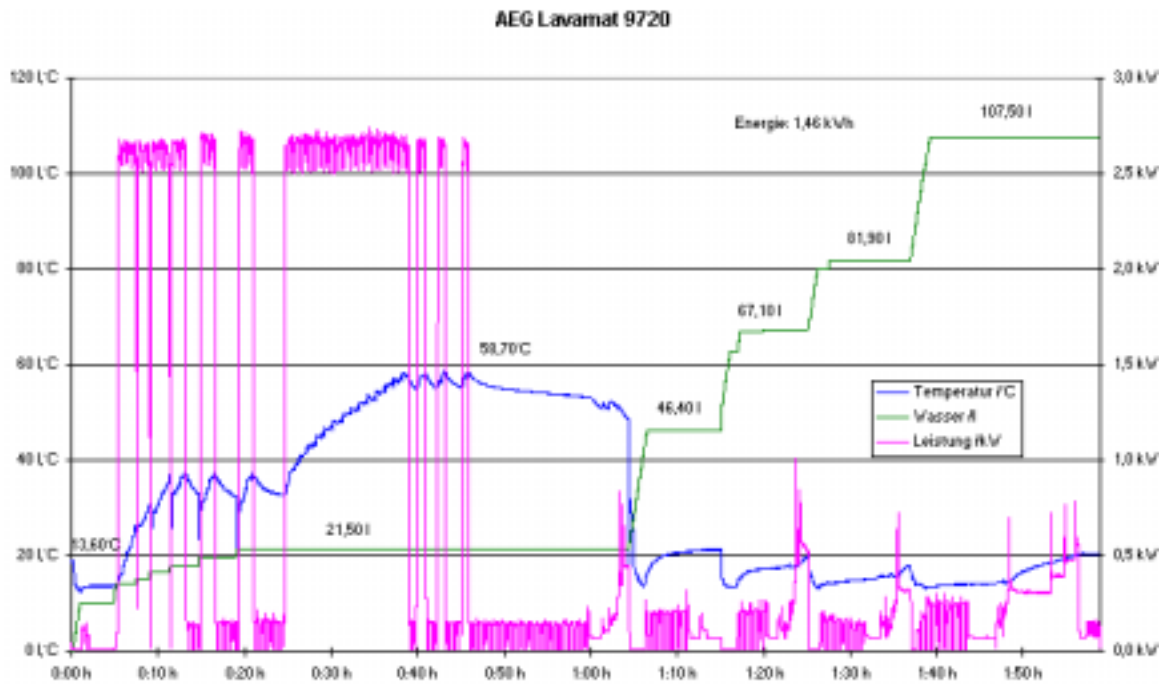
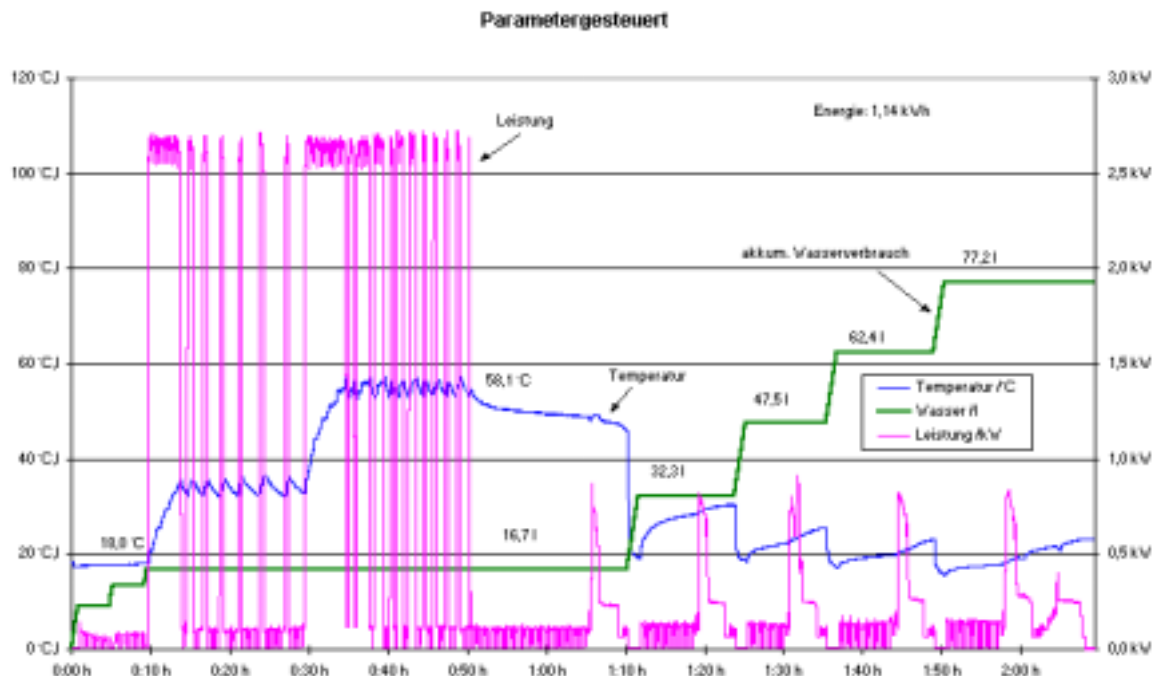


Abbildung 3.4: Parametergesteuerter Programmablauf mit SPS ;
Hauptwaschgang 21,9 l



Quelle: eigene Erhebungen

**Abbildung 3.5: Parametergesteuerter Programmablauf mit SPS ;
Hauptwaschgang 16,7 l**



Quelle: eigene Erhebungen

3.4.3 Nachrüstung eines Jet-Systems

Bei dem Jet- System handelt es sich um eine Umwälzpumpe, die das Wasser von oben auf die Wäsche gibt. Dadurch wird es möglich, den Wasserstand bei gleicher Wäschedurchfeuchtung zu senken und Energie bei der Aufheizphase einzusparen.

Da durch die Absenkung des Wasserstandes meist der vorhandene Heizstab der Waschmaschine freigelegt wird, ist der Einbau eines kompletten Jet- Systems notwendig. Dieses beinhaltet neben der Umwälzpumpe eine Heizung und eine Ablaufpumpe. Der Umbau der Maschine ist dabei mit einem erheblichen Arbeitsaufwand verbunden.

Der niedrigste noch zu vertretende Wasserstand im Hauptwaschgang, der ohne Jet- System erreicht wurde, lag bei 16,7 Liter. Mit Jet- System lag er nur um 2 Liter darunter. Das geringe Reduktionspotenzial lässt sich durch die Saugfähigkeit der Wäsche erklären. 5 kg Wäsche können bis zu 12,5 Liter Wasser aufsaugen. Wenn man jetzt davon ausgeht, dass zum Waschen eine freie Waschflotte von 2 Litern gebraucht wird, liegt der niedrigste zu erreichende Wasserverbrauch im Hauptwaschgang zwischen 14 und 15 Litern.

Wenn man den Gesamtenergieverbrauch der Messungen vergleicht (Tabelle 4-2, Spalte 5) stellt man fest, dass es zu keiner Energieersparnis gegenüber den Messungen ohne

Jet- System kommt. Bei 2 Liter Wasserersparnis im Hauptwaschgang erwartet man eigentlich bei einer Temperaturdifferenz von 43 K eine Energieersparnis von 0,1 kWh. Diese Einsparung wird jedoch durch den zusätzlichen Energieverbrauch der Umwälzpumpe wieder aufgebraucht. Ein Grund dafür liegt sicherlich darin, dass der Wasserverbrauch auch ohne Jet- System schon deutlich gesenkt werden konnte. Ob dies bei allen Waschmaschinentypen möglich ist, konnte hier nicht festgestellt werden. Außerdem wurde ein altes Jet- System verwendet, das nach Angaben von AEG deutlich mehr Energie verwendet als modernere Systeme.

3.4.4 Veränderungen gegenüber dem Originalprogramm

Der Wasserzulauf von Waschmaschinen arbeitet normalerweise mit einer Hysterese. Das Zulaufventil wird automatisch solange geöffnet bis ein vorgegebener Höchstwert erreicht ist. Senkt sich danach der Wasserstand z.B. durch Aufsaugen der Wäsche so wird erst nach Unterschreiten eines Tiefstwertes das Zulaufventil wiederholt geöffnet. Die Differenz der beiden Schaltschwellen wird als Hysterese bezeichnet. Dieser Vorgang findet auch bei bewegter Trommel statt. Wie die Messungen mit dem analogen Drucksensor zeigten, schwankten die Werte durch die Bewegung der Waschlauge dabei aber erheblich (+/- 2 Liter), weshalb der Wasserzufluss ausschließlich bei stehender Trommel vorgenommen wurde. Ebenso muss sichergestellt werden, dass der Wasser einlauf im Spülwaschgang erst bei vollständigem Auslauf der Trommel nach dem Zwischenschleudern erfolgt.

3.4.5 Nachrüsten eines Warmwasserzulaufes

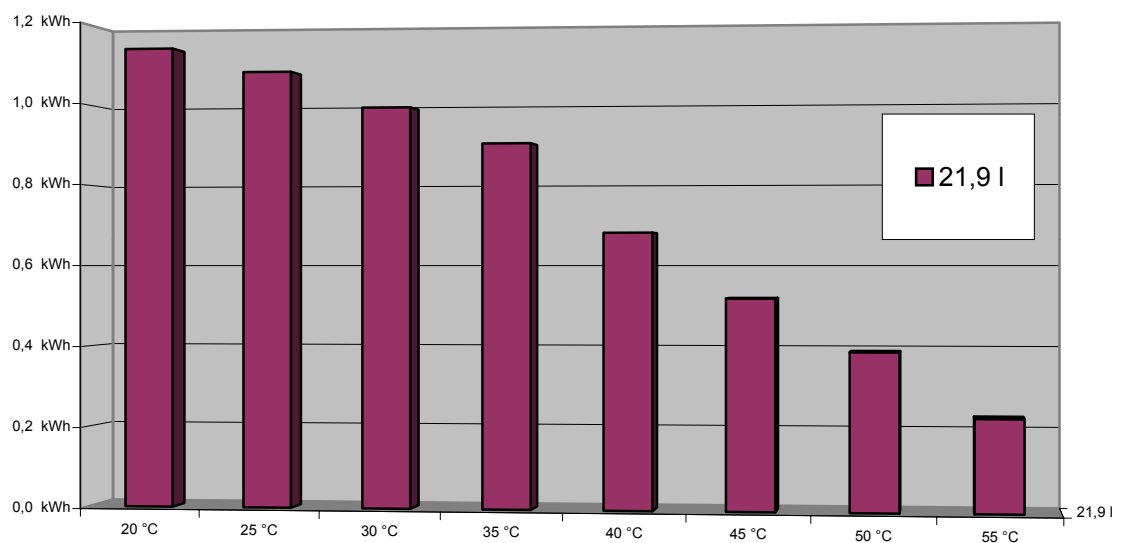
Die Energieersparnis durch einen Warmwasserzulauf lässt sich rechnerisch ermitteln. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Zulauftemperatur des Leitungswassers bei 55°C liegt. Für die Berechnung wird der Zeitpunkt im Waschprogramm gesucht, bei dem zum ersten Mal diese Temperatur erreicht wird. Danach wird die benötigte Energie für den Rest des Waschgangs berechnet. Beim Warmwasserzulauf fällt der Aufheizevorgang des Wassers großteils weg. Bei konstant eingehaltener Washdauer (Einweichzeit) ist das mittlere Temperaturniveau höher als beim Aufheizen in der Maschine. Der daraus resultierende Wärmeverlust wird in der nachfolgenden Tabelle entsprechend berücksichtigt.

Tabelle 3-3: Benötigte Energie bei Warmwasserzuführung

Dauer Hauptwaschgang:	40 min
Temperaturpunkt erreicht:	43 min
Ende Hauptwaschgang:	50 min
Benötigte Restenergie:	0,14 kWh
Verlustleistung für 33 min:	$0,165 \text{ kW} * 33 \text{ min} / 60 = 0,09 \text{ kWh}$
Benötigte Energie bei 55°C:	$0,14 \text{ kWh} + 0,09 \text{ kWh} = 0,23 \text{ kWh}$

Quelle: eigene Primärdaten und Berechnungen

Durch die Tabelle wird deutlich, dass der Stromverbrauch im Hauptwaschgang erheblich gesenkt werden kann.

Abbildung 3.6: Benötigte elektrische Energie bei Warmwasserzuführung

Quelle: eigene Primärdaten und Berechnungen

3.5 Funktions- und Sicherheitsaspekte

Die Aufarbeitungsmaßnahmen berühren Sicherheits- und Funktionsaspekte. Um die Eingriffstiefe zu minimieren, wurden im derzeitigen Entwicklungsstand die Funktionen des Microcontrollers dem Originalwaschprogramm nachgebildet. Ein Prüfprogramm

gemäß VDE 100 ist für Gebrauchsmaschinen wirtschaftlich generell nicht darstellbar, weshalb sich bei Eingriffen die Problematik der Produkthaftung stellt. Abweichungen ergeben sich in folgenden Punkten:

- Der Wasserstand wird mit einem analogen Füllstandssensor überwacht. Über das Saugverhalten der Wäsche zwischen dem 2. und 3. Nachtanken kann die optimale Höhe des Wasserstandes ermittelt werden.
- Auch für die Temperaturregelung wird ein analoge Sensor verwendet. Die Solltemperatur kann damit wesentlich genauer eingehalten werden als mit einem herkömmlichen Thermostat.
- Das Heizelement wird bei Unterschreiten eines bestimmten minimalen Wasserstands durch den bisherigen Niveauschalter geschützt und zusätzlich per Software abgeschaltet.
- Ebenso beginnt die Schleuderphase erst nach hinreichend langer Abpumpphase und nach Erreichen eines bestimmten minimalen Wasserstands. Auch hier kann gegebenenfalls der softwaremäßige Schutz durch einen Hardwareschutz ergänzt werden.

Für die nutzungsspezifischen Einstellungen und die Programmwahl ist die weitestgehende Beibehaltung der Originalbedienelemente vorgesehen, wobei die Stellung vorhandener Drehschalter z. B. durch einen nachzurüstenden magnetischen Winkelgeber abgefragt werden kann. Die Verriegelung der Tür bei eingelaufenem Wasser erfolgt wie beim Originalwaschprogramm.

3.6 Waschergebnisse

Die Waschergebnisse der Messreihen mit unterschiedlichem Wasserstand wurden durch Mitwaschen definiert verschmutzter Teststreifen bewertet. Aus Kostengründen musste auf die objektivere Reflexionsmessung laut IEC 60 456 verzichtet werden. Die Bewertung der Waschergebnisse erfolgte durch visuellen Vergleich der Teststreifen. Dabei waren keine signifikanten Unterschiede festzustellen.

3.7 Fazit

Ziel der energieeffizienten Aufarbeitung ist es, den Zielkonflikt zwischen Abfall und Energieverbrauch bzw. Wasserverbrauch zu entschärfen. Folgende Tabelle fasst die Verbrauchswerte der untersuchten Varianten, ermittelt aus den Messwerten in Tabelle 3.2 zusammen:

Tabelle 3-4: Strom- und Wasserverbrauch der untersuchten Maschinen

Untersuchte Maschine	Wasser [l]	Strom [kWh]
Neue Referenzmaschine (Sigma 9140)	62,4	1,40
Alte Referenzmaschine (AEG Lavamat 9270)	107,5	1,59
1. μ C	77,2	1,36
2. Jetsystem, μ C	76,7	1,32
3. Warmwasserzulauf, μ C	77,2	0,68
4. Warmwasserzulauf, Jetsystem, μ C	76,7	0,75

Quelle: eigene Messungen

Obige Übersicht zeigt die bereits mit dem Microcontroller optimierten Varianten. Die Varianten 3 und 4 sind aus den Varianten 1 und 2 anhand der Messprotokolle graphisch und rechnerisch ermittelt worden. Bei den Varianten 3 und 4 ist der externe Warmwasserbedarf in Höhe von 16,7 l bzw. 15 l zu veranschlagen (oben inbegriffen).

Angesichts der Messungenauigkeiten (vgl. Tabelle 3- und Kapitel 8.2 Fehlerrechnung im Anhang) sind die Unterschiede zwischen Variante 1 und 2 bzw. 3 und 4 beim Strom- und Wasserverbrauch zu vernachlässigen. Dies bedeutet auch, dass das Jetsystem sich nicht als geeignete Aufarbeitungsvariante erwiesen hat.

Alle Varianten konkurrieren mit der alten, nicht verbrauchsoptimierten Referenzmaschine. Die Varianten 1 und 2 konkurrieren zudem mit einer neuen Waschmaschine mit Kaltwasserzulauf, wohingegen die Varianten 3 und 4 mit einer neuen Maschine mit Warmwasserzulauf konkurrieren. Eine solche wurde allerdings nicht gemessen.

Die Testreihe hat deutlich gemacht, dass bestimmte Nachrüstungen machbar sind und bei geeigneter Wahl der Waschparameter zu einer Verringerung des Energie und Wasserverbrauchs führen.

4 Abschätzung der ökologischen Effekte

4.1 Methode

Die Abschätzung der ökologischen Effekte der Aufarbeitung von gebrauchten Waschmaschinen orientiert sich an der Methodik der Ökobilanzierung.

Ökobilanzen zum Thema Waschen sind im deutschsprachigen Raum rar gesät. Hervorzuheben ist insbesondere eine orientierende Ökobilanz des Öko-Instituts [Öko96], in der das Waschen im Haushalt der Nutzung einer halbgewerblichen Maschine gegenüber gestellt wurde. Das schweizerische Bundesamt für Wald, Umwelt und Landwirtschaft hat die Umweltauswirkungen der Regenwassereinspeisung in die Waschmaschine untersucht [Buw02], wobei auf Sachbilanzdaten für Waschmittel vom Öko-Institut zurückgegriffen wurde.

Wesentliche Ergebnisse dieser Ökobilanzen sind:

- Die Umweltauswirkungen können ausreichend richtungssicher mit Hilfe von Screening-Parametern abgeschätzt werden.
- Kumulierter Primärenergieaufwand und Wasserverbrauch werden von der Nutzungsphase dominiert. Dem Nutzer fällt auch in Bezug auf die End-of-Life Abfallmenge eine Schlüsselrolle zu.

Zwar liegen keine aktuellen belastbaren Ökobilanzen zum Thema Waschen vor, an den obigen Tendenzaussagen hat sich jedoch nichts grundlegend geändert. Zu den wesentlichen Bestandteilen der orientierenden Ökobilanz in dieser Arbeit gehören die Zieldefinition und der Untersuchungsrahmen (inkl. des sachlichen Bilanzraums), die Wirkungsabschätzung (vereinfachte Indikatoren) und die Bewertung der Ergebnisse.

4.2 Zieldefinition und Untersuchungsrahmen

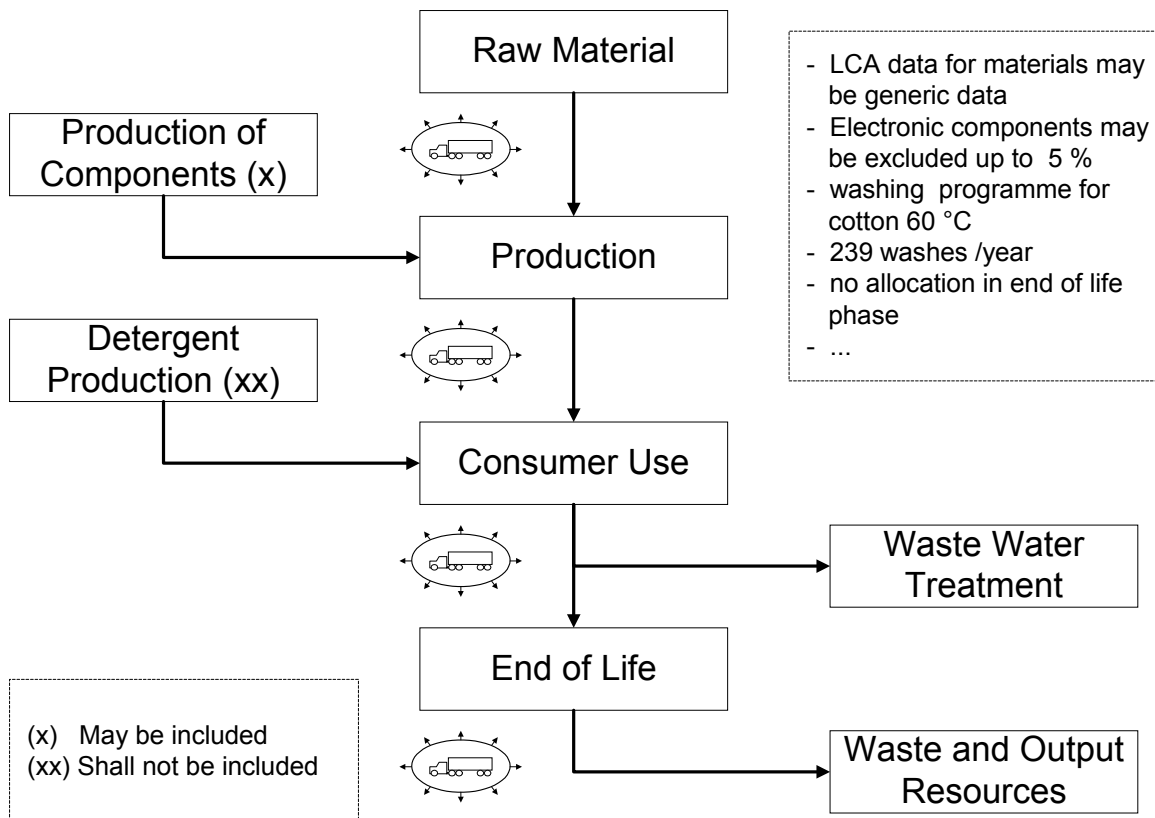
Das Ziel dieses Arbeitsschrittes ist die orientierende ökologische Bewertung ökonomisch realisierbarer und ökologisch erfolgversprechender Aufarbeitungsvarianten.

Folgende Maschinen sind in die Untersuchung einbezogen worden:

- Neue Referenzmaschine: Matura Sigma 9140 Stand der Technik
- Alte Referenzmaschine: Lavamat 9270
- Variante 1: Einbau eines Microcontrollers
- Variante 2: Einbau eines Jetsystems und Microcontrollers
- Variante 3: Einbau eines Warmwasserventils und Microcontrollers
- Variante 4: Einbau eines Warmwasserventils, Jetsystems und Microcontrollers

Nach Maßgabe des Swedish Environmental Management Council [Psr01] sollte der sachliche Bilanzraum bei der Klassifizierung von Neumaschinen wie folgt festgelegt werden:

Abbildung 4.1: Sachlicher Bilanzraum bei der Ökobilanzierung von Waschmaschinen



Quelle: [Psr01]

Für die weitere Untersuchung ist eine Konzentration auf den Hauptlebensweg über die Rohmaterialien, die Produktion, die Nutzung und die Entsorgung ausreichend:

- Die Waschmittelproduktion wird nicht berücksichtigt, da die Messreihen für die Maschinen einheitlich mit 100 ml Vollwaschmittel erfolgten.
- Über die Herstellung von Komponenten liegen nur unzureichende Informationen vor. Zudem ist die Fertigungstiefe der Hersteller verschieden und einem Wandel unterworfen.
- Die Bilanzierung der Abwasserbehandlung ist nur bei der Untersuchung bestimmter Umweltindikatoren, wie z.B. des CSB angemessen. Da die Wasser-

parameter jedoch stark von der hier konstanten Waschmittelmenge abhängen, wird auf sie verzichtet.

- Bei energieintensiven Prozessen, wie dem Waschen, werden Wirkungen wie Human- und Ökotoxizität zwar durch die Umweltbelastungen der Energiebereitstellung angenähert, die Datenbasis ist jedoch nicht geeignet, Wirkungen wie Human- und Ökotoxizität abzubilden.

Folgende Leitindikatoren für die Umwelteffekte werden berechnet:

- kumulierter Primärenergieaufwand
- Wasserverbrauch in der Nutzungsphase
- Abfallmenge (End-of-Life)

Zusätzlich sind zur Berechnung des kumulierten Primärenergieaufwandes die Vorketten für die Stromerzeugung und Warmwasserbereitstellung bilanziert worden. Angesichts der zeitlichen Dynamik infolge der in der Nutzungsphase anfallenden Umweltbelastungen wird beim kumulierten Primärenergieaufwand auf das Konzept des ökologischen Break Even Punktes zurückgegriffen.

Während die Nutzungsphase nach standardisierten Bedingungen abgebildet werden kann [Psr01], wird eine grobe Abschätzung der Module Rohmaterialien, Produktion, Transport und End-of-Life als ausreichend erachtet. Die Berechnungen fußen insbesondere auf der Datenbank Probas (2003) des Umweltbundesamtes, in der validierte Ökobilanzdaten des Umweltbundesamtes, des Öko-Instituts und der ETH Zürich zusammengestellt und aufbereitet sind. Für die einzelnen Teilbilanzen werden weitere spezifische Quellen und Annahmen herangezogen, die im folgenden ausgewiesen werden.

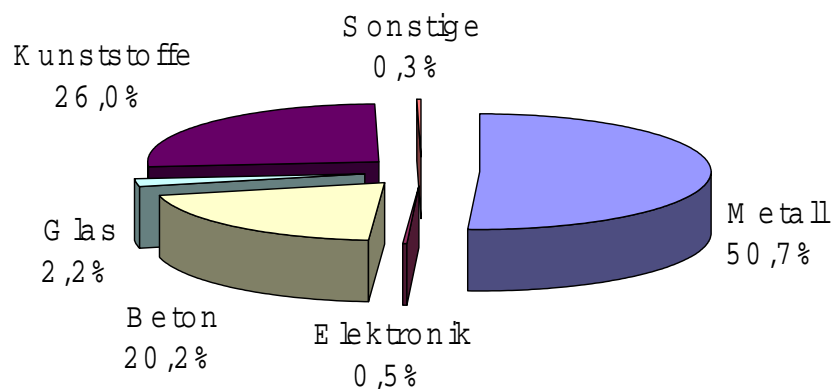
4.3 Bilanzierung der neuen Referenzmaschine

Die Bilanzierung der neuen Referenzmaschine erfolgt in vier Teilschritten. Anschließend werden die Ergebnisse mit der vom Öko-Institut bilanzierten Haushaltsmaschine verglichen.

4.3.1 Teilbilanz Produktion

Zur Bestimmung des kumulierten Primärenergieaufwandes ist zunächst die Neumaschine zerlegt worden. Die einzelnen Teile wurden gewogen und ihr Material nach Kennzeichnung, Augenschein oder Erfahrung des Demontagepersonals eingestuft (siehe Anhang).

Abbildung 4.2: Zusammensetzung der neuen Referenzmaschine nach Materialgruppen



Quelle: eigene Primärdaten und Berechnungen

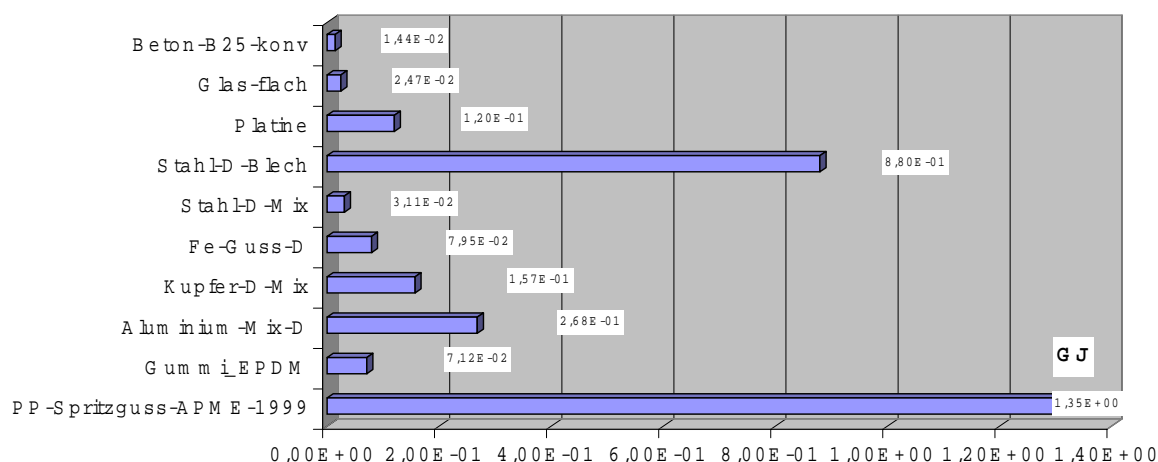
Die neue Referenzmaschine wiegt insgesamt 76,1 kg. Im Vergleich zur 80 kg schweren vom Öko-Institut bilanzierten Maschine enthält die neue Referenzmaschine weniger Metall, dafür mehr Kunststoffe. Die Glas- und Betonanteile haben sich nur geringfügig geändert. Da es auch aktuelle Waschmaschinen mit über 80 % Metallgehalt gibt (z.B. der Firma Miele) scheint dies weniger eine Frage des Alters als des Herstellers und Modells zu sein [Mie00].

Bei der Ökobilanz des Öko-Instituts sind die Materialaufwendungen der Herstellung pauschal mit einem Faktor 2 abgeschätzt worden. Belastbare, öffentlich verfügbare Daten liegen nicht vor. Der Materialaufwand für die Herstellung unterscheidet sich je nach Waschmaschinentyp, Fertigungstiefe, Materialaufwand und Recycling von Produktionsabfällen. Ein genauere Blick in den Miele Umweltbericht des Werkes Gütersloh (Miele 2000) lässt den Wert des Öko-Instituts als deutlich zu hoch erscheinen. In diesem Werk werden neben Waschmaschinen auch Trockner und Bauteile hergestellt. In einer worst case Betrachtung werden alle Materialverbräuche der Waschmaschine zugeschlagen. Der Faktor für den Materialaufwand ergibt sich näherungsweise als Quotient von Materialmenge im Produkt und der spezifischen Abfallmenge durch Materialmenge im Produkt. Die Werte für die einzelnen Stofffraktionen liegen bei 1,05-1,2; bei Metallen bei 1,1-1,2.

- In einer worst case Betrachtung wird der Materialaufwand aus der zerlegten Referenzmaschine vereinfacht mit dem Faktor 1,2 abgeschätzt.
- Für die Herstellung wird ein KEA von 0,9 GJ/Maschine veranschlagt, wobei die Vorketten der Endenergieträger Strom (Gas-Kraftwerk) und Wärme (Heizöl) einbezogen wurden.

Für die Teilbilanz KEA der Materialien ergibt sich folgendes Bild:

Abbildung 4.3: Teilbilanz KEA der benötigten Materialien [GJ]



Quelle: eigene Primärdaten und Berechnungen mit Probas-Datenbank [Pro03], [IZT98] für Platine

Insgesamt werden für die Materialien etwa 3 GJ Primärenergie benötigt. Auf Kunststoffe entfallen rund 45 % des KEA, auf Metalle etwa 30 %. Beton spielt im Gegensatz zum Gewichtsanteil keine Rolle. Bei den hohen Werten für Kunststoffe ist zu berücksichtigen, dass ihr Energiegehalt durch Verbrennung teilweise wiedergewonnen werden könnte (vgl. Teilbilanz End of Life).

Es musste auf vergleichsweise alte generische Daten zurückgegriffen werden. Zum Teil sind keine Daten vorhanden, so dass sie mit ähnlichen Materialien angenähert wurden. Bei der optischen Bestimmung von Legierungen ist man zudem auf den Erfahrungsschatz des Demontagepersonals angewiesen. Unsicherheiten rühren auch von fehlender Kennzeichnung der Kunststoffe her. Als PP-Spritzguss (KEA = 60 MJ/kg) wurden 11,5 kg eindeutig identifiziert und weitere nicht eindeutig zuordnungsfähige 7,08 kg Kunststoff bilanziert. Berechnet man die nicht identifizierten Kunststoffe als HDPE (KEA =

15 MJ/kg), so reduziert sich der kumulierte Primärenergieaufwand auf 2,6 GJ/Maschine.

Für die ausgesuchten Indikatoren ergeben sich folgende Werte bezogen auf eine Maschine:

- KEA(Material) = 2,6-3 GJ
- KEA(Fertigung) = 0,9 GJ

Vereinfacht wird im folgenden mit 3,9 GJ für die Herstellung einer Waschmaschine weiter gerechnet.

4.3.2 Teilbilanz Nutzung

Zur Bestimmung der Umweltbelastungen in der Nutzungsphase müssen die Strom- und Wasserverbrauchswerte sowie die Nutzungshäufigkeit und –dauer bestimmt werden.

- Die Messungen von Strom- und Wasserverbrauch von Waschmaschinen sind bei 60°C im Koch-Buntwaschgang vorzunehmen [Psr01]. Die Messungen wurden mit 5 kg Beladung vorgenommen.
- Pro Jahr sind 239 Waschgänge angesetzt, die vereinfacht auf 240 Waschgänge pro Jahr aufgerundet werden.
- Gemäß Elektrolux [Ele95] liegt die Nutzungsdauer von Waschmaschinen –je nach Produkt und Land- zwischen 9,4 und 10,9 Jahren. Im folgenden werden 10 Jahre Nutzungsdauer als typischer Wert weiter verwendet.

Die neue Referenzmaschine wurde zu 1,4 kWh gemessen, woraus sich unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Niederspannungsnetzes für Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland mit 36,6 % [Pro03] ein kumulierter Primärenergieaufwand von 33,0 GJ über 10 Jahre ergibt.

Dieser Wert ist im Vergleich zu den standardisierten Angaben einer Waschmaschine der Energieeffizienzklasse A sehr hoch. Für letztere darf der Stromverbrauch bei höchstens 0,19 kWh/kg Wäsche, bei 5 kg Wäsche also 0,85 kWh/Waschgang liegen. Entsprechend ergäbe sich ein kumulierter Primärenergieaufwand von 20 GJ in 10 Jahren. Allerdings sind diese Werte aufgrund unterschiedlicher Messbedingungen nicht direkt miteinander vergleichbar.

Der Wasserverbrauch ist mit 62,4 Litern gemessen worden, was über sich über 10 Jahre bei 240 Waschgängen pro Jahr auf knapp 150 Kubikmetern akkumuliert. Allerdings gibt es bereits neue Waschmaschinen, für die mit einem Wasserverbrauch unter 40 l/Waschgang geworben wird. Wie beim Stromverbrauch gilt auch hier, dass diese Zah-

len aufgrund unterschiedlicher Messbedingungen nur bedingt miteinander vergleichbar sind.

Bei diesen Betrachtungen bleibt zunächst unberücksichtigt, dass sich die Anzeichen verdichten, dass die Lebensdauern von Waschmaschinen in den letzten Jahren vor allem im wachsenden Billigsegment deutlich sinken.

4.3.3 Teilbilanz Transport

Die Teilbilanz Transport wird in Anlehnung an die Annahmen des Öko-Instituts [Öko96] mit Hilfe der Probas-Daten berechnet. Berücksichtigt werden sowohl die Distribution der Waschmaschine als auch die Rückführungslogistik. Folgende Annahmen liegen zugrunde:

Tabelle 4-1: Annahmen für die Teilbilanz Transport der neuen Referenzmaschine

Verkehrsmittel	Distributions-strecke [km]	Rückführungs- strecke [km]
Güterzug elektrisch (D)	750	150
LKW groß mit Anhänger (D)	300	300
LKW leicht Diesel	30	30

Quelle: [Öko96] und weitere eigene Spezifizierungen zu den Verkehrsmitteln

Die Auslieferung zum Kunden mit „LKW leicht Diesel“ erfolgt mit einer Waschmaschine pro Fahrzeug, Touren sind nicht berücksichtigt. Aufgrund der Zentralisierung der europäischen Produktion wurden 750 km Bahn statt 150 km Bahn für die Distribution angesetzt.

Der kumulierte Primärenergieaufwand für die Distribution beträgt mit 0,1 GJ ein Drittel mehr als beim Öko-Institut [Öko96]. Selbst bei 1000 km Bahn ist der Effekt des Transportes auf die Gesamte Energiebilanz der Waschmaschine zu vernachlässigen. Für die Rückführungslogistik ergeben sich 0,075 GJ/Waschmaschine.

4.3.4 Teilbilanz End of Life

Die realen Entsorgungswege von Waschmaschinen sind unbekannt. Dazu gehören der Export, Sperrmüll, Recyclinghöfe, die Aufarbeitung, die Demontage, die Verschrottung (ggf. zusammen mit Altfahrzeugschrott) und die Deponierung. Durch die nationalen Umsetzungen der WEEE können sich diese Entsorgungskanäle in den nächsten Jahren ändern.

Es ist zu vermuten, dass ein Großteil des Stahls geschreddert und in Elektrostahlwerken wiedergewonnen wird. Unklar ist, in welchem Umfang kupferhaltige Bauteile wie z.B. Elektromotoren vorab demontiert werden. Ansonsten wird das Kupfer in den Stahl eingetragen und trägt mit vielen anderen Quellen langfristig zu Qualitätsproblemen bei Sekundärstahl bei. Beton aus dem Sockel und das Glas dürften aufgrund ihrer Eigenschaften als Siedlungsabfälle deponiert werden. Die Vielfalt der Kunststoffe in der Waschmaschine und unzureichende Verwertungsmöglichkeiten erschweren ein werkstoffliches Recycling. Ihr Energiegehalt könnte jedoch genutzt werden. Allerdings ist zu bezweifeln, dass sich der Trennungsaufwand für die Recyclingbetriebe wirtschaftlich lohnt.

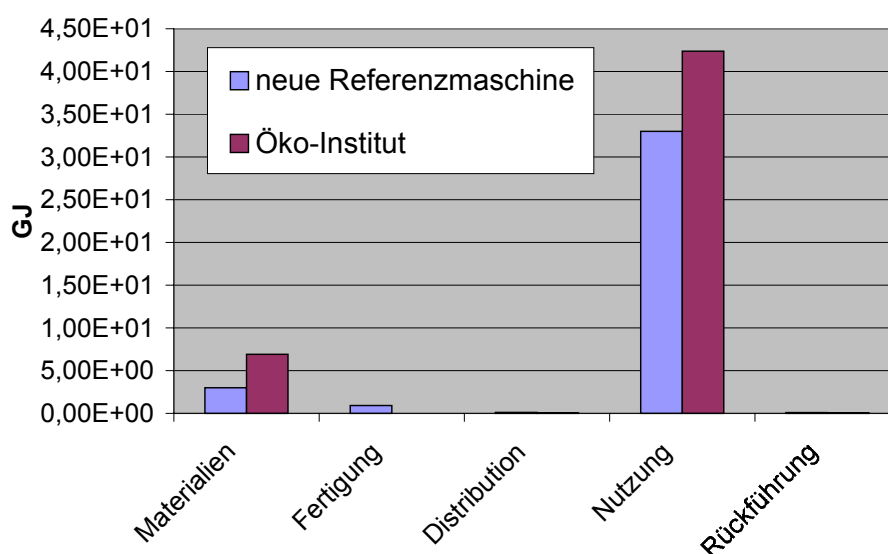
Entsprechend der Methodik von PSR (Psr01) werden für das Recycling weder Gut- noch Lastschriften verteilt. Der kumulierte Primärenergieaufwand bleibt deshalb durch die Teilbilanz End-of-Life unberührt.

Die End-of-Life Abfallmenge wird entsprechend des Gewichtes der neuen Referenzmaschine mit 76,1 kg angesetzt. Die Maschine ist damit geringfügig leichter als die des Öko-Institutes mit 80 kg. Die produktionsbedingten Abfälle fallen im Vergleich zur End-of-life Menge und Unsicherheiten über die Nutzungsdauer nicht ins Gewicht.

4.3.5 Die neue Referenzmaschine im ökologischen Vergleich

Der Vergleich des kumulierten Primärenergieaufwandes der neuen Referenzmaschine mit der Maschine des Öko-Instituts ergibt folgendes Bild:

Abbildung 4.4: Kumulierter Primärenergieaufwand der neuen Referenzmaschine im Vergleich



Quellen: [Öko96] und eigene Berechnungen

KEA der neuen Referenzmaschine beträgt für Materialien, Fertigung und Distribution 4 GJ und in der Nutzungsphase 33 GJ. Die Rückführung kann im folgenden vernachlässigt werden, da sie zum einen auch für aufgearbeitete Maschinen einbezogen werden muss und zum anderen nur marginal zum KEA beiträgt. Der Anteil der Nutzungsphase an KEA liegt bei etwa 89 %. Legt man eine Nutzungsdauer von fünf statt zehn Jahren zugrunde, so liegt der Anteil der Nutzungsphase an KEA immer noch über 80 %. Rechnerisch beträgt KEA für die Nutzungsphase nach 1,2 Jahren mit 4 GJ bereits ebensoviel wie KEA für die Herstellungsaufwendungen.

Beim Öko-Institut ist KEA für Materialien, Fertigung und Distribution mit knapp 7 GJ deutlich höher abgeschätzt als bei der neuen Referenzmaschine, was insbesondere auf den Faktor 2 auf den Materialgehalt der Waschmaschine zurückzuführen ist. Auch das um etwa 5 % höhere Gewicht der Maschine und ältere Daten zum Primärenergieaufwand tragen zu dieser Diskrepanz bei.

Bei der neuen Referenzmaschine ist der Waschmittelverbrauch nicht bilanziert worden. Beim Öko-Institut entfällt mit 4,66 MJ Primärenergie/Waschgang (knapp 30 %) ein erheblicher Teil des KEA in der Nutzungsphase auf den Waschmittelverbrauch (89 g Kompaktwaschmittel). Die Vergleichbarkeit des strombedingten KEA ist nicht gegeben, da unterschiedliche Messbedingungen zugrunde gelegt sind.

Der Wasserverbrauch der neuen Referenzmaschine kann nicht mit anderen Neumaschinen verglichen werden, da nicht die gleichen Bedingungen gewährleistet werden konnten.

Das Gesamtgewicht und damit der End-of-Life Abfall ist bei der neuen Referenzmaschine mit 76,1 kg um etwa 5 % geringer als bei der Maschine des Öko-Instituts.

4.4 Aufarbeitungsvarianten im ökologischen Vergleich

Im folgenden werden die Aufarbeitungsvarianten und die alte bzw. neue Referenzmaschine mit Hilfe der Indikatoren kumulierter Primärenergieaufwand, Wasserverbrauch und Abfall verglichen.

4.4.1 Kumulierter Primärenergieaufwand

Der kumulierte Primärenergieaufwand der alten Referenzmaschine und der Aufarbeitungsvarianten unterscheidet sich von der Neumaschine wie folgt:

- Der produktionsbedingte KEA wird nur der Neumaschine angelastet, der Materialaufwand für Reparatur- und Aufarbeitungsteile fällt demgegenüber nicht ins Gewicht.
- Für die Varianten 3 und 4 muss zusätzlich die Vorkette für die externe Warmwasserbereitstellung einbezogen werden.

Der Energiegehalt Q des Warmwassers mit einer Zulufttemperatur von 55°C im Vergleich zu Kaltwasser mit 15°C kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$Q = c_p * m * \Delta T$$

$c_p = 4,185 \text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$ spezifische Wärmekapazität des Wassers

$m = \rho * V$ Masse des Warmwassers mit $\rho = 1 \text{ kg/l}$ und V als Volumen des extern bezogenen Warmwassers

$\Delta T = 40 \text{ K}$ Temperaturdifferenz des Wassers zwischen 55°C und 15°C

Der Wirkungsgrad der Vorkette für die Warmwasserbereitstellung wird von Probas [Pro03] bei „Gas Warmwasser D für Haushalte und Kleinverbraucher“ mit $69,0 \%$ angegeben und liegt damit deutlich über dem Wert für Haushaltsstrom mit $36,6 \%$.

Vereinfachend werden die Leitungsverluste im Haus vom Stromhauptverteiler und von der Gastherme bis zur Waschmaschine vernachlässigt.

Der Break-even Punkt für eine beliebige Altmaschine (KEA (Alt)) im Vergleich zu einer beliebigen Neumaschine (KEA (Neu)) berechnet sich vereinfacht wie folgt:

$$\text{KEA}_n (\text{Alt}) = \text{KEA}_p (\text{Neu}) + \text{KEA}_n (\text{Neu})$$

$$\text{KEA}_n = (w_{\text{el},n} * v * t) / \eta_{\text{el}}$$

$$\text{KEA}_p (\text{Neu}) = 4 \text{ GJ}$$

n : Index für Nutzungsphase

p : Index für Materialien, Produktion und Distribution

w_{el} : spezifischer Endenergieverbrauch pro Waschgang in GJ

v : Anzahl der Waschgänge pro Jahr

t : Zeit in Jahren

η_{el} : Wirkungsgrad der Endenergiebereitstellung

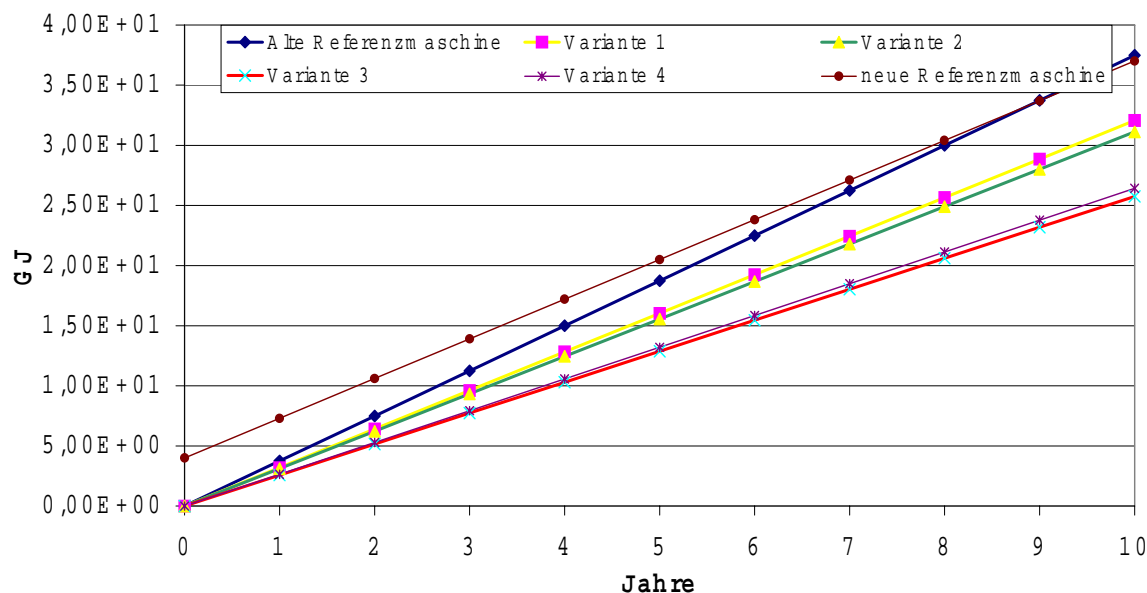
Daraus berechnet sich der zeitliche Break even point für KEA zu:

$$t = \eta_{\text{el}} * 4 \text{ GJ} / (v * (w_{\text{el}}(\text{Neu}) - w_{\text{el}}(\text{Alt})))$$

Bei Maschinen mit Warmwasseranschluss besteht obige Gleichung aus zwei Termen für Warmwasser und Strom mit η_{th} und w_{th} für den Warmwasseranteil.

Folgende Abbildung zeigt KEA der Varianten im Vergleich:

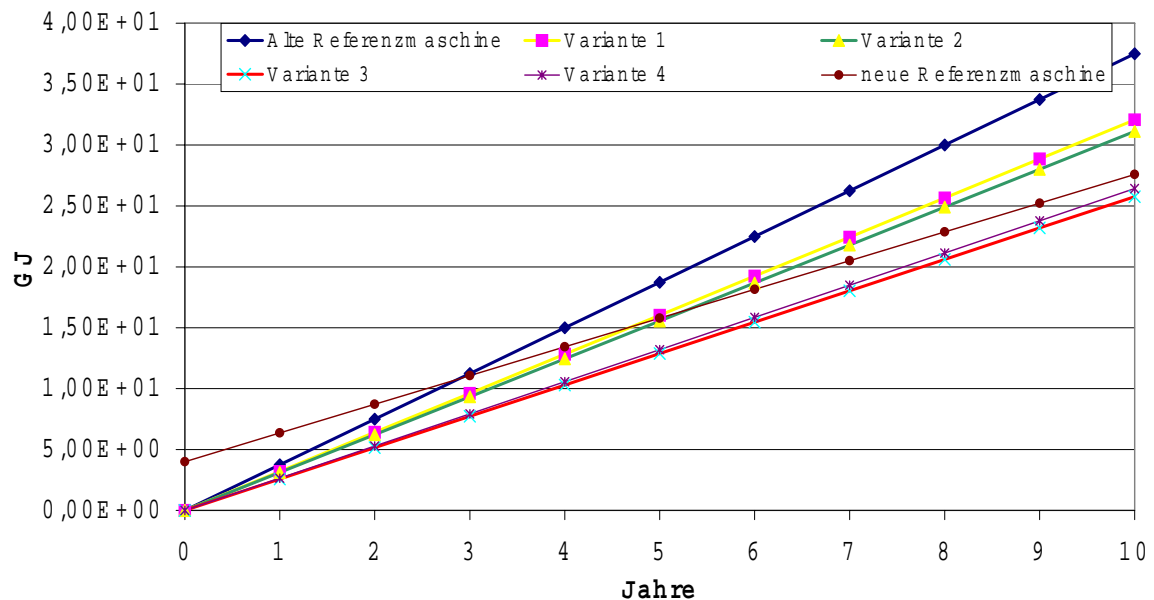
Abbildung 4.5: KEA der Aufarbeitungsvarianten im Vergleich



Quelle: eigene Berechnungen

Die Neumaschine ist sowohl der alten Referenzmaschine als auch den Aufarbeitungsvarianten gegenüber innerhalb sinnvoller Restlaufzeiten von etwa 5 Jahren unterlegen. Das Ziel der energieeffizienten Aufarbeitung ist es, die Geraden abzufachen. Im Vergleich zur alten Referenzmaschine verringert der Microcontroller KEA um 14,5 % und zusammen mit einem Warmwasserzulauf kann KEA um 31,1 % verringert werden.

Die Eindeutigkeit des Ergebnisses ist darauf zurückzuführen, dass die neue Referenzmaschine mit 1,40 kWh pro Waschgang nur geringfügig energieeffizienter als die alte Referenzmaschine mit 1,59 kWh pro Waschgang ist. Da nur eine nicht repräsentative Neumaschine gemessen wurde, wird im folgenden die Sensitivität der Ergebnisse anhand einer fiktiven Neumaschine mit einem Stromverbrauch von 1 kWh/Waschgang untersucht.

Abbildung 4.6: Sensitivität der Ergebnisse für KEA

Quelle: eigene Berechnungen

In dieser Betrachtung schneidet die alte Referenzmaschine bereits nach drei Jahren schlechter ab als die Neumaschine. Nach der realistischen Restlaufzeit von fünf Jahren liegen die neue Referenzmaschine und die Varianten 1 und 2 bezüglich KEA praktisch gleichauf. Lediglich die Varianten 3 und 4 bleiben deutlich besser als die Neumaschine. Allerdings wurden sie auch nicht einer Neumaschine mit Warmwasseranschluss gegenübergestellt.

In dieser Betrachtung wurde der durchschnittliche Niederspannungsstrom für Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland zugrundegelegt. Sollte der Strom aber z.B. aus einem BHKW bezogen werden können, so würde sich der strombedingte KEA signifikant reduzieren. Auch durch Bezug von thermischer Energie aus einem BHKW oder einer Solaranlage anstelle einer konventionellen Gastherme sind Reduzierungen von KEA möglich. Eine pauschale Aussage ist aufgrund der heterogenen Energieversorgungssituation vor Ort aber nicht sinnvoll. Aus ökologischer Sicht ist der Bezug von Strom und Warmwasser aus BHKW und/oder regenerativen Energiequellen sinnvoll.

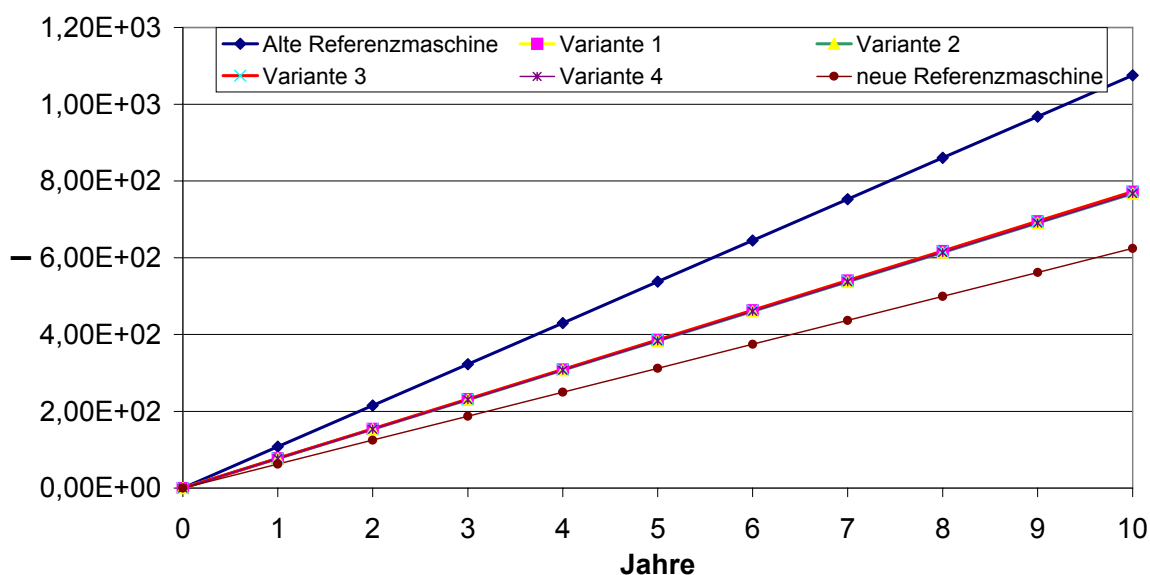
4.4.2 Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch wird nur für die Nutzungsphase berechnet. Zwar liegen in der Probas-Datenbank auch für andere Prozesse, wie z.B. die Glasherstellung Daten zum Wasserverbrauch vor, es wird jedoch nicht nach Qualitäten unterschieden. Der Wasser-

verbrauch in der Nutzungsphase bestimmt auch die zu reinigende Abwassermenge wesentlich mit. Zudem ist der Wasserverbrauch ein entscheidender Kostenfaktor.

Folgende Abbildung zeigt den kumulierten Wasserverbrauch der untersuchten Maschinen:

Abbildung 4.7: Wasserverbrauch der Aufarbeitungsvarianten im Vergleich



Quelle: eigene Berechnungen

Die neue Referenzmaschine zeigt sich den anderen Varianten überlegen. Insbesondere die nicht aufgearbeitete Referenzmaschine ist mit 107,5 l / Waschgang im Vergleich zu 62,4 l/Waschgang bei der neuen Referenzmaschine deutlich im Nachteil. Durch Einbau eines Microcontrollers kann der Wasserverbrauch zwar um 28,2 % reduziert werden, die neue Referenzmaschine wird jedoch nicht erreicht. Der nachträgliche Einbau des Jetsystems hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf den gesamten Wasserverbrauch. Andere Neumaschinen sind aufgrund fehlender Messwerte nicht in den Vergleich einbeziehbar.

Die Messungen ergaben, dass rund 12,5 kg Wasser in 5 Kg Wäsche gebunden sind und mindestens 2 l freies Wasser zum Waschen vorhanden sein müssen. Die bei Variante 4 zuzuführende Warmwassermenge von 15 l für den Hauptwaschgang stellt also nahezu eine untere Grenze dar. Weitere Einsparpotenziale ergeben sich beim Kaltwasserverbrauch der Spülgänge durch Verringerung der Anzahl der Spülgänge sowie durch die Reduzierung des Wasserstandes.

4.4.3 Abfall

Die durch Aufarbeitung eingesparte Abfallmenge (End-of-Life) lässt sich mit Hilfe des Gewichtes der Waschmaschinen und der Nutzungsdauer vereinfacht aus folgender Tabelle abschätzen:

Tabelle 4-2: Daten zur Schätzung der eingesparten End-of-Life Abfallmenge durch Aufarbeitung

Waschmaschine	Gewicht [kg]	Nutzungsdauer [a]
Neumaschine	76,1	10
Aufgearbeitete Maschine		5
Microcontroller	0,5	
Jetsystem	2-2,5	
Warmwasserzulauf	0,3	

Quelle: eigene Berechnungen und Schätzungen

Aus obiger Tabelle wird ersichtlich, dass die Einbauten bei der Aufarbeitung im Vergleich zur Restlebensdauer nur eine untergeordnete Rolle spielen. Allein die ökologisch ohnehin fragwürdige Nachrüstung eines Jetsystems (Ablauf- und Umwälzpumpe, neue Heizung) hat einen merklichen Effekt. Der Warmwasserzulauf (Ventil und Schlauch) und der Microcontroller (inkl. Transformator) kommen zusammen mit 0,8 kg auf knapp 1 % des Gewichtes einer Neumaschine.

Die mit einem Microcontroller aufrüstbaren Waschmaschinen stammen vor allem aus der Zeit von vor 5-10 Jahren. Bei einer pro Jahr verkauften Stückzahl von schätzungsweise 2,5 Mio. Stück ergibt sich über einen Zeitraum von fünf Jahren eine Menge von 12,5 Mio. Stück. Das Wiederverwendungspotenzial wird von Brancheninsidern [Ebl03] auf 8-10 % geschätzt. Gemäß obiger Tabelle kann durch die Aufarbeitung eine „halbe Neumaschine“ (Quotient der typischen Nutzungsdauern) an Abfall eingespart werden, woraus sich für die fünf Jahre ein durchschnittliches Abfallminderungspotenzial von rund 9.500 t/a errechnet. Legt man zugrunde, dass die Aufarbeitung nur bei den Maschinen mit defektem Schaltwerk finanziell in Frage kommt, so verringert sich diese Menge unter Berücksichtigung einer Fehlerrate von einem Drittel auf etwa 3.200 t/a. Zum Vergleich: Die jährliche Abfallmenge an Waschmaschinen beträgt etwa 200.000 t (2,5 Mio. Stück zu 80 kg), wovon real etwa 5 % im Gebrauchtmart lande[n] [Ebl03].

Bei wiederaufgearbeiteten Maschinen wird davon ausgegangen, dass diese noch mindestens 3-5 Jahre laufen müssen, damit der Kunde die Investition tätigt. Wird als Refe-

renz eine Neumaschine aus dem Billigsegment mit ebenfalls 3-5 Jahren Nutzungsdauer zugrunde gelegt, so sind die oben angeführten Potenziale zu verdoppeln.

4.5 Fazit aus ökologischer Sicht

Die ökologischen Effekte der Aufarbeitung gebrauchter Waschmaschinen können trotz methodischer Unsicherheiten richtungssicher abgebildet werden. Methodische Unsicherheiten sind insbesondere die Systemgrenzen (z.B. fehlende Bilanzierung der Komponentenherstellung und des Abwassermoduls), die generischen und teils alten Daten, Unsicherheiten über die tatsächliche Nutzung, den Gerätebestand und die Ausmusterungsraten sowie unzureichende Erfassung der Neumaschinen im Messprogramm, so dass nur eine eingeschränkt realistische Vergleichsgrundlage zur Verfügung steht.

Die Aufarbeitungsvarianten sind wie folgt zu beurteilen:

- Microcontroller und Warmwasseranschluss führen zur Reduzierung des kumulierten Primärenergieaufwandes unter das Niveau der gemessenen Neumaschine.
- Der Wasserverbrauch in der Nutzungsphase kann durch Microcontroller deutlich reduziert werden, jedoch nicht bis auf das Niveau der Neumaschine.
- Der Einbau eines Jetsystems hat nur marginale Auswirkungen auf den Wasserverbrauch und führt zu keiner Ansenkung des Stromverbrauchs, da das Pumpsystem selbst Strom benötigt.
- Sollten die Aufarbeitungsvarianten im Vergleich zur nicht verbrauchsoptimierten Aufarbeitung den Verkauf von Altmaschinen fördern, so kann zusätzlich Abfall eingespart werden.

Bei geringen Differenzen des Stromverbrauchs zwischen Alt- und Neumaschine lohnt die Aufarbeitung nicht. Bei zu alten Maschinen ist der Aufwand sehr groß, um die Geraden abzuflachen. Die Hauptpotenziale liegen bei den Maschinen mittleren Alters.

Die Wahl der Waschtemperatur ist häufig ausschlaggebender für den Stromverbrauch als die Wahl der Waschmaschine (ob neu, alt oder aufgearbeitet). Nicht nur das Alter, sondern auch die Anzahl der Waschzyklen beeinflusst KEA. Deshalb prägen auch verschieden intensive Nutzungsformen die ökologische Nettobilanz. Die Nachrüstung einer Waschmaschine mit Warmwasserventil kann sich aus ökologischer Sicht auch in der Nutzungsphase lohnen, allerdings ist dazu ein Warmwasseranschluss erforderlich.

5 Kostenbetrachtungen

Die Betrachtung der Kosten erfolgt aus zwei Blickwinkeln: Zum einen werden die im Zuge der Aufarbeitung entstandenen Kosten für die verschiedenen Optimierungsvarianten miteinander verglichen. Zum anderen werden die Kosten aus der Kundenperspektive betrachtet.

5.1 Kosten für herkömmliche Reparaturen

Impulsrecycling bezieht die Altgeräte kostenlos von Entsorgungsfachfirmen aus der Region Karlsruhe. Für den Transport fallen durchschnittlich 25 € pro Waschmaschine an. Erfahrungsgemäß befinden sich die Altgeräte in einem sehr unterschiedlichen Zustand, entsprechend schwankt der Reparaturaufwand teilweise erheblich. Aus den bisherigen Reparaturfällen (rund 700 Waschmaschinen in 3 Jahren) lassen sich Reparaturhäufigkeiten feststellen, wie sie in Tabelle 5-1 zusammengefasst sind. Demzufolge sind vor allem Trommellager (mit 80%), Stoßdämpfer mit 80% und Motorlager mit 60% besonders häufig defekt und müssen repariert oder erneuert werden. Die höchsten Materialkosten entstehen bei defekten Schaltwerken und defekter Elektronik. Die Reparaturhäufigkeit liegt hier jeweils bei 20%. Mit Blick auf den Zeitaufwand benötigt die Reparatur von Trommellager ebenso wie von Kabelbaum mit Abstand die meiste Zeit.

Aus der Reparaturhäufigkeit, den Material- und Arbeitskosten lassen sich die relativen Kosten berechnen, wie sie in der Tabelle wiedergegeben sind. Die Summe ergibt die durchschnittlichen Kosten für die Aufarbeitung einer Alt-Waschmaschine. Sie dient im weiteren als Bezugsgröße.

Tabelle 5-1: Durchschnittliche Reparaturkosten

Ersatzteile	Reparaturhäufigkeit In %	Materialkosten in €	Reparaturzeit in h	Rel. Materialkosten in €	Rel. Arbeitskosten in €
Laugenpumpe	20	30,00	0,5	6,00	3,00
Trommellager	80	30,00	2	24,00	48,00
Programmschaltwerk	20	150,00	0,5	30,00	4,00
Heizung	10	20,00	0,5	2,00	1,50
Stoßdämpfer	80	15,00	0,25	12,00	6,00
Motor-Lager	60	20,00	1	12,00	18,00
Kabelbaum	5	40,00	2	2,00	4,00
Elektronik	20	80,00	0,25	16,00	2,00
Türschloss	5	40,00	0,25	2,00	0,38
Türscharnier	5	20,00	0,25	1,00	0,38
Türgummi	20	25,00	0,5	5,00	3,00
Schläuche	5	15,00	0,5	0,75	0,75
Optik	100	5,00	1	5,00	25,00
Qualitätskontrolle	100		0,5		20,00
Summe				117,75	136,00

Quelle: eigene Berechnungen

5.2 Kosten der Maßnahmen

Für die Umsetzung der getesteten Maßnahmen fallen Materialkosten und Arbeitskosten an. Sie sind in Tabelle 5-2 dargestellt. Der Einbau des Microcontrollers schlägt mit 240 € zu Buche. Die hohen Kosten entstehen, weil es sich um eine Einzelanfertigung handelt. Die Kosten für den Einbau des Jet-Systems betragen 130 € und für die Warmwassereinspeisung 50 €. Hier kann auf weit verbreitete Standardkomponenten zurückgegriffen werden.

Tabelle 5-2: Kosten der Aufarbeitungsmaßnahmen

	Microcontroller	Jet-System	Warmwassereinspeisung
Materialkosten in €	150	70	20
Arbeitskosten* in €	90	60	30
Summe in €	240	130	50

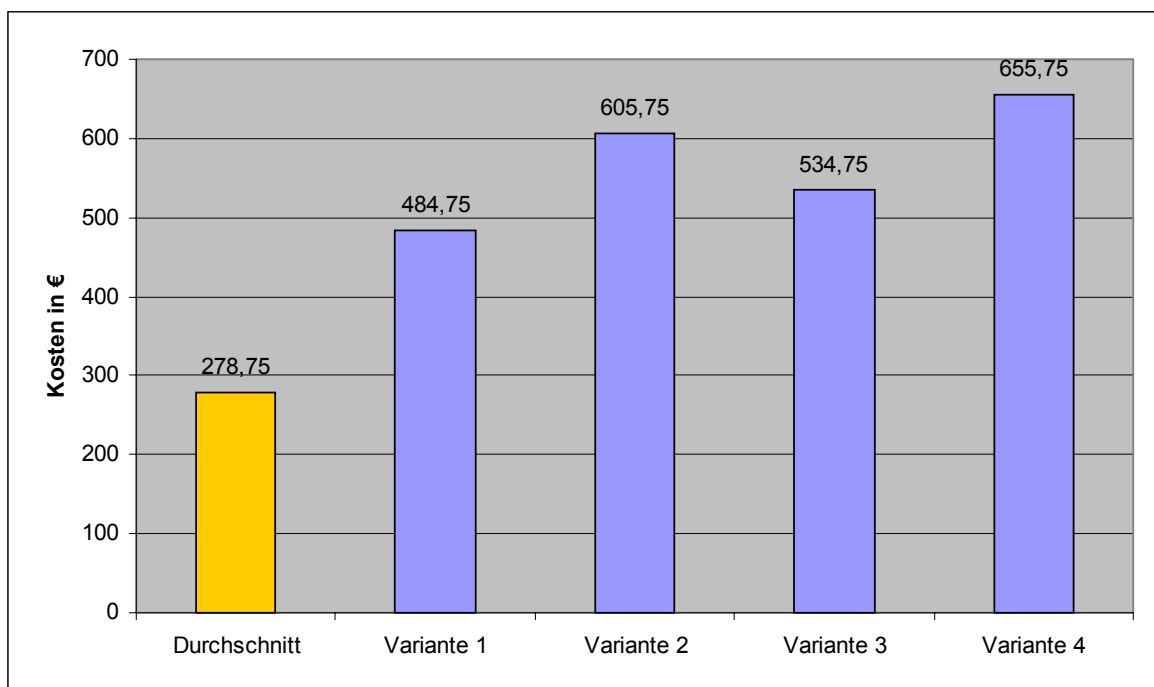
* Mischkalkulation anhand von Basissätzen für Meister (40 €/h), Monteur (30 €/h), Hilfskraft (25 €/h)

Quelle: eigene Berechnungen

5.3 Vergleich der Aufarbeitungsvarianten

Im folgenden werden die Aufarbeitungsvarianten bezüglich der Kosten miteinander verglichen. Als Referenz dienen die durchschnittlich kalkulierten Kosten für die herkömmliche Aufarbeitung der Waschmaschinen. Tabelle 5-2 zeigt, dass die Kosten für die verschiedenen Aufarbeitungsvarianten wesentlich über den Durchschnittskosten liegen. Variante 1 verursacht rund 75% höhere Kosten. Die Kosten bei Einbau von Microcontroller und Jet-System liegen sogar mehr als doppelt so hoch. Die Zahlen signalisieren, dass unter den derzeitigen Bedingungen, bei allen Varianten der Kostenzuwachs wirtschaftlich nicht darstellbar ist.

Abbildung 5.1: Kosten der Aufarbeitungsvarianten



Quelle: eigene Berechnungen

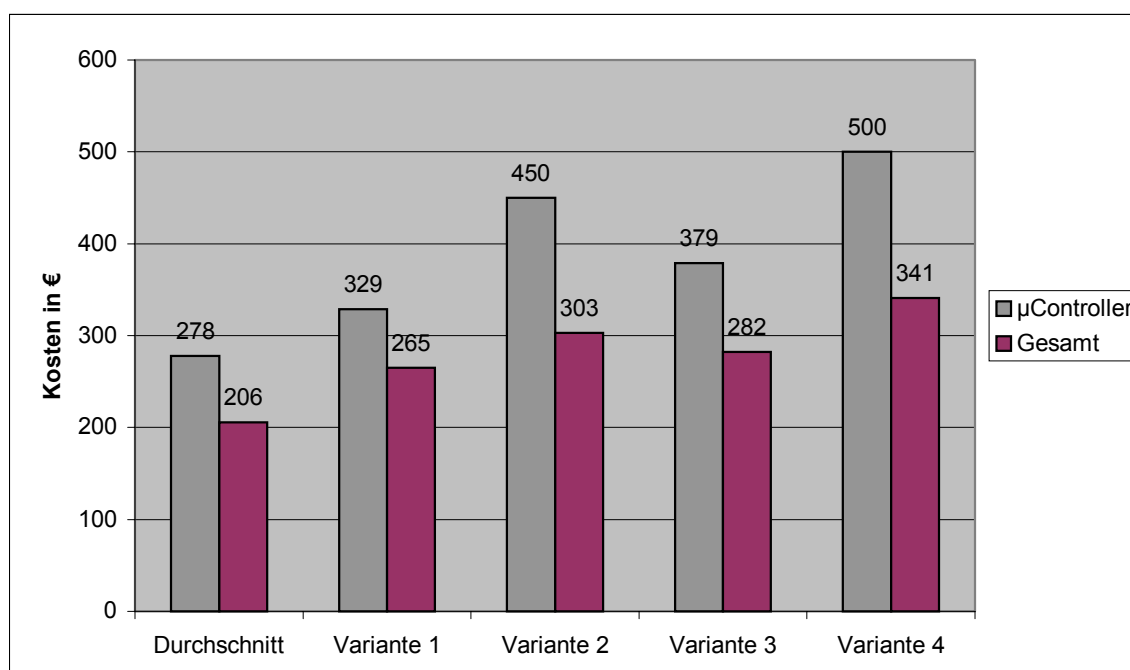
5.4 Kosten unter optimierten Bedingungen

Kosten lassen sich insbesondere beim Microcontroller senken, da er als Einzelfertigung kostenintensiv ist, zweitens ist er in allen Varianten vorgesehen. Wie sich das Potenzial zur Senkung der Kosten beim Microcontrollers darstellt, zeigt Abbildung 5.2. Durch Fertigung in Kleinserie (ca. 1000 Stück) und Optimierung der Arbeitsabläufe beim Einbau wird geschätzt, dass die derzeitigen Kosten in Höhe von 240 € auf 85 € gesenkt werden könnten. Entsprechend niedriger fallen die Kosten der verschiedenen Varianten aus. Die Differenz zwischen Variante 1 und dem Reparaturdurchschnitt reduziert sich

auf rund 50 €. Damit würden die Aufarbeitungskosten in einem Rahmen liegen, der wirtschaftlich darstellbar und gegenüber dem Kunden (angesichts des Mehrwerts durch verbesserte Verbrauchseigenschaften) zu rechtfertigen wäre.

Neben der Optimierung des Microcontrollers lassen sich bei anderen Komponenten durch Einkauf im Großhandel Kostendegressionseffekte (z.B. aufgrund von Rabattierung etc.) erzielen. Zudem können bei einer größeren Anzahl von aufzuarbeitenden Waschmaschinen die Arbeitsabläufe optimiert werden, was weitere Einspareffekte erbringt. Unter optimalen Bedingungen können die Kosten schätzungsweise um weitere 20 bis 30 Prozent (je nach Variante) reduziert werden (vgl. Abbildung 5.2).

Abbildung 5.2: Aufarbeitungsvarianten bei Kostenoptimierung



Quelle: eigene Berechnungen

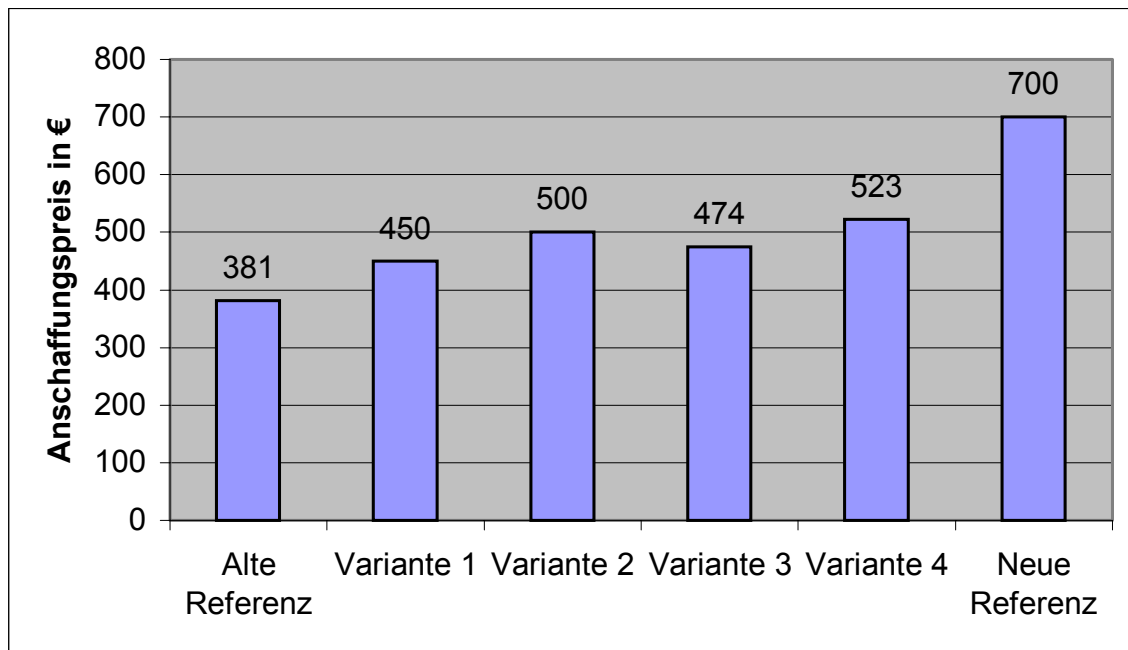
5.5 Kosten aus Kundensicht

Aus Perspektive des Verbrauchers sind zwei Kostenarten zu berücksichtigen: die Anschaffungskosten und die Kosten, die durch den Betrieb entstehen, das heißt Kosten für Strom und Wasser bzw. für Warmwasser im Fall von Waschmaschinen mit Warmwassereinspeisung.

Der Anschaffungspreis setzt sich aus den Kosten für die Abholung der Altmaschine, Aufarbeitung und einem Zuschlag für Garantieleistungen, Verkauf und Marketing, Gewinn und Mehrwertsteuer zusammen. Bei Impuls-Recycling wird dieser Zuschlag mit

rund 37% angesetzt. Im Vergleich ist die konventionell aufgearbeitete Waschmaschine am günstigsten. Neumaschinen mit ähnlichen Funktionalitäten sind doppelt so teuer (vgl. Abbildung 5.3).

Abbildung 5.3: Anschaffungspreis der aufgearbeiteten Maschinen



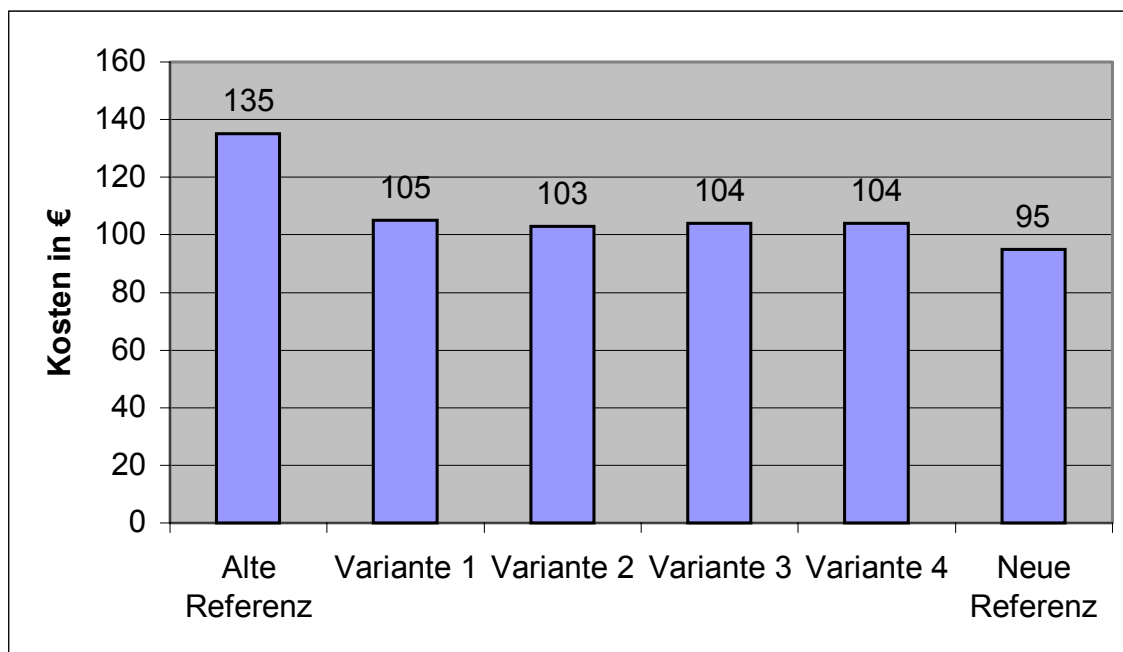
Quelle: eigene Berechnungen

Betrachtet man die Betriebskosten ergibt sich folgendes Bild: Die jährlichen Kosten für Strom und Wasser sind bei der alten, aufgearbeiteten Referenzmaschine am höchsten. Die optimierten Varianten liegen deutlich darunter und sind von den Kosten her mit der neuen Referenzmaschine vergleichbar.

Die Gesamtkosten (Anschaffungs- plus Betriebskosten) sind in Abbildung 5.5 illustriert. Hier zeigt sich, dass die aufgearbeiteten Maschinen nur dann weniger Kosten im Lebenszyklus verursachen als dies bei der neuen Referenzmaschine der Fall ist, wenn sie eine Restlaufzeit von über 10 Jahren haben.

Realistischer ist aber, dass aufgearbeitete Maschinen früher defekt werden und ausgetauscht werden müssen. Die Restlaufzeit von 8 bis 12 Jahre alten Maschinen kann auf mindestens drei Jahre geschätzt werden, dürfte aber eher darüber bei ungefähr 5 Jahren liegen. Dies hängt wesentlich von der Aufarbeitung selbst ab.

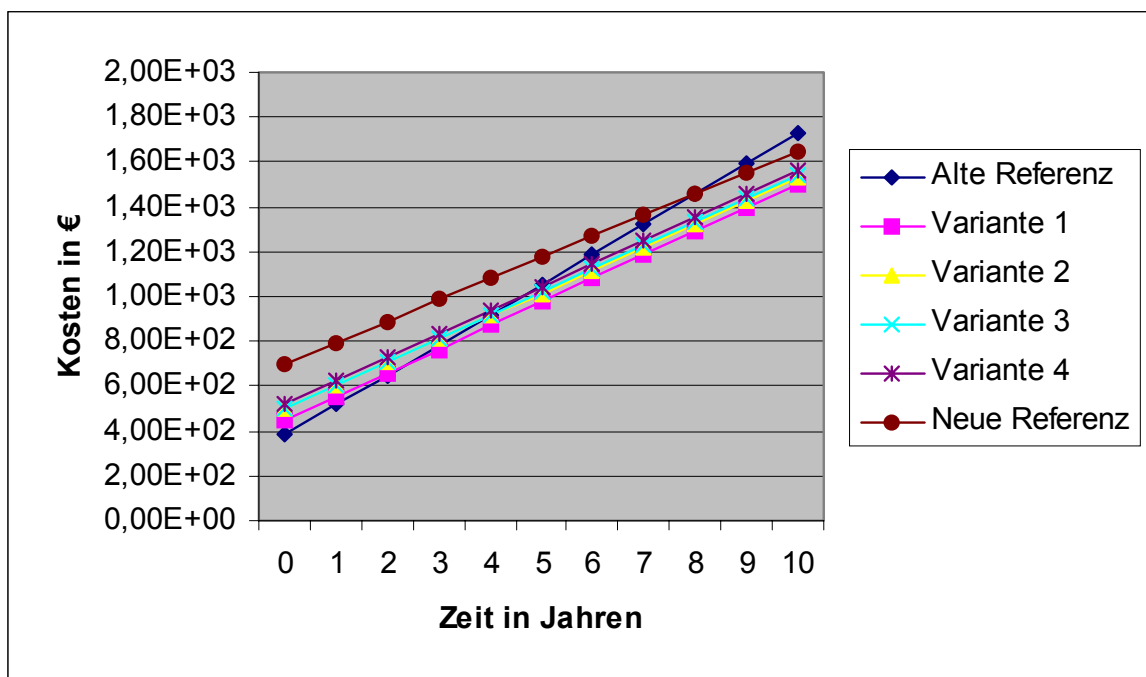
Abbildung 5.4: Jährliche Betriebskosten der aufgearbeiteten Maschinen



* Wasser-, Strom- und Wärmebedarf pro Jahr

Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5.5: Lebenszykluskosten der aufgearbeiteten Maschinen im Vergleich

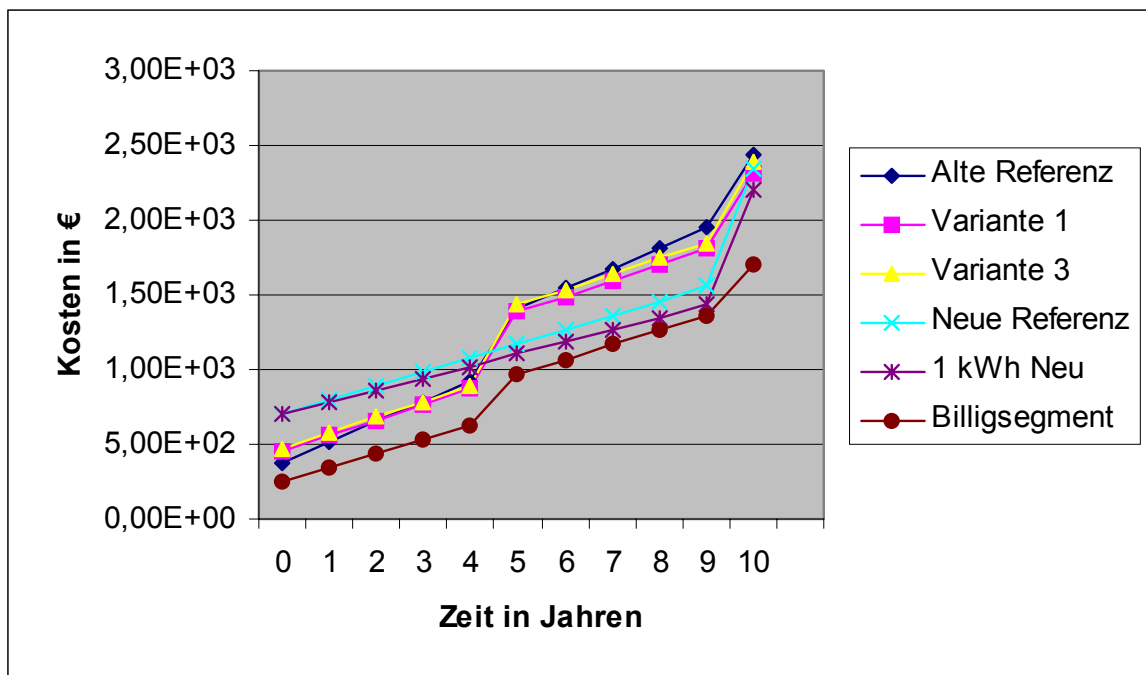


Quelle: eigene Berechnungen

Nimmt man in einem Szenario eine fünfjährige Restlaufzeit für die aufgearbeiteten Maschinen an, schneidet zunächst die neue Referenzmaschine am schlechtesten ab (vgl. Abbildung 5.6). Dies trifft auch auf eine Neumaschine zu, die der aktuellen Stromeffizienz von unter einem 1 kWh pro Waschgang entspricht. Der Kostenverlauf ändert sich nach fünf Jahren, wenn die aufgearbeiteten Maschinen durch neue ersetzt werden. Dann liegen die Kosten für diese Geräte deutlich höher. Nach zehn Jahren bewegen sich Kosten wieder auf einem vergleichbaren Niveau, was auf den Neukauf zurückzuführen ist. Dies bedeutet, dass bei kleinen Zeiträumen sich die Kosten signifikant unterscheiden können, über längere Zeit hinweg sich die Kosten verschiedener Strategien angleichen.

Bezieht man in diesen Vergleich Neumaschinen aus dem Billigsegment (ca. 300 €) mit ein und legt einen Stromverbrauch von 1,4 kWh pro Waschzyklus zugrunde, zeigt sich, dass unter Kostengesichtspunkten diese Maschinen mit Abstand bei den Lebenszykluskosten am günstigsten sind. Dies trifft auch zu, wenn man annimmt, dass Waschmaschinen im Niedrigpreissegment nach fünf Jahren ausgewechselt werden. Tatsächlich gibt es seit mehreren Jahren verstärkt einen Trend zu Waschmaschinen mit einem Preis zwischen 200 und 300 €. Deren Lebensdauer bis zur ersten Reparatur beträgt oft nur 3 bis 4 Jahre [Ebl03].

Abbildung 5.6: Szenarien für die Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer



Quelle: eigene Berechnungen

5.6 Kosten und ökologischer Nutzen im Vergleich

Die getesteten Varianten bieten gegenüber der konventionellen Aufarbeitung einen unterschiedlichen ökologischen Nutzen bei verschiedenen hohen Kosten. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis kann anhand des Verhältnisses von Kostenaufwand, ausgedrückt als Differenz zwischen den Aufarbeitungskosten einer bestimmten Variante und den Kosten für die konventionelle Aufarbeitung, und eingesparter Primärenergie, ausgedrückt als Differenz des Energieverbrauchs der Gebrauchsphase zwischen alten Referenzgerät und den Varianten, bestimmt werden.

Primärenergieeffizienz =

$$\frac{[\text{Primärenergie (Variante x)} - \text{Primärenergie (Referenz)}]}{[\text{Aufarbeitungskosten (Variante x)} - \text{Aufarbeitungskosten (Referenz)}]}$$

Bei den Aufarbeitungskosten für die Varianten wurde ein kostenoptimierter Microcontroller angesetzt.

Der Wasserverbrauch kann zwar durch den Microcontroller deutlich verringert werden, ist aber bei allen getesteten Varianten nahezu gleich und deshalb kein differenzierendes Kriterium. Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Kostendifferenz und Primärenergieeinsparung der Aufarbeitungsvarianten gegenüber dem Referenzgerät

Differenz gegenüber Referenz (alt)	Variante 1 μC	Variante 2 μC, Jet-System	Variante 3 μC, Warmwasseranschluss	Variante 4 μC, Jet-System, Warmwasseranschluss
Aufarbeitungskosten in €	51	172	101	222
Primärenergieeinsparung in MJ	536	632	1252	1090
Effizienz: Primärenergieeinsparung MJ/€	10,5	3,6	12,4	4,9

*Basis: Strom- und Warmwasserverbrauch für 240 Waschzyklen/Jahr und fünf Jahre; ** optimierte Kosten für Microcontroller

Quelle: eigene Berechnungen

Die Aufarbeitungsvarianten sind danach wie folgt zu bewerten:

- Der Einbau des Microcontrollers (Variante 1) führt zu einer vergleichsweise hohen Primärenergieeinsparung in Bezug auf den Kostenaufwand. Voraussetzung ist die Optimierung und Serienherstellung des Microcontrollers.
- Das ungünstigste Verhältnis weist der Einbau des Jet-Systems (in Variante 2) aus, da dieser den Stromverbrauch nicht reduziert (und auch den Wasserverbrauch nur geringfügig verringert).
- Die Variante 3 besitzt das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis (mit 12,4). Der zusätzliche Einbau eines Warmwasserventils ist vergleichsweise kostengünstig, bringt aber gegenüber dem Microcontroller nur noch einen geringen Nutzenzuwachs.
- Die Umsetzung sämtlicher getesteter Maßnahmen (Variante 4) führt im Vergleich zu einem suboptimalen Kosten-Nutzen-Verhältnis. Ausschlaggebend ist hier das wenig effektive Jet-System.

Insgesamt stellt sich der nachträgliche Einbau eines μ Controllers als die optimalste Variante dar. Der Einbau eines Warmwasseranschlusses ist nur begrenzt sinnvoll. Die Nachrüstung mit einem Warmwasserventil erfordert einen Warmwasseranschluss, der nur in den wenigsten Haushalten verfügbar ist. In Deutschland (anders als in den USA und in Großbritannien) ist ein Warmwasseranschluss kaum verbreitet. AEG hat aus diesem Grunde die Produktion von Waschmaschinen mit Warmwasseranschluss vor einigen Jahren eingestellt. Es ist daher zu vermuten, dass auch für aufgearbeitete Gebrauchsmaschinen kaum ein nennenswertes Marktpotenzial besteht. Sinnvoll kann aber der selektive Einbau eines Warmwasseranschlusses sein, wenn dieses gewünscht wird.

6 Fazit

Als Fazit können folgende Kernergebnisse aus dem Modellprojekt abgeleitet werden:

- Microcontroller und Warmwasseranschluss führen zur Reduzierung des kumulierten Primärenergieaufwandes unter das Niveau der in dieser Arbeit gemessenen Neumaschine.
- Der Wasserverbrauch in der Nutzungsphase kann durch den Einsatz der Microcontroller-Steuerung deutlich reduziert werden, jedoch nicht bis auf das Niveau der Neumaschine.
- Der Einbau eines Jetsystems hat nur marginale Auswirkungen auf den Wasserverbrauch und führt zu keiner Ansenkung des Stromverbrauchs, da das Umwälzsystem selbst Strom benötigt.
- Sofern die Aufarbeitungsvarianten im Vergleich zur sonst üblichen nicht verbrauchsoptimierten Aufarbeitung den Verkauf von Altmaschinen fördern, kann zusätzlich Abfall eingespart werden.

Das Modellprojekt konnte zeigen, dass durch verschiedene technische Maßnahmen gebrauchte Waschmaschinen energieeffizienter aufgearbeitet werden können. Die Senkung von Strom- und Wasserverbrauch ist primär durch den Einbau einer neuen und auf die Anforderungen gebrauchter Waschmaschinen angepassten Microcontroller-Steuerung möglich. Ein Prototyp demonstriert die technische Machbarkeit einer energieeffizienten Aufarbeitung von gebrauchten Waschmaschinen. Auf den Austausch der Programmsteuerung durch eine Microcontroller-Steuerung wurde beim Deutschen Patentamt unter der Nr. 102 27 240.9-26 der Antrag auf die Erteilung eines Patents gestellt.

Die Zerlegung und Materialtrennung wurde von einem professionellen Filmeteam aufgenommen und soll als Grundlage für einen Lehr-Film dienen. In vielen sozialen Beschäftigungsbetrieben ist die Zerlegung und Materialtrennung von Haushaltsgroßgeräten ein Teil des Arbeitsfeldes. Für die Unterweisung der Mitarbeiter gibt es bis jetzt keine visuellen Lehrmaterialien. Zur Zeit wird ein Sponsor oder Auftraggeber gesucht, der bereit ist den Film vorzufinanzieren. Das Rohmaterial umfasst ca. 2 Stunden davon soll ein ca. 20 minütiger Film geschnitten werden.

Für die Bewertung der Ergebnisse sind weitere Aspekte bedeutsam:

- Die Tendenz geht zu elektronisch per Microcontroller gesteuerten Waschmaschinen. Bei AEG werden seit zwei Jahren fast ausschließlich Waschmaschinen mit elektro-

nischer Steuerung hergestellt. Der Anteil mechanischer Programmschaltwerke liegt bei AEG heute bei 5% bis 10%.

- Auswirkungen der technischen Maßnahmen auf die Gewährleistung der Funktion und die erwartbare Lebensdauer dürfen nicht vernachlässigt werden. Sie bedürfen weiterer intensiver Untersuchungen. Dabei wäre eine Beteiligung der Hersteller wünschenswert.
- Qualitätssicherung ist wichtig, um dem Kunden klare Leistungsmerkmale der aufgearbeiteten Waschmaschine gewährleisten zu können. Um den Aufwand möglichst niedrig zu halten, erscheint eine Spezialisierung auf bestimmte Modelle zweckmäßig.
- Sicherheitstechnische Gesichtspunkte sind zu beachten: Besonders die Einhaltung der VDE 100.
- Dauertests, wie sie beispielsweise AEG durchführt, wären wünschenswert, sind aber angesichts des geringen Durchsatzes bei Impuls Recycling nicht realisierbar (AEG produziert 800.000 Waschmaschinen/Jahr).

Für Recyclingbetriebe, Hersteller und Nutzer sind anhand der Ergebnisse des Modellprojektes folgende Empfehlungen zu geben:

Recyclingbetriebe

- Der Einbau des Microcontrollers führt zu einer vergleichsweise hohen Primärenergieeinsparung in Bezug auf den Kostenaufwand. Wird im Falle eines defekten Programmschaltwerkes im Austausch ein Microcontroller-Schaltwerk verwendet, so können bei größeren Stückzahlen die Kosten mit denen der konventionellen Aufarbeitung verglichen werden. Voraussetzung ist die Optimierung und Serienherstellung des Microcontrollers.
- In einer serienmäßiger Wiederaufarbeitung ist es sicherlich möglich die erforderlichen Arbeitsgänge ergonomisch zu optimieren und durch den Einsatz von Hilfsmitteln die benötigten Umrüstzeiten weiter zu reduzieren.
- Der Einbau eines Jet-Systems ist nicht zu empfehlen, da der ökologische Entlastungseffekt sehr gering ausfällt und die damit verbundenen Kosten nicht zu rechtfertigen sind.
- Warmwassereinspeisung ist ökologisch vorteilhaft. Die Nachrüstung mit Warmwasserventilen lohnt sich aber nur, wenn tatsächlich ein Bedarf besteht (selektiver Einbau auf Kundennachfrage). Der Einbau von Warmwasserventilen bei im

Gebrauch befindlichen mit Microcontroller-Schaltwerken umgerüsteten Waschmaschinen ist als zusätzliche Dienstleistung interessant.

- Bei geringen Differenzen des Stromverbrauchs zwischen Alt- und Neumaschine lohnt die Aufarbeitung nicht. Bei zu alten Maschinen ist der Aufwand sehr groß, um die Verbrauchsprofile der Neumaschine zu erreichen. Die Hauptpotenziale liegen bei den Maschinen mittleren Alters (7-10 Jahre).
- Für Recycling- und Reparaturbetriebe ist der Einbau von Microcontroller als Serviceleistung für Haushalte denkbar. In Frage kommen Reparaturfälle, bei denen das mechanische Schaltwerk defekt ist und ohnehin ausgetauscht werden muss. Voraussetzung ist eine Kooperation der Hersteller und die Beibehaltung der Produkthaftung des Herstellers. Dem stehen allerdings Bedenken seitens der Hersteller entgegen.

Hersteller von Waschmaschinen

- Hersteller können die Aufarbeitung durch eine zerlegungsgerechte und reparaturfreundliche Konstruktion unterstützen. Eine demontage- und reparaturgerechte Bauweise hält den Demontage-, Reparatur- und Aufrüstungsaufwand gering. Bei der getesteten Referenzmaschine Sigma 9140 war die Zerlegung ohne Zuhilfenahme von Spezialwerkzeug möglich. Der Großteil der Fraktionen ließ sich ohne Probleme trennen. Die für die komplette Zerlegung in Baukomponenten benötigte Zeit liegt deutlich unter einer halben Stunde. Erfahrungsgemäß ist aber bei vielen anderen Gebrauchtwaschmaschinen der Zerlegeaufwand höher.
- Für die Aufarbeitung eignen sich derzeit vor allem Waschmaschinen, die eine Nutzungszeit von sieben bis 10 Jahren hinter sich und eine Restlaufzeit von mindestens fünf Jahre vor sich haben. Durch eine konstruktive Auslegung der Waschmaschine auf längere Nutzungszyklen könnte das Wiederverwendungspotenzial von gebrauchten Waschmaschinen erhöht werden. Die derzeitige Verschiebung der Marktanteile zugunsten von billigeren Geräten läuft dem allerdings entgegen, so dass in dieser Konkurrenzsituation der Erhalt der bereits erreichten Qualitätsstandards als Aufgabe zu verstehen ist.
- Das Microcontroller-Schaltwerk eignet sich für den Servicebereich von Herstellern. Für den Fall, dass ein Programmschaltwerk defekt ist, kann dieses durch einen Microcontroller ausgetauscht werden. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn bei rationeller Serienfertigung das Microcontroller-Schaltwerk nur unwesentlich höhere Kosten verursacht. Kosten für die aufwendige Nachfertigung von Programmschaltwerken können durch Verwendung eines universellen Schaltwerks mit typespezifischen Adaptern vermindert werden.

Nutzer

- Sofern Kostensenkungsmöglichkeiten greifen und das Verkaufspreisniveau im wesentlichen gehalten wird, sind aufgearbeitete und mit Microcontroller ausgestattete Waschmaschinen für Nutzer eine echte Alternative zum Erwerb einer vergleichbaren Neumaschine. Allerdings sind Neumaschinen im Billigsegment unter 300€ kostenmäßig nicht erreichbar.
- Die Nachrüstung einer Waschmaschine mit Warmwasserventil kann sich aus ökologischer Sicht auch in der Nutzungsphase lohnen. Sie ist ökonomisch sinnvoll wenn ein Warmwasseranschluss vorhanden oder geplant ist. Das Umweltentlastungspotenzial ist bei Kopplung mit Energie aus Blockheizkraftwerken und Solaranlagen besonders hoch.
- Die Wahl der Waschtemperatur ist häufig ausschlaggebender für den Stromverbrauch als die Wahl der Waschmaschine (ob neu, alt oder aufgearbeitet). Nicht nur das Alter, sondern auch die Anzahl der Waschzyklen beeinflusst den Energieverbrauch. Deshalb prägen auch verschieden intensive Nutzungsformen die ökologische Nettobilanz.

Die in dieser Studie gesammelten Erfahrungen beziehen sich in erster Linie auf Haushaltswaschmaschinen. Es ist zu überlegen, ob sich mit dieser Methode auch Gewerbegeräte modifizieren lassen. Bei diesen Geräten ist der ökologische und ökonomische Nutzen durch die höhere Nutzungsintensität deutlich höher. Gleichzeitig ist die Begrenzung auf wenige Modelle von Vorteil. Ein weiteres Einsatzgebiet könnte sich aus dem Export der Umrüstungstechnik und entsprechender Gewerbegeräte in Länder der sogenannten Dritten Welt ergeben. Da es für diese Länder oft nicht möglich ist Neugeräte zu beschaffen, zeichnen sich gegenüber dem Einsatz von nichtmodifizierten Geräten deutliche Einsparungspotenziale ab.

7 Literaturverzeichnis

- [Buw02] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDWIRTSCHAFT SCHWEIZ:
Analyse du cycle d’approvisionnement en eau et récupération d’eau de pluie. Documents Environnement n° 147. Bern 2002
- [Ebl03] EBLE: Mündliche Mitteilung von Herrn Eble (Fa. ZEUS, Kehl) am 17.03.2003
- [Ele95] ELECTROLUX: Customer Satisfaction Survey. Elektrolux 1995, ausgewählte Ergebnisse verfügbar unter <http://electrolux.com/node1008.asp>, Stand 04.09.2002
- [Mie00] MIELE: Miele Umweltbericht 2000, Miele Gütersloh 2000
- [Öko96] ÖKO-INSTITUT: STRUBEL, V.; GENSCH, C.-O.: Nutzen statt Besitzen - orientierende ökologische Abschätzungen für Waschmaschinen Wäschetrockner und Rasenmäher. Öko-Institut, Freiburg 1996
- [IZT98] BEHRENDT, S.; KREIBICH, R.; LUNDIE, S.; PFITZNER, R.; SCHARP, M.: Ökobilanzierung komplexer Elektronikprodukte. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Springer Verlag, Heidelberg 1998
- [Pro03] UMWELTBUNDESAMT: Prozessorientierte Basisdaten zum Umweltmanagement. Datenbank des Umweltbundesamtes. Verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/baum.htm>, Stand: 26.03.2003
- [Psr01]: Product-specific requirements – Household Washing Machines and Household Dishwashers. The Swedish Management Council, Version 1.0, 2001-11-21

8 Anhang

8.1 Zusammensetzung der Referenzmaschine

Die folgenden Tabellen zeigen die Zusammensetzung der neuen Referenzmaschine Sigma 9140. Grundlage bildet die Demontage des Gerätes und die Ermittlung der Gewichtsanteile der Materialfraktionen.

Tabelle 8-1: Zusammensetzung nach Grobfraktionen

	Materialgruppe	Gewicht in g	%	Gesamt in g
Plastik	Plastik	5067,35	99,98	
	Metall	0,78	0,02	5.068,13
Metall	Plastik	1,14	0,05	
	Metall	2429,15	99,95	2.430,29
Schläuche	Plastik	2203,64	93,24	
	Metall	159,71	6,76	2.363,35
Elektronik	Plastik	1030,36	53,87	
	Metall	455,88	23,84	
	Elektronik	426,39	22,29	1.912,63
Pumpen	Plastik	621,98	8,10	
	Metall	7052,90	91,90	7.674,88
Gehäuse	Plastik	9898,20	25,96	
	Metall	28232,59	74,04	38.130,79
Sonstiges	Plastik	1026,97	5,54	
	Metall	260,76	1,41	
	Glas	1744,26	9,40	
	Keramik	81,35	0,44	
	Fett	12,40	0,07	
	Beton	15423,25	83,15	18.548,99

Summe:	76.129,06
Gemessen:	76.450,00
Absolute Differenz: ¹	320,94
Ungenauigkeit in %	0,42

¹ vermutlich Restwasser

Tabelle 8-2: Aufschlüsselung Metallfraktion

Anz.		Materialgruppe	Materialien	Gewicht in g	%	Gesamt
1	Federn	Metall	Federstahl	78,10	100	78,10
1	Türhaken	Metall	Aludruckguss	11,80	100	11,80
2	Edelstahlschrauben	Metall	Edelstahl	2,05	100	4,10
1	Eisenschrauben	Metall	Eisen	722,62	100	722,62
2	Federn Trommelaufhängung	Metall	Federstahl	170,70	100	341,40
2	Federschoner	Plastik	k.A. (Nylon)	0,57	100	1,14
1	Federn an der Manschette (2 Stk)	Metall	Federstahl	70,00	100	70,00
1	Antriebsrad an der Trommel	Metall	G 20A 13/16	430,00	100	430,00
1	Türscharnier	Metall	Zn Al4 Cu1	174,50	100	174,50
1	Lager gegenüber der Trommel	Metall	k.A.	195,25	100	195,25
1	Lager an der Trommel	Metall	k.A.	292,50	100	292,50
2	Winkel für die Deckelbefestigung	Metall	Stahlblech	10,44	100	20,88
2	Federaufhängung	Metall	Stahlblech	44,00	100	88,00
				Summe :		2.430,29

Tabelle 8-3: Aufschlüsselung Kunststofffraktion

Anz.		Materialgruppe	Materialien	Gewicht in g	%	Gesamt
1	Kabelhalterung	Plastik	k.A.	2,14	100	2,14
1	Kabelhalterung	Plastik	PP	6,35	100	6,35
1	Verschluss Flusensieb	Plastik	k.A.	40,35	100	40,35
4	Haltebolzen Stoßdämpfer	Plastik	k.A.	7,60	100	30,40
2	Deckelhalter	Plastik	k.A.	2,26	100	4,52
1	Luftfalle	Plastik	PP	24,38	100	24,38
1	Abdeckung Heizungsanschluss	Plastik	PA	11,35	100	11,35
1	Türschloss	Plastik	PP	24,53	100	24,53
1	Halterung Zulauf	Plastik	k.A. (soft)	12,20	100	12,20
1	Türöffner	Plastik	k.A.	2,10	100	2,10
1	Wählschalter	Plastik	k.A.	12,14	100	12,14
2	Hülsen	Plastik	k.A.	0,39	100	0,78
1	Halterung Zulauf	Plastik	k.A.	2,41	100	2,41
1	Tasten (8 Stk.)	Plastik	k.A. (ABS)	13,60	100	13,60
1	Federblock für die Tasten	Plastik	k.A.	20,70	100	20,70
1	Lichtwellenleiter für die LEDs	Plastik	k.A. (PMMA)	15,80	100	15,80
1	Drehknopf Achse	Plastik	k.A. (ABS)	34,95	44,18	15,44
1	Drehknopf farbige Unterlage	Plastik	k.A.	34,95	26,44	9,24
1	Drehknopf Unterlage	Plastik	k.A.	34,95	26,41	9,23
1	Drehknopf Stopfen	Plastik	k.A.	34,95	2,98	1,04
1	Display Lichtwellenleiter	Plastik	k.A. (PMMA)	17,43	35	6,10
1	Display Lichtwellenleiter	Plastik	k.A. (ABS)	17,43	65	11,33

1	Schwimmer von dem Aquastop	Plastik	EPS	4,58	100	4,58
1	Kunststoffblende vom Türschloss	Plastik	POM	12,10	100	12,10
1	Kleine Abdeckung	Plastik	k.A.	25,60	100	25,60
1	Große Abdeckung	Plastik	k.A.	37,00	100	37,00
1	Kabelbinder (5 Stk.)	Plastik	k.A. (Nylon)	2,00	100	2,00
2	Spannringe	Plastik	k.A.	6,45	100	12,90
1	Kabelhalterung	Plastik	k.A.	3,55	100	3,55
1	Schubladengehäuse	Plastik	PP-K40	993,15	100	993,15
1	Schublade	Plastik	PP-K40	408,00	100	408,00
1	Schubladenblende	Plastik	k.A. (ABS)	158,00	100	158,00
1	Feder in der Schublade	Metall	Federstahl	0,78	100	0,78
1	Frontblende oben	Plastik	k.A. (ABS)	346,33	100	346,33
1	Gewicht	Plastik	PP-K75-85	1710,71	100	1.710,71
1	Frontblende unten	Plastik	ABS	283,00	100	283,00
1	Tür Außenblende	Plastik	ABS	363,29	100	363,29
1	Tür Innenblende	Plastik	k.A. (ABS)	244,31	100	244,31
1	Blende Auslass unten	Plastik	ABS	70,20	100	70,20
2	Kabelbaumhalterung	Plastik	PP	19,00	100	38,00
1	Rohrflansch	Plastik	PP-KV40	48,90	100	48,90
1	Türgriff	Plastik	ABS	29,60	100	29,60
				Summe :		5.068,13

Tabelle 8-4: Aufschlüsselung Schläuche und Dichtungen

Anz.		Materialgruppe	Materialien	Gewicht in g	%	Gesamt
1	Verbindungsschlauch Bullauge Trommel	Plastik	EPDM	934,62	100	934,62
2	Schläuche von der Luftfalle	Plastik	k.A. (Gummi)	25,80	100	51,60
2	Dämpfer	Plastik	Schaumstoff	2,15	100	4,30
1	Simmerring	Plastik	RWD-Combi	70,00	100	70,00
1	Antriebsriemen	Plastik	k.A.	43,50	100	43,50
1	Dichtung Trommel	Plastik	k.A. (Silikon)	25,44	100	25,44
1	Schlauch Ablauf	Plastik	EPDM	246,12	100	246,12
1	Schlauch Zulauf	Plastik	k.A. (Gummi)	106,36	100	106,36
1	Schlauch Entlüftung	Plastik	k.A. (Gummi)	36,90	100	36,90
1	Dichtungsring am Ablauf	Plastik	k.A. (Gummi)	12,63	100	12,63
1	Dämpfer Laugenpumpe	Plastik	TPE	14,73	100	14,73
3	Dämpfer Laugenpumpe	Plastik	k.A. (Gummi)	1,00	100	3,00
1	Dichtung Umspülung	Plastik	EPDM	18,15	100	18,15
1	Dichtung Umspülung	Plastik	k.A. (Gummi)	3,20	100	3,20
1	Stopfen	Plastik	Schaumstoff	0,45	100	0,45
1	Abwasserschlauch intern	Plastik	TPE	110,20	15	16,53
1	Abwasserschlauch intern	Plastik	PP	110,20	85	93,67

1	Dämpfung vom internen Abwasser	Plastik	Schaumstoff	1,16	100	1,16
1	Abwasserschlauch extern	Plastik	TPE	134,70	10	13,47
1	Abwasserschlauch extern	Plastik	PP	134,70	90	121,23
1	Feder Halterung externer Abwasser	Metall	Federstahl	9,77	100	9,77
1	Umspülschlauch	Plastik	PP	36,71	80	29,37
1	Umspülschlauch	Plastik	TPE	36,71	20	7,34
1	Anschlusschlauch	Metall	Messing	499,81	30	149,94
1	Innenschlauch	Plastik	Gummi	499,81	30	149,94
1	Außenschlauch	Plastik	PP	499,81	30	149,94
1	Anschlüsse	Plastik	PP	499,81	10	49,98
				Summe :		2.363,35

Tabelle 8-5: Aufschlüsselung Elektronik und Schalter

Anz.		Materialgruppe	Materialien	Gewicht in g	%	Gesamt
2	Taster Aquastop	Metall	Eisen	8,05	50	8,05
2	Taster Aquastop	Plastik	k.A.	8,05	50	8,05
1	Gehäuse Aquastop	Plastik	PA-GF	28,43	100	28,43
1	Steuerung und Displayelektronik	Elektronik	Platine	36,78	100	36,78
1	Zu oben gehöriges Gehäuse	Plastik	ABS	80,00	100	80,00
1	Kondensator EN133200	Elektronik		151,53	95	143,95
1	Stecker des Kondensators	Plastik	k.A. (ABS)	151,53	5	7,58
1	Thermoschalter	Elektronik		9,00	90	8,10
1	Stecker des Thermoschalters	Plastik	k.A. (ABS)	9,00	10	0,90
1	Türverriegelung	Metall	Cu Fe	86,16	65	56,00
1	Türverriegelung	Plastik	k.A. (ABS)	86,16	35	30,16
1	Drehschalter	Elektronik		53,27	67	35,69
1	Gehäuse	Plastik	k.A.	53,27	33	17,58
1	Regelungsplatine	Elektronik	Platine	310,79	50	155,40
1	Gehäuse zur Regelungsplatine	Plastik	PP	310,79	50	155,40
1	Analoger Druckgeber	Plastik	Gummi	73,32	3,2	2,35
1	Analoger Druckgeber	Plastik	k.A.	73,32	83	60,86
1	Analoger Druckgeber	Elektronik	Platine	73,32	13,8	10,12
1	Digitaler Druckgeber	Plastik	k.A.	181,75	80	145,40
1	Digitaler Druckgeber	Elektronik	Platine	181,75	20	36,35
1	Netzkabel	Metall	Cu	238,60	40	95,44
1	Netzkabel	Plastik	k.A.	238,60	60	143,16
1	Netzkabelhalterung	Metall	Eisen	11,00	93	10,23
1	Netzkabelhalterung	Plastik	ASM	11,00	7	0,77
1	Kabelbaum	Metall	Cu	635,90	45	286,16
1	Kabelbaum	Plastik	k.A.	635,90	55	349,75
				Summe :		1.912,63

Tabelle 8-6: Aufschlüsselung Pumpen

Anz.		Materialgruppe	Materialien	Gewicht in g	%	Gesamt
2	Füße	Plastik	k.A. (Gummi)	0,89	100	1,78
6	Schrauben	Metall	Eisen	1,80	100	10,80
1	Feder	Metall	Federstahl	2,90	100	2,90
1	Haltefeder	Metall	Federstahl	1,00	100	1,00
1	Ablaufschlauch	Plastik	k.A. (PP)	17,34	80	13,87
1	Ablaufschlauch	Plastik	k.A. (TPE)	17,34	20	3,47
1	Hauptgehäuse	Plastik	PP	228,70	100	228,70
1	Anschlussflansch Umwälzpumpe	Plastik	PPT40	45,60	100	45,60
1	Dichtring	Plastik	k.A. (Gummi)	0,66	100	0,66
1	Oberes Gehäuse (blau)	Plastik	k.A.	13,78	100	13,78
1	Eisenkern	Metall	Eisen	222,90	100	222,90
1	Spule	Metall	Kupfer	106,21	95	100,90
1	Spule	Plastik	k.A. (PP)	106,21	5	5,31
1	Motorgehäuse	Plastik	k.A. (PP)	42,80	100	42,80
1	Antrieb	Plastik	k.A.	71,22	15	10,68
1	Antrieb	Metall	Edelstahl	71,22	5	3,56
1	Antrieb	Metall	Magnet	71,22	80	56,98
1	Oberes Gehäuse (blau)	Plastik	k.A.	9,40	100	9,40
1	Eisenkern	Metall	Eisen	228,20	100	228,20
1	Spule	Metall	Kupfer	117,00	95	111,15
1	Spule	Plastik	k.A. (PP)	117,00	5	5,85
1	Motorgehäuse	Plastik	k.A. (PP)	41,17	100	41,17
1	Antrieb	Plastik	k.A.	70,32	15	10,55
1	Antrieb	Metall	Edelstahl	70,32	5	3,52
1	Antrieb	Metall	Magnet	70,32	80	56,26
1	Antriebsrad vom Riemen	Metall	Eisen	65,16	100	65,16
1	Gehäuse vorne	Metall	Aludruckguss	292,67	100	292,67
2	Federn	Metall	Federstahl	0,75	100	1,50
1	Welle mit Spule, Eisenkern,...	Metall	Eisen	1692,88	60	1.015,73
1	Welle mit Spule, Eisenkern,...	Metall	Kupfer	1692,88	40	677,15
2	Graphitkontakte	Metall	Graphit	28,42	25	14,21
2	Graphitkontakte	Metall	Messing	28,42	50	28,42
2	Graphitkontakte	Plastik	PA666F-25	28,42	25	14,21
1	Elektronik	Plastik	k.A.	96,00	50	48,00
1	Elektronik	Metall	Eisen	96,00	50	48,00
1	Eisenmantel	Metall	Kupfer	3486,89	35	1.220,41
1	Eisenmantel	Metall	Eisen	3486,89	65	2.266,48
1	Gehäuse Rückwand	Metall	Aludruckguss	432,20	100	432,20
1	Deckel Tachogenerator	Plastik	PP-00	5,53	100	5,53
1	Steckerhalterung	Metall	Eisen	19,76	100	19,76

4	Schrauben lang	Metall	Eisen	12,11	100	48,44
4	Schrauben kurz	Metall	Eisen	1,00	100	4,00
1	Magnetventile	Plastik	PA66-6F30	241,23	30	72,37
1	Magnetventile	Plastik	Kunststoff	241,23	20	48,25
1	Magnetventile	Metall	Eisen	241,23	20	48,25
1	Magnetventile	Metall	Magnet	241,23	30	72,37
				Summe :		7.674,88

Tabelle 8-7: Aufschlüsselung Gehäuse

Anz.		Materialgruppe	Materialien	Gewicht in g	%	Gesamt
1	Rückwand	Metall	Eisen	1024,75	100	1.024,75
1	Transportsicherung	Metall	Eisen	587,56	100	587,56
1	Frontblende	Metall	Eisen	3174,60	100	3.174,60
1	Frontversteifung oben	Metall	Eisen	639,97	100	639,97
1	Frontversteifung unten	Metall	Eisen	711,91	100	711,91
1	Trommel	Metall	Eisen	5353,80	100	5.353,80
1	Gehäuse	Metall	Eisen	12460,00	100	12.460,00
1	Trommelgehäuse hinten	Metall	Eisen	8560,00	50	4.280,00
1	Trommelgehäuse hinten	Plastik	PP-K40	8560,00	50	4.280,00
1	Trommelgehäuse vorne	Plastik	PP-K40	2194,95	100	2.194,95
1	Deckel	Plastik	Kleber	3423,25	5	171,16
1	Deckel	Plastik	Melanin	3423,25	25	855,81
1	Deckel	Plastik	ABS	3423,25	70	2.396,28
				Summe :		38.130,79

Tabelle 8-8: Aufschlüsselung Sonstiges

Anz.		Materialgruppe	Materialien	Gewicht in g	%	Gesamt
1	Bullauge	Glas	Glas	1744,26	100	1.744,26
1	Werkzeug	Metall	Eisen/Stahl	50,58	20	10,12
1	Werkzeug	Plastik	PA	50,58	80	40,46
1	Heizspirale	Keramik	Keramik	271,15	30	81,35
1	Heizspirale	Metall	Edelstahl	271,15	30	81,35
1	Heizspirale	Metall	Messing	271,15	10	27,12
1	Heizspirale	Metall	Heizdraht	271,15	25	67,79
1	Heizspirale	Plastik	Gummi	271,15	5	13,56
2	Dämpfer	Plastik	Schaumstoff	124,00	5	12,40
2	Dämpfer	Plastik	PP-K	124,00	50	124,00
2	Dämpfer	Plastik	Gummi	124,00	10	24,80
2	Dämpfer	Fett	Fett	124,00	5	12,40
2	Dämpfer	Metall	Eisen	124,00	30	74,40

1	Betongewicht	Beton	Beton	16235,00	95	15.423,25
1	Betongewicht	Plastik	PP-K40	16235,00	5	811,75
1	Transportsicherung	Metall	Eisen	587,57	100	587,57
				Summe :		18.548,99

8.2 Fehlerrechnung

Energie

Bei der Fehlerberechnung der Energie ist zu beachten das es zu einem Messbereichwechsel kommt. Dadurch ändern sich die Toleranzen.

Toleranz: +/- (5% + 10 digit: d.h. 5% der aktuellen Anzeige und 10 Einheiten der letzten Dezimalstelle) bei 0-100W Messbereich
 +/- (5% + 5digit) bei 101- 4000W Messbereich

letzter Messwert bei dem die Leistung < 101 W: X
 erster Messwert bei dem die Leistung > 100 W: X+1
 Gesamtzahl der Messwerte: M
 gemessene Leistung: L
 obere Schranke für gemessene Energie: W_{Max}
 untere Schranke für gemessene Energie: W_{Min}
 gesamte Energie: W_{gesamt}
 maximale Gesamtabweichung der Energie: W_{Abweichung}
 prozentuale Gesamtabweichung der Energie: Abweichung

$$\sum_{i=1}^X a_i + \sum_{j=X+1}^M a_j = W_{Max}$$

$$\sum_{i=1}^X b_i + \sum_{j=X+1}^M b_j = W_{Min}$$

$$a_i = \frac{(L_i \cdot 1,05 + 10) \cdot 0,5s}{3600000}$$

$$b_i = \frac{(L_i \cdot 0,95 - 10) \cdot 0,5s}{3600000}$$

$$a_j = \frac{(L_j \cdot 1,05 + 5) \cdot 0,5s}{3600000}$$

$$b_j = \frac{(L_j \cdot 0,95 - 5) \cdot 0,5s}{3600000}$$

W_{gesamt} , W_{Max} und W_{Min} müssen unter Excel berechnet werden, da bei einer Messung zwischen 15000 – 20000 Einzelmesswerte aufgenommen werden.

$$W_{Abweichung} = \frac{W_{Max} - W_{Min}}{2}$$

$$Abweichung = \frac{W_{Abweichung}}{W_{gesamt}} \cdot 100\%$$

$$W_{Abweichung} = \frac{0,41kWh - 0,34kWh}{2} = \underline{0,03kWh}$$

$$Abweichung = \frac{0,03kWh}{0,38kWh} \cdot 100\% = \underline{7,89\%}$$

Temperatur

Toleranz: +/- (0,5% + 1 digit)

+/- 0,2K vom Sensor

obere Schranke der Temperatur:

 Max

untere Schranke der Temperatur:

 Min

maximale Gesamtabweichung der Temperatur:

 Abweichung

$$B = 3988 K$$

$$T_N = 298,15 K$$

$$R_N = 10 k\Omega$$

$$R_T = 17530 (\text{Messwert aus Excel})$$

untere Schranke :

$$17530 \Omega \cdot 1,005 = 17617,7 \Omega$$

$$17617,7 \Omega + 1 \text{ digit} = 17627,7 \Omega$$

$$\vartheta = \frac{B}{\ln(R_T / R_N) + B / T_N} - 273,15 K$$

$$\vartheta = \frac{3988 K}{\ln(17627,7 \Omega / 10 k\Omega) + 3988 K / 10 k\Omega} - 273,15 K = 12,88^\circ C$$

$$\vartheta_{Min} = 12,88^\circ C - 0,2^\circ C = \underline{12,68^\circ C}$$

obere Schranke :

$$17530 \Omega \cdot 0,995 = 17442,4 \Omega$$

$$17442,4 \Omega + 1 \text{ digit} = 17432,4 \Omega$$

$$\vartheta = \frac{3988 K}{\ln(17432,4 \Omega / 10 k\Omega) + 3988 K / 10 k\Omega} - 273,15 K = 13,11^\circ C$$

$$\vartheta_{Max} = 13,11^\circ C + 0,2^\circ C = \underline{13,31^\circ C}$$

$$\vartheta_{Abweichung} = \frac{\vartheta_{Max} - \vartheta_{Min}}{2}$$

$$\vartheta_{Abweichung} = \frac{13,31^\circ C - 12,68^\circ C}{2} = \underline{0,32 K}$$

Bei der höchsten Temperatur ($95,26^\circ C$) beträgt $\vartheta_{Abweichung} = \underline{0,42 K}$

Wasser

Toleranz: +/- 3% vom Messwert

$$8,22l \cdot 0,03 = \underline{0,25l}$$

$$137,02l \cdot 0,03 = \underline{4,11l}$$