FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE
WERKZEUGMASCHINENLABOR WZL DER RWTH AACHEN

TEWISol

Technisch-wirtschaftliche Optimierung von solarthermischen Kombianlagen
-Gesamtvorhaben-

Abschlussbericht

TEWISol

Technisch-wirtschaftliche Optimierung von solarthermischen Kombianlagen
-Gesamtvorhaben-

Akronym: *TEWISol*

An den Projektträger Jülich
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
BMWi / PTJ Aktenzeichen FKZ: 0325855A

Projektlaufzeit:
01.01.2016 – 30.06.2019

Projektpartner:
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Koordination Verbundprojekt)
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Koordinator und Ansprechpartner:
Dipl.-Ing. Axel Oliva
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2
D-79110 Freiburg
Tel: +49 (0)761-4588-5698
E-Mail: axel.oliva@ise.fraunhofer.de

Bearbeitung
Axel Oliva | Fraunhofer ISE (Projektleitung ISE)
Julia Schneeweis | Fraunhofer ISE
Wolfgang Kramer | Fraunhofer ISE
Christian Tönnes | Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Christian Dölle | Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Günther Schuh | Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Freiburg, den 19. Dezember 2019

stellvertretend für die Projektpartner

Axel Oliva
2019.12.19
14:14:47 +01'00'

Axel Oliva
Koordination Verbundprojekt

Danksagung

Das Forschungsprojekt *TEWISol* wird durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 0325855A betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wofür wir uns herzlich bedanken.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Danksagung **3**

Ansprechpartner **6**

Abkürzungsverzeichnis **7**

1 Kurzfassung **8**
1.1 Kurzfassung 8
1.2 Kurzfassung (Englisch) 8

2 Projektvorstellung **10**
2.1 Motivation und Projektziele 10
2.2 Aufbau und Methodik des Forschungsvorhabens 13

3 Charakterisierung und Klassifizierung von Heizungsanlagen mit dem Fokus auf solarthermische Kombianlagen **15**
3.1 Grundlagen solarthermischer Kombianlagen 15
3.2 Methodisches Vorgehen 16
3.3 Ergebnisse und Restriktionen 20

4 Methodenentwicklung zur wirtschaftlichen Bewertung **25**
4.1 Identifikation werthaltiger Anlagenkomponenten 25
4.2 Prozesskostenanalyse zur Identifikation von Kostentreibern 42
4.3 Exkurs: Komplexität solarthermischer Bauprojekte 55
4.4 Berechnung der Wärmegestehungskosten 57

5 Methodenentwicklung zur energetischen Bewertung Grundlagen **61**
5.2 Methodisches Vorgehen zur Simulation 67
5.3 Ergebnisse und Restriktionen 81

6 Vorgehensmodell zur Optimierung **95**

7 Überprüfung der Gesamtmethodik mit beispielhafter Ergebnisermittlung **97**

8 Öffentlichkeitsarbeit **103**
8.1 IEA SHC Task 54 "Price Reduction of Solar Thermal Systems" 103
8.2 Veröffentlichungen 105

9 Zusammenfassung **106**

Literaturverzeichnis **109**

Anhang **113**

A Funktionsstruktur einer solarthermischen Kombianlage **114**

B Produktstruktur einer solarthermischen Kombianlage für Wohnungsübergabestation **115**

C Produktstruktur einer solarthermischen Kombianlage für Frischwasserstation **116**

D Produktstruktur einer solarthermischen Kombianlage für Erwärmung im Trinkwasserspeicher **117**

E Dymola Gesamtmodell Zentrale TWW-Bereitung um Speicherladeprinzip (mit TWW-Speicher) 118

F Dymola Gesamtmodell zentrale TWW-Bereitung im Durchflussprinzip (mittels Frischwasserstation) 119

G Dymola Gesamtmodell dezentrale TWW-Bereitung im Durchflussprinzip (mittels Wohnungsübergabestationen) 120

H IEA SHC Task 54 Veröffentlichungen 121
I. Webinars 121
II. General Task Publications 121
III. Highlights 123
IV. Other 124

I Fragebogen zum paarweisen Vergleich 126

J Praxisleitfaden 129

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Axel Oliva

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2
D-79110 Freiburg
Tel.: +49 (0)761 / 4588-5698
E-Mail: axel.oliva@ise.fraunhofer.de

Christian Tönnes M.Sc. RWTH

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Lehrstuhl für Produktionssystematik
Cluster Produktionstechnik
Campus-Boulevard 30
D-52074 Aachen
Tel.: +49 (0)241 / 80-20617
E-Mail: c.toennes@wzl.rwth-aachen.de

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
dDF	Dezentrales System zur Erzeugung von TWW im Durchflussprinzip mittels einer Wohnungsübergabestation
IEA	Internationale Energieagentur
IEA SHC	IEA Solar Heating and Cooling Programme
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
ITW	Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
EnEV	Energieeinsparverordnung
ESTIF	European Solar Thermal Industry Federation
FTE	Full Time Equivalent - Vollzeitäquivalent (Ein FTE entspricht der Arbeitszeit eines Vollzeitangestellten)
LCoH	Levelized Cost of Heat (Wärmegestehungskosten)
LCoHC	Energiegestehungskosten für Heizung und Kühlung
MFH	Mehrfamlienhäuser
PI	Parameteridentifikation
PM-Regler	Proportionalmengenregler
PU	Polyurethan
TEWISol	Technisch-wirtschaftliche Optimierung von solarthermischen Kombianlagen, Akronym
TWW	Trinkwarmwasser
VBA	Visual Basic for Applications
WT	Wärmetauscher
WÜS	Wohnungsübergabestation
WÜT	Wärmeübertrager
WZL	Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen
zDF	Zentrales System zur Erzeugung von TWW im Durchflussprinzip mittels einer Frischwasserstation
zSL	Zentrales System zur Erzeugung von TWW im Durchflussprinzip mittels eines Speicherladesystems

1
Kurzfassung

1.1 Kurzfassung

Das Verbundprojekt *TEWISol* zwischen dem Fraunhofer ISE und dem Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen führt moderne Produktkostenoptimierung und Heizungstechnologie mit einem Fokus auf Solarthermie zusammen. Dabei werden Methoden der Wertanalyse, des Komplexitätsmanagements und der Prozesskostenanalyse mit zeitgemäßen Methoden der Anlagensimulation und der Messtechnik kombiniert und zum Einsatz gebracht.

Ziel ist es, durch die Verzahnung dieser Herangehensweisen eine Methodik zu schaffen, welche eine noch wirkungsvollere Identifizierung von Optimierungspotenzialen hinsichtlich des besten Preis-/Leistungsverhältnisses ermöglicht. Berücksichtigt wird hierbei die branchenweit gefasste komplette Wertschöpfungskette vom Komponentenlieferanten über den Systemhersteller, dem Großhändler bis zur Installation durch den Handwerker und der Betrachtung durch den Endkunden.

Optimierungskriterium ist die Minimierung der Vollkosten für den Kunden im Verhältnis zum Normsystemertrag bzw. der Nutzwärme. Als Ergebnis dieser Optimierung stellt sich für jeden in der Wertschöpfungskette beteiligten Akteur eine Kostensenkung ein. Die Betrachtung erfolgt hier über die Akteure Komponentenlieferant, Systemhersteller, Großhändler, dem Installateur und Endkunden, die alle im Folgenden aus ihrer Sicht betrachtet als „Kunden" bezeichnet werden.

Tests von Stiftung Warentest[1] und Ökotest[2] zeigen, dass heute trotz einer sehr großen System- und Preisvielfalt bei solarthermischen Kombianlagen relativ geringe Unterschiede im nutzbaren solarthermischen Ertrag existieren. Durch die Reduktion der Variantenvielfalt besteht folglich ein Kostensenkungspotenzial ohne wesentliche Ertragseinbußen, da die Hersteller höhere Skaleneffekte erzielen können. Durch eine kombinierte technisch-wirtschaftliche Optimierung ist deshalb beispielhaft an dieser Stelle eine signifikante Kostenreduktion erreichbar.

Der Arbeitsplan sieht vor, dass zunächst sowohl die wirtschaftlichen als auch die technischen Methoden von den jeweiligen wissenschaftlichen Partnern in Bezug auf die Anwendung für solarthermisch unterstützte Anlagen je nach Bedarf angepasst bzw. neu entwickelt werden. In einem zweiten Schritt werden beide Ansätze zusammengeführt, um daraus eine integrative Vorgehensweise der Optimierung zu generieren. Der Nachweis der Wirksamkeit der neuen Methodik wird durch die beispielhafte Anwendung bei zwei Partnern aus Industrie und Gewerbe nachgewiesen.

1.2 Kurzfassung (Englisch)

The joint research project Technological-economical optimization of solar thermal systems (short-title: *TEWISol*) combines excellence of two scientific Partners. One partner is the RWTH Aachen's Werkzeugmaschinenlabor WZL, a leader in modern product cost optimization, and the other partner is the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, an expert in solar thermal technology. Value analysis, management of complexity and process cost analysis are applied on the cost optimization side. Whereas on the technological side sophisticated methods of simulation and experimental tests are employed.

[1] Stiftung Warentest (2009), Sonne statt Öl und Gas.
[2] ÖkoTest (2010), Schön warm hier - Thermische Solaranlagen mit Heizungsunterstützung.

The main objective of the project is to establish an integrated technological-economical methodology based on the above mentioned methods in order to provide an even more efficient approach to identify the most promising potentials with regard to an optimum cost-performance ratio. An important aspect of this approach is the consideration of the complete process chain including component suppliers, system manufactures and installers.

The criterion of optimization is to minimize the ratio between full costs and the solar yield of the system. A 20 % cost reduction for the end consumer is expected to be achievable.

Consumer tests by Stiftung Warentest[3] and Ökotest[4] show that today's large variety on system layouts and costs is in contradiction to the relatively small differences in energetic performances. That means, that manufacturers can probably reduce product cost by reducing product variety and, therefore, using scaling effects without reducing energy efficiency significantly. Hence, an integrated technological-economical approach for cost reduction seems to be very promising.

[3] Stiftung Warentest (2009), Sonne statt Öl und Gas.
[4] ÖkoTest (2010), Schön warm hier - Thermische Solaranlagen mit Heizungsunterstützung.

2
Projektvorstellung

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die Motivation zum Projekt *TEWISol* sowie die Projektziele erläutert. Es folgt der zweite Abschnitt, der Informationen zum Aufbau des Forschungsvorhabens sowie der zugrundeliegenden Methodik enthält.

2.1 Motivation und Projektziele

Der Endenergieverbrauch privater Haushalte in Deutschland machte 2016 22,1 % des gesamten deutschen Endenergieverbrauchs aus. Davon entfielen 82,4 % auf die Raumheizung, weitere 17,19% auf die Warmwasserbereitung. Ein marginaler Endenergieanteil wird zur Realisierung von Raumkühlung aufgewandt.[5] Zum Erreichen der Klimaschutzziele muss daher nicht nur im Strom- und Mobilitätsbereich, sondern auch im Gebäudebereich die Energiewende möglichst bald erreicht werden.

Der Anteil der aus Erneuerbaren Energien erzeugten Wärme steigt seit 1995 an. Dennoch wird Wärme in Deutschland nach wie vor hauptsächlich aus fossilen Energieträgern, wie Braunkohle und Erdgas, gewonnen[6]. Die politischen Zielstellungen sehen unter anderem eine Reduktion der Treibhausgasemissionen zwischen 80 % und 95% bis 2050, bezogen auf den Wert im Jahr 1990, vor. Auch im Gebäudebestand wird also Klimaneutralität angestrebt. Außerdem soll der Primärenergiebedarf im Gebäudebereich bis 2050 ebenfalls um 80 % gegenüber 2008 gesenkt und der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Wärmebereitstellung erhöht werden.[7] Eine Minderung des Primärenergiebedarfs geht auch mit einer Effizienzsteigerung einher. Die International Energy Agency (IEA) gibt als Faktoren für den zukünftigen effizienten Einsatz von Energie erstens den technologischen Fortschritt, zweitens einen menschlichen Verhaltenswandel und drittens die Substitution von Brennstoffen an.[8]

Laut Angaben der Bundeszentrale für politische Bildung umfassen 35 % der Wohngebäude zwei oder mehr Wohnungen, sind also Mehrfamilienhäuser (MFH). Davon befinden sich in 49 % der Fälle zwei Wohnungen in einem MFH, 34 % der MFH enthalten drei bis sechs Wohnungen und 17 % sieben Wohnungen oder mehr.[9] Die Nutzung von Solarthermie als unterstützende Technologie zur Beheizung und Trinkwassererwärmung in MFH bietet daher ein enormes Potential zur Einsparung fossiler Brennstoffe und der damit verbundenen CO_2-Emissionen. Außerdem wird eine größere Unabhängigkeit von schwankenden Energiepreisen gewährleistet. Der jährliche Zubau von Solarthermie insgesamt ist in Deutschland jedoch seit 2009 fallend, wie die folgende Abbildung 2-1 zeigt.[10]

[5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018), Die Energie der Zukunft - Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende, S. 64.
[6] Umweltbundesamt: Energieverbrauch privater Haushalte, 2018, www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte [Zugriff am: 01.03.2019].
[7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018), Die Energie der Zukunft - Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende, S. 8.
[8] International Energy Agency: World Energy Outlook, 2012, www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2012_free.pdf [Zugriff am: 30.11.2018].
[9] Bundeszentrale für politische Bildung (2016), Auszug aus dem Datenreport 2016 - Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland, S. 259 f.
[10] Bundesverband Solarwirtschaft e.V.: Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie), 2018, hat www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/bsw_faktenblatt_st_2018_2.pdf [Zugriff am: 04.03.2019].

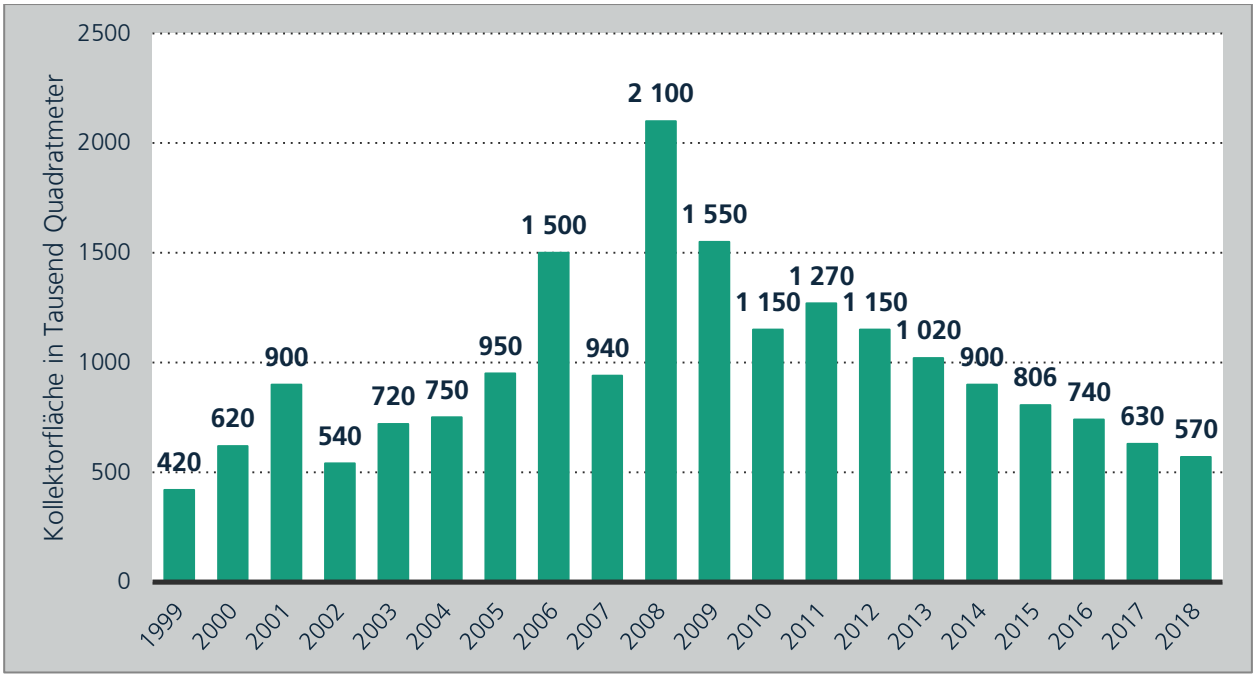


Abbildung 2-1: Solarthermie - Jährlich neu installierte Kollektorfläche in Deutschland in 1.000 m² (Datengrundlage: BSW-Solar)

Aus der Grafik ist ersichtlich, dass der Technologie Solarthermie ohne neue Impulse die Marginalisierung droht.

Das Projekt *TEWISol* hat daher die Zielstellung mittels einer branchenweiten gemeinsamen Aktivität von Industrie, Handwerk und Forschung eine beispielhafte Kostenreduzierung in der Solarthermie zu erwirken. Letztlich dient die Gesamtmethodik dazu, das Verhältnis von Energieertrag pro Kosteneinheit zu verbessern. Eine solche Verbesserung kann entweder durch die Steigerung der Systemeffizienz (auch über den solarthermischen Wärmeerzeuger hinaus) oder eine Kostensenkung für das Gesamtsystem über seine Wertschöpfungskette von der Entwicklung bis zur Installation erzielt werden. Es werden daher alle an dieser Wertschöpfungskette beteiligten Akteure betrachtet.

Der Herangehensweise nutzt sowohl Methoden der betriebswirtschaftlichen als auch der technischen Optimierung. Die Optimierungsmethodik umfasst folgende Teilmethoden:

1. Komplexitäts- und Variantenanalyse
2. Prozesskostenanalyse
3. Wertanalyse
4. Simulationsbasierte energetische Analyse
5. Systemertragsermittlung

Diese Methoden sind bereits bekannt und werden auf die branchen- und unternehmensspezifischen Anforderungen angepasst und entsprechend weiterentwickelt. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei auch die Zusammenführung und Harmonisierung der wirtschaftswissenschaftlichen und der technologischen Herangehensweise im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette von der Produktentwicklung bis zur Installation beim Endkunden. Dadurch entsteht ein neuartiger Methodenansatz zum Erreichen der genannten Zielstellung.

Im Rahmen der wirtschaftlichen Analyse eines solarthermischen Kombisystems wird auf Basis von zu identifizierenden Varianten- und Komplexitätskostentreibern neben einer Variantenanalyse der am Markt aktuell angebotenen solarthermischen Kombianlagen und der hieraus folgenden Ableitung von Optimierungsszenarien, hinsichtlich der Variantenvielfalt eine detaillierte Betrachtung aller indirekt und direkt in der gesamten Wertschöpfungskette anfallenden Kosten in Form einer Prozesskosten- bzw. Wertanalyse möglich. Ziel der hierfür aufgebauten Methodik ist eine Kostensen-

kung der Gesamtsysteme und somit eine deutliche Steigerung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses des Gesamtsystems einer solarthermischen Kombianlage.

Technische Grundlage der Methodenentwicklung ist die detaillierte normgerechte Vermessung von Komponenten und Systemen der an diesem Forschungsprojekt beteiligten Unternehmen sowie die Entwicklung bzw. Anpassung von validierten Simulationsmodellen.

Aufbauend auf den technischen und wirtschaftlichen Grundlagen können durch kombinierte energetische Systemsimulationen und Produktkostenoptimierung mit Hilfe der erarbeiteten Methodik preis-/leistungsoptimale Systemvarianten entwickelt werden.

Das Zusammenspiel der beiden Stellschrauben im Projekt *TEWISol* „Kosten" und „Leistung" zeigt Abbildung 2-2. Während heute Komplexitätskosten einen hohen Anteil an den Gesamtkosten haben, kann dieser durch die Anwendung der Prozesskostenanalyse zum Variantenmanagement gesenkt werden. Im Zusammenspiel mit einer Leistungsoptimierung steigen Energie- und Kosteneffizienz und damit auch die Attraktivität von z.B. solarthermischen Kombianlagen.

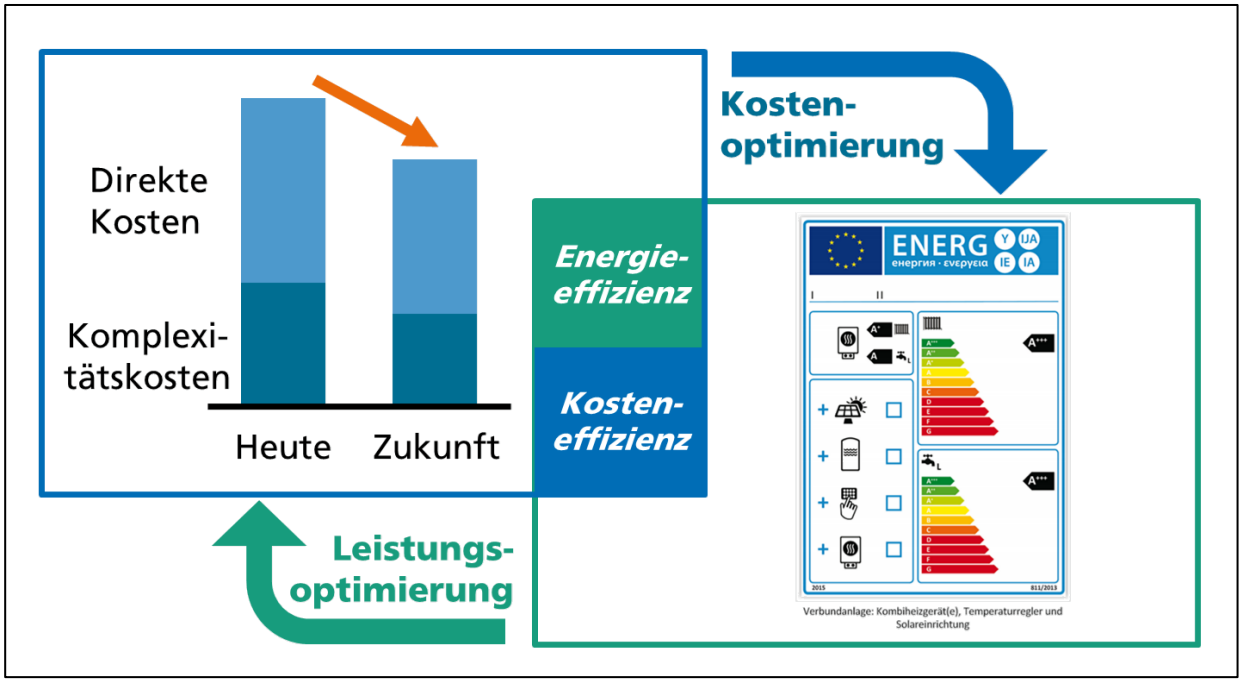


Abbildung 2-2: Schaubild Dimensionen *TEWISol*

Anhand von zwei beispielhaften Anwendungen der zu entwickelnden Gesamtmethodik mit Teilnehmern aus dem Kreis der Industriepartner wird das Funktionieren der Methodik erbracht.

Abbildung 2-3 verdeutlicht schematisch die gesamte Vorgehensweise zur Zielerreichung. Die Ausgestaltung solarthermischer Kombianlagen kann auf diversen Ebenen beeinflusst werden. Als die drei Hauptebenen werden das Produktportfolio, die Systemkonzeption und die Konstruktion von Komponenten identifiziert. Als Schlüsselkennzahl für die Bewertung solarthermischer Kombianalagen werden die Wärmegestehungskosten gewählt. Diese geben an wie hoch die Kosten sind, die die während der Lebensdauer durch die betrachtete Anlage gelieferte Energiemenge erzeugt. Entsprechend bilden die Wärmegestehungskosten das Verhältnis aus Kosten pro Leistungsfähigkeit (Nutzenergie) ab. Kostenseitig werden die Methoden der Funktionskostenanalyse und der Prozesskostenanalyse genutzt um die Wärmegestehungskosten zu reduzieren. Leistungsseitig werden eine simulationsbasierte energetische Analyse sowie die Ermittlung des Systemertrages durchgeführt. Alle vorgenommenen Aktivitäten beziehen sich auf die gesamte Wertschöpfungskette.

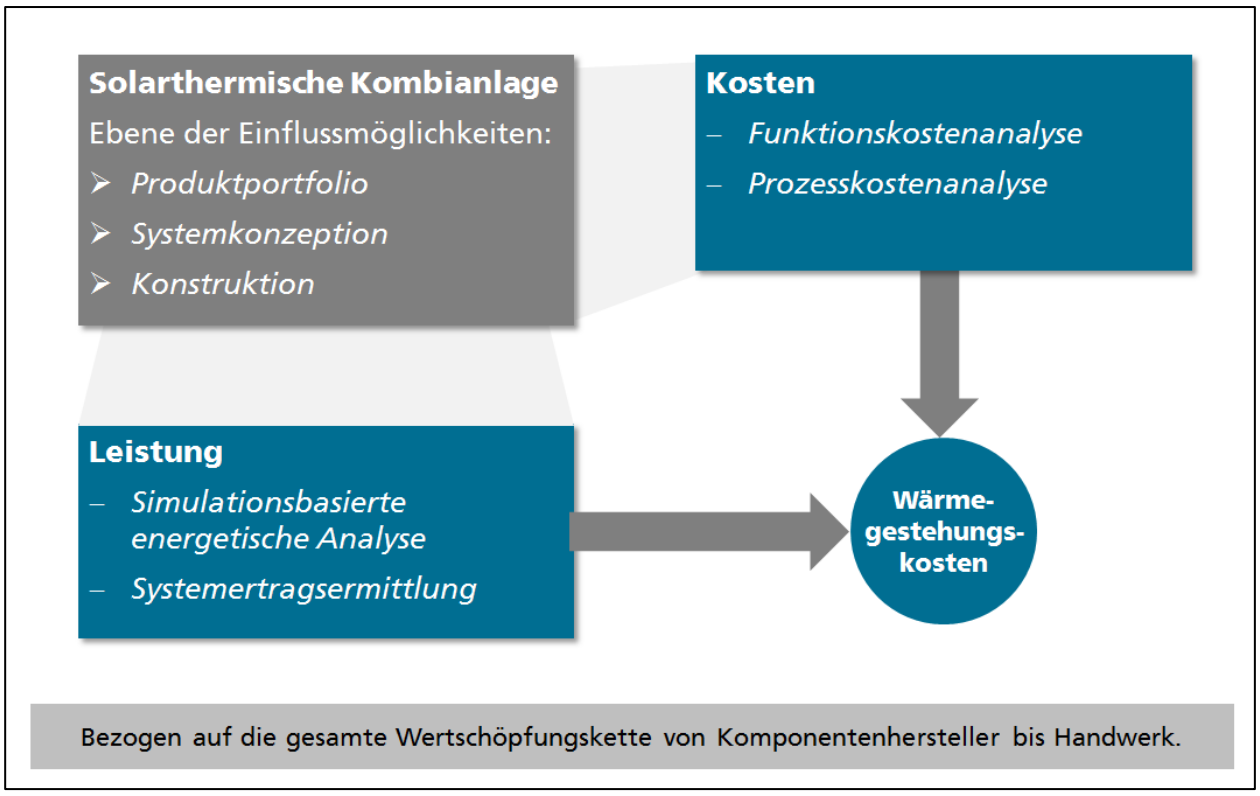


Abbildung 2-3: Methodenentwicklung *TEWISol*

2.2 Aufbau und Methodik des Forschungsvorhabens

Die folgende Abbildung 2-4 gibt einen Überblick über die Verteilung der Verantwortlichkeiten zwischen den Projektpartnern Fraunhofer ISE und Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen.

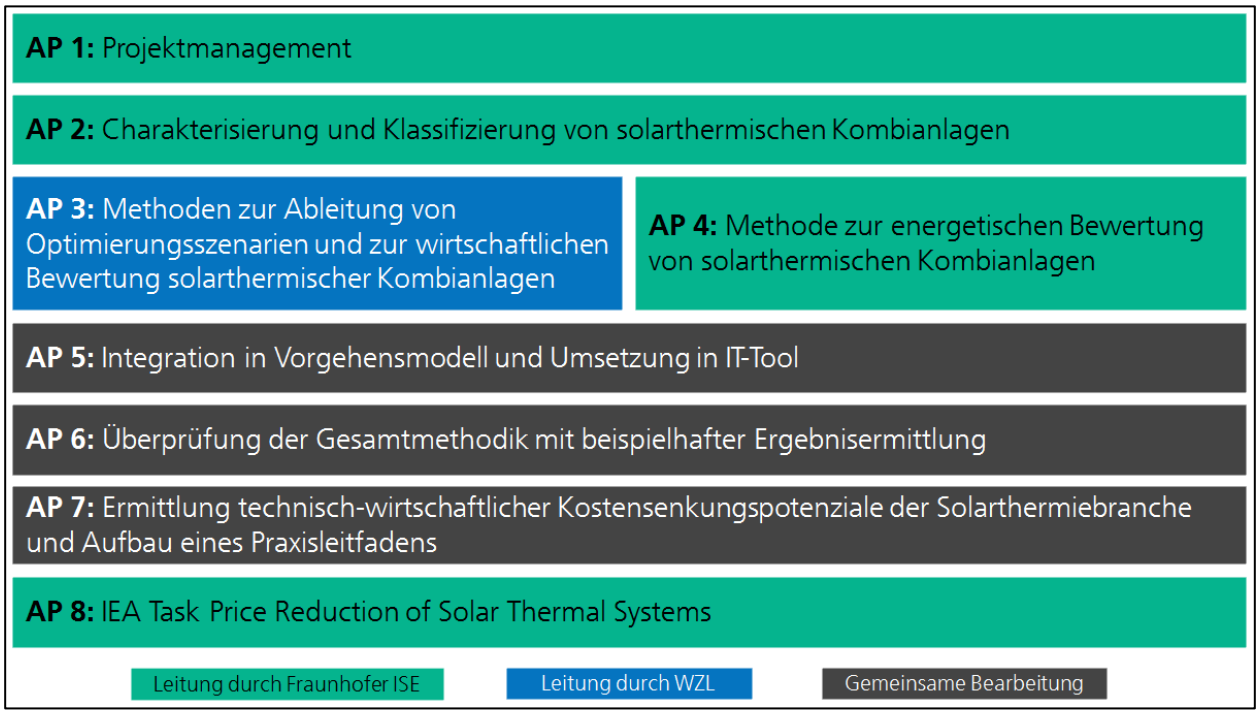


Abbildung 2-4: Arbeitspakete im Forschungsvorhaben

Die zu den jeweiligen Arbeitspaketen gehörigen Teilaufgaben, sowie die Zuständigkeiten der Projektpartner bei der Erledigung der Arbeitspakete beinhaltet Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: Arbeitsplan der Projektpartner

AP 1 Projektmanagement (ISE)	**AP 2 Charakterisierung und Klassifizierung von solarthermischen Kombianlagen (ISE)**	**AP 3 Methoden zur Ableitung von Optimierungs-szenarien und zur wirtschaftliche Bewertung (WZL)**	**AP 4 Methoden zur energetischen Bewertung (ISE)**	**AP 5 Integration in Vorgehensmodell und Umsetzung in einem IT-Tool (ISE)**	**AP 6 Überprüfung der Gesamtmethodik mit beispielhafter Ergebnisermittlung (ISE)**	**AP 7 Ermittlung technisch-wirtschaftlicher Kostenpotenziale der Solarthermiebranche und Aufbau eines Praxisleitfadens (ISE)**	**AP 8 IEA TASK "Price Reduction of Solar Thermal Systems" (ISE)**
		AP 3.1 Identifikation werthaltiger Anlagenkomponenten (WZL)	AP 4.1 Aufbau Simulationsmodelle Speicher, Regler, System (ISE)	AP 5.1 Vorgehensmodell (ISE)	AP 6.1 Erhebung aller für die Energieeffizienz relevanten Daten (ISE)	AP 7.1 Ermittlung der Kostenpotenziale für die Branche (ISE)	AP 8.1 Lead IEA Task "Price Reduction of Solar Thermal Systems" (ISE)
		AP 3.2 Prozesskostenanalyse zur Identifikation von Kostentreibern (WZL)	AP 4.2 Vermessung Komponenten (ISE)	AP 5.2 Aufbau Software Tool (ISE)	AP 6.2 Erhebung aller kostenrelevanten Daten (WZL)	AP 7.2 Aufbau eines Praxisleitfadens (WZL)	AP 8.2 Beiträge TEWISOL zum IEA Task "Price Reduction of Solar Thermal Systems" (ISE)
		AP 3.3 Methodik zur Ableitung von Optimierungs-szenarien für solarthermische Kombianlagen (WZL)			AP 6.3 Beispielhafte technisch-wirtschaftliche Optimierung (ISE)	AP 7.3 Studie (WZL)	

3
Charakterisierung und Klassifizierung von Heizungsanlagen mit dem Fokus auf solarthermische Kombianlagen

3.1 Grundlagen solarthermischer Kombianlagen

Solarthermische Kombianlagen dienen der Erwärmung von Trinkwasser sowie der Heizungsunterstützung. Sie bestehen grundsätzlich aus Solarkollektoren, einer Regeleinheit mit Pumpe, einem Wärmespeicher und einer Zusatzheizung.[11] In einemgeschlossenen Zwangsumlaufsystem wird das Wärmeträgermedium durch eine Pumpe zur Zirkulation gezwungen, da das Kollektorfeld auf dem Dach des Gebäudes und damit über dem Wärmespeicher angeordnet ist.

In dem thermischen Kollektor wird die Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt und an ein Wärmeträgermedium übergeben. Der Kollektorkreislauf wird von einer frostsicheren Flüssigkeit durchflossen während der Wärmetransport im Gebäude durch eine Heizflüssigkeit realisiert wird. Das Wärmeträgermedium im Solarkreislauf ist typischerweise ein Wasser-Glykol-Gemisch, dem auch Korrosionsschutz-Inhibitoren zugegeben werden.[12] Zum Ausgleich der Ausdehnung des Wärmeträgermediums ist ein Ausdehnungsgefäß vorzusehen. Das Ausdehnungsgefäß gleicht zudem den Druck aus, der bei Dampfbildung im Kollektor im Stagnationsfall entsteht.

Stagnation tritt ein, wenn die solare Wärmeerzeugung den Wärmeverbrauch so stark übersteigt, dass das System nicht mehr Wärme aufnehmen kann. Die Solaranlage schaltet dann automatisch in den Stagnationsmodus. Dabei steigt die Kollektortemperatur maximal bis zur Stagnationstemperatur an, wobei im Normalfall das Wärmeträgermedium anfängt zu verdampfen. Damit der problemlose Anlagenbetrieb zu jeder Zeit sichergestellt ist, sind die Sicherheitseinrichtungen auf diesen Extremfall auszulegen.[13]

Zwischen dem Solarkreislauf und dem restlichen Heizungssystem ist aufgrund der unterschiedlichen Wärmeträgermedien ein Wärmetauscher als Systemtrennung einzusetzen. Dieser kann entweder separat, als Plattenwärmetauscher, oder in Form einer Heizwendel im unteren Teil des Pufferspeichers ausgeführt sein.

Das Volumen des Pufferspeichers richtet sich vor allem nach der installierten Kollektorfläche, welche von der Gebäudebelegung und dem Verbrauch abhängig ist. Eine andere Zielgröße für die Auslegung des Pufferspeichers ist die vorgesehene Speicherdauer. Soll ein Speicher saisonale Schwankungen in der Wärmebereitstellung ausgleichen, werden bis zu 100.000 m³ große Saisonspeicher eingesetzt. Dies ist jedoch meist nur bei solaren Nahwärmenetzen der Fall. Für Speicher in Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung in Ein- oder Mehrfamilienhäusern sind 70 L Speichervolumen je m² Kollektorfläche die Regel.[14] Zur Verringerung der maximal gebrauchten Heizlast, sollen hierbei temporäre Bedarfsspitzen ausgeglichen werden.[15] Im Speicher selbst sollte durch eine temperaturabhängige Schichtung Verwirbelungen vorgebeugt werden. Die untere Schicht im Speicher, an die der Rücklauf des Solarkreises angeschlossen ist, sollte möglichst kalt sein, um den Wirkungsgrad der Solaranlage zu erhöhen.

[11] Viessmann Werke GmbH & Co. KG (2008), Planungshandbuch Solarthermie, S. 29 ff.
[12] Viessmann Werke GmbH & Co. KG (2008), Planungshandbuch Solarthermie, S. 30.
[13] Viessmann Werke GmbH & Co. KG (2008), Planungshandbuch Solarthermie.
[14] Reich und Reppich (2018), Regenerative Energietechnik.
[15] Wesselak (2017) Handbuch Regenerative Energietechnik, S. 39.

Im Rahmen des Projektes sind die am Markt angebotenen Systeme bezüglich der genutzten Technologien zu charakterisieren und in Klassen zusammen zu fassen. Die Zusammenfassungen sind in Kapitel 3.3 Ergebnisse und Restriktionen zu finden.

3.2 Methodisches Vorgehen

Es wird eine Analyse und Charakterisierung der am Markt verfügbaren Systeme und Varianten solarthermischer Kombianlagen durchgeführt. Für die typischerweise genutzten Merkmale werden Merkmalsbäume erstellt, die die Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten für die betrachteten Produkte zeigen sowie die unterschiedlichen Kundenanforderungen verdeutlichen. Varianten eines Produktes unterscheiden sich in der Ausprägung der zuvor definierten Merkmale. Kombinationsge- und verbote reduzieren dabei die Anzahl an möglichen Produktvarianten. Eine Darstellung der Kombinationsmöglichkeiten erfolgt in Form eines Merkmalsbaumes. Damit wird die externe Komplexität visualisiert. Als externe Komplexität werden die Marktanforderungen und die Kundenbedürfnisse bezeichnet. Durch einen Abgleich der abgebildeten Produktvarianten mit deren Verkaufszahl und der Beteiligung am Umsatz des Unternehmens zum Beispiel in Form einer ABC-Analyse, lassen sich beispielsweise Varianten ermitteln, die aus dem Produktportfolio entfernt werden könnten.

Zunächst erfolgt in Abbildung 3-3 bis Abbildung 3-7 eine baugruppenweise Betrachtung. In Abbildung 3-9 wird ein Ausschnitt aus dem Merkmalsbaum für das Gesamtsystem einer solarthermischen Kombianlage dargestellt.

Die Untersuchung der internen Komplexität als einer zweiten Perspektive für das Aufdecken von Optimierungspotentialen erfolgt in diesem Forschungsprojekt im AP3 „Methoden zur Ableitung von Optimierungsszenarien und zur wirtschaftlichen Bewertung solarthermischer Kombianlagen“ mittels Funktions- und Prozesskostenanalyse.

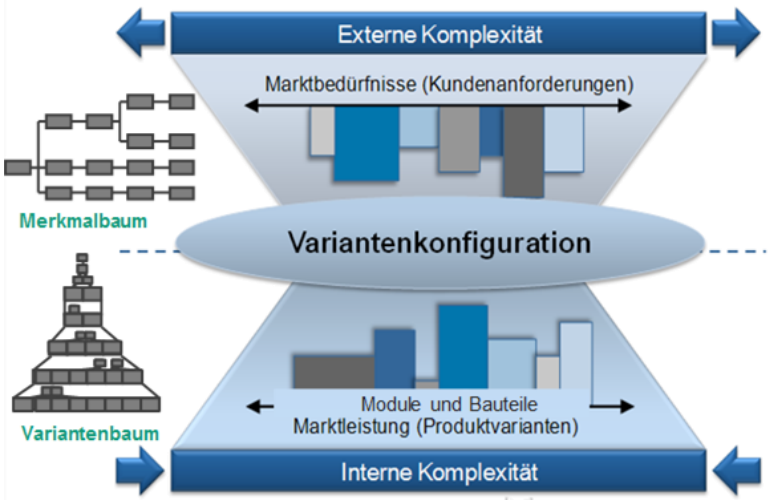


Abbildung 3-1: Gegenüberstellung externer und interner Komplexität

Zu einigen Baugruppen sind Einschränkungen und beim Erstellen der Merkmalsbäume getroffene Annahmen zu nennen, welche in diesem Abschnitt erläutert werden.

Thermische Kollektoren

Es werden Komponenten zur Anwendung im Niedertemperaturbereich für typische Heizungsanwendungen betrachtet. Daher sind konzentrierende und damit oft auch dampferzeugenden Komponenten nicht in der Analyse inbegriffen. Weiterhin werden auch keine unabgedeckten Kollekt-

oren mit an der Umgebungsluft frei liegendem Absorber (z.B. sogenannte Schwimmbadabsorber) berücksichtigt. Kollektoren, die nach dem Rollbond-Prinzip aus zwei aufeinander geschweißten Aluminiumblechen aufgebaut sind, werden auf Grund der geringen Verbreitung am Markt ebenfalls nicht weiter betrachtet. Für Flachkollektoren ergibt sich der in Abbildung 3-3 dargestellte Merkmalsbaum.

Regelung

Für Systeme zur Heizungsunterstützung eingesetzte Regler sind sehr oft relativ simpel aufgebaut. In den einfachsten Ausführungsvarianten besitzen diese Regler analoge Eingänge für Temperatursensoren sowie Impulseingänge mit denen Volumenstrommessteile abgegriffen werden können. Im Regler selbst sind dann feste Systemschemata hinterlegt, die für eine komplette Regelungslogik stehen. Durch Auswahl eines dieser Schemata werden die Ausgänge des Reglers in Abhängigkeit der Eingänge geschaltet. Pumpen, wie auch Ventile, erhalten dabei entweder eine Steuerspannung oder werden direkt über den Regler mit der erforderlichen Antriebsenergie versorgt.

Solarstation und weitere Peripherie

Die wesentlichen hydraulischen Komponenten, welche für den Betrieb des Kollektor- und Solarkreises erforderlich sind, werden in einer sogenannten Solarstation Seitens des Herstellers zusammengefasst und vormontiert. Darin sind auch alle sicherheitstechnischen Einrichtungen, wie ein Überdruck- und Überströmventil untergebracht. Dabei wird grundsätzlich in Systeme mit einem externen Wärmeübertrager sowie mit einem internen, im Speicher liegenden Wärmeübertrager unterscheiden (siehe Komponente Speicher). Die Pumpe oder Pumpengruppe wird dabei bei kleineren Leistungsklassen in der Regel ebenfalls vormontiert. Auch weitere Peripherie wie das Membranausdehnungsgefäß wird bei Systemen für kleinere Leistungsklassen vormontiert ausgeführt. Eine Klassifizierung der betrachteten Systeme findet sich in der folgenden Abbildung 3-5.

Frischwasserstationen

Die Frischwasserstation findet am Markt immer größere Verbreitung, da mit diesen Systemen das Trinkwasser im Durchflussprinzip erwärmt wird. Entgegen von Lösungen wie den Tank-in-Tank Systemen bleibt dabei sehr wenig Wasser im warmen Zustand stehen. Eine mögliche Keimbildung kann damit auf ein Minimum reduziert werden. Frischwasserstationen werden oft elektronisch mittels eines Durchflussmessers auf der Trinkwasserseite sowie einer darauf reagierenden Pumpe auf der Seite des Heizungswassers betrieben.

Wohnungsübergabestationen

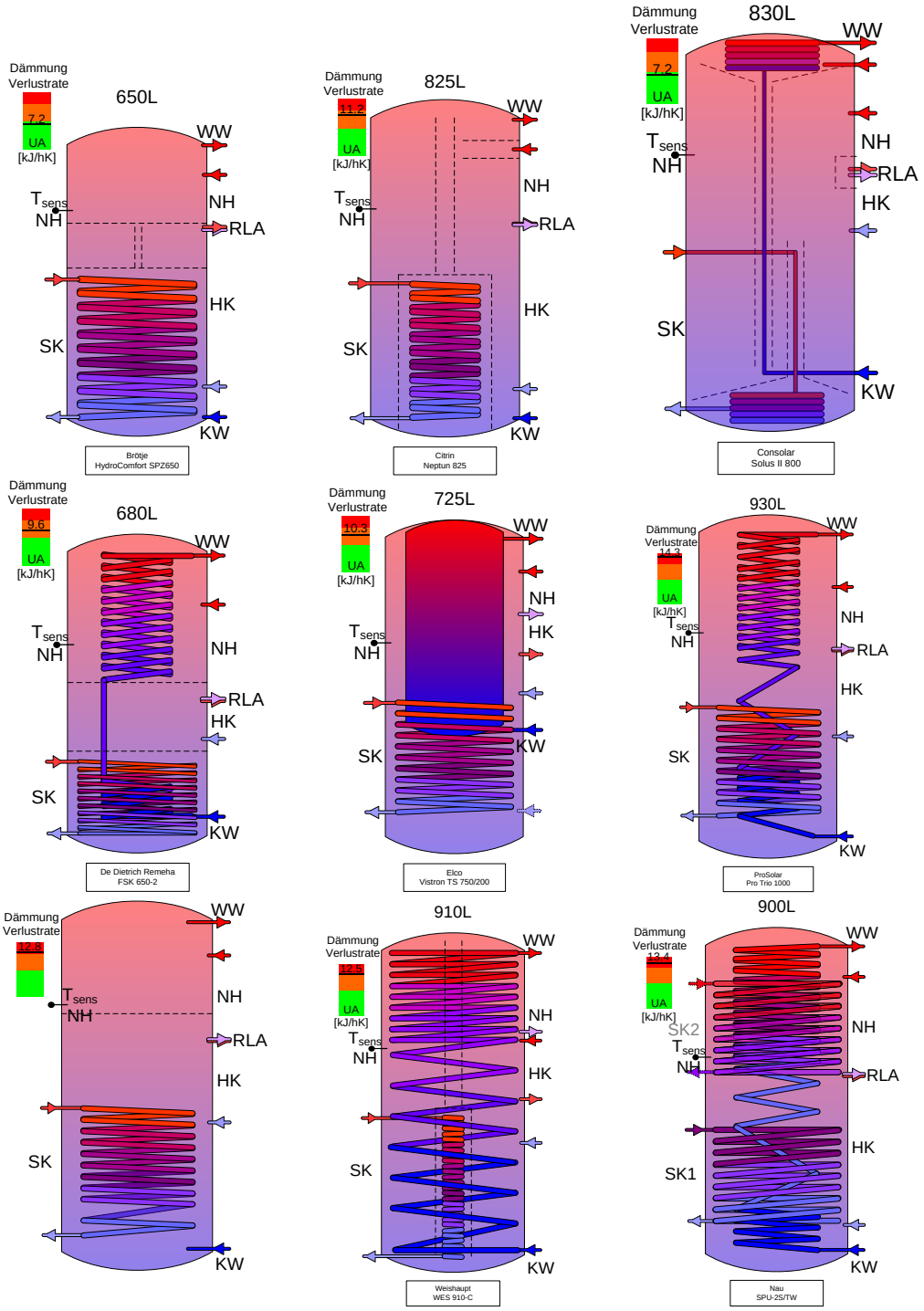
Auch die Wohnungsübergabestation findet am Markt immer größere Verbreitung, da mit diesen Systemen das Trinkwasser ebenfalls auf eine sehr hygienische Art im Durchflussprinzip erwärmt wird. Weiterhin stellt der geringe Trinkwasserinhalt des gesamten Verteilsystems einen weiteren Vorteil in diesem Punkt dar. Die Anbindung erfolgt dabei über die Versorgung der Heizkreise, so dass eine geringere Verrohrung für die Verteilkreise im Gebäude anfällt.

Wärmespeicher

Im Folgenden ist eine Zusammenstellung der Wärmespeicher dargestellt, welche im Rahmen der Studie ÖkoTest[16] durch das Fraunhofer ISE untersucht worden sind. Es wird dabei insbesondere auf

[16] ÖkoTest (2010), Schön warm hier - Thermische Solaranlagen mit Heizungsunterstützung.

die konstruktiven Unterschiede bezüglich dem Design und der Anordnung von innenliegenden Wärmeübertragern sowie von schichtungsunterstützenden Einrichtungen eingegangen. Die außen anliegende Wärmedämmung ist dabei nicht dargestellt.



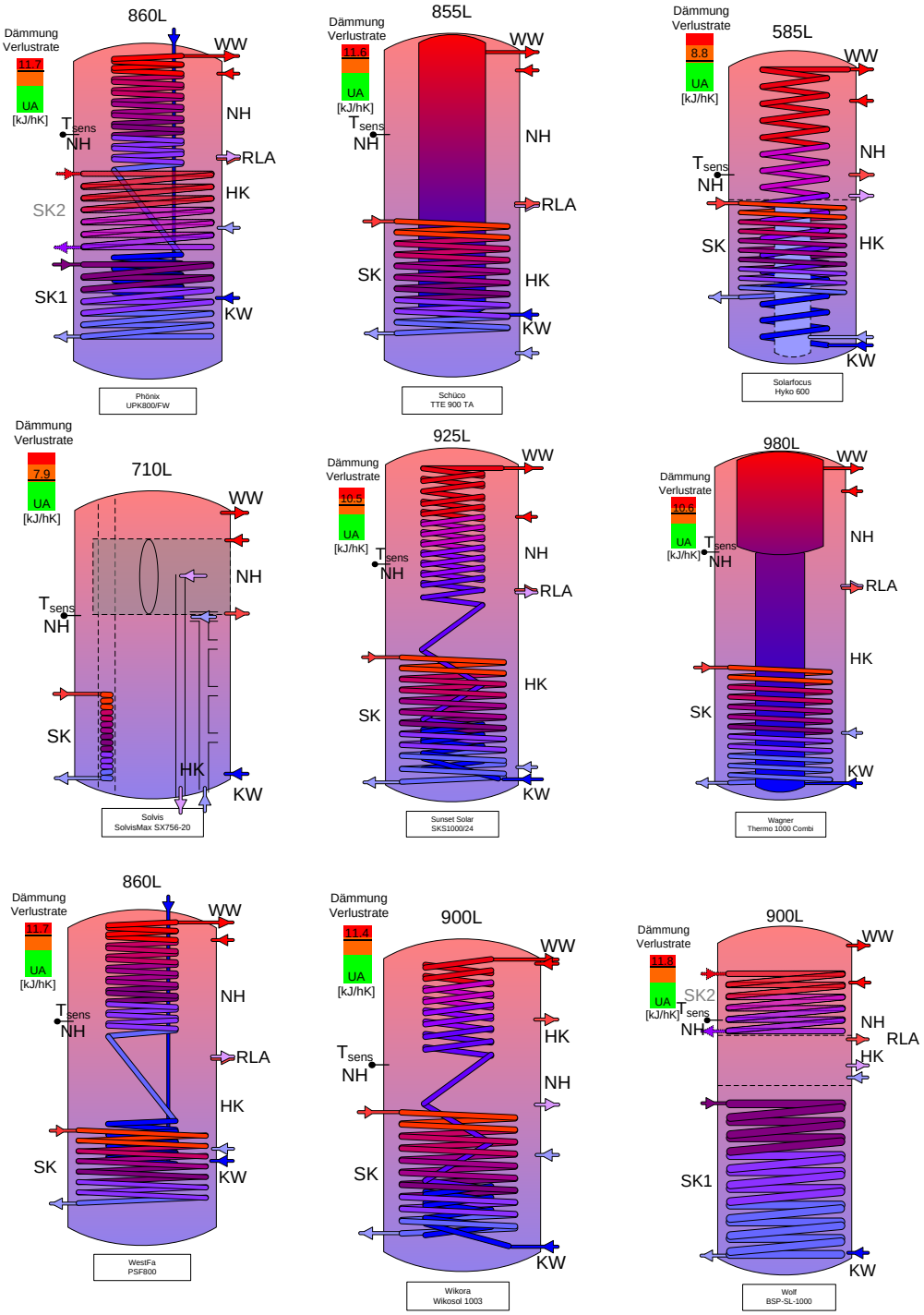


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der im Rahmen von ÖkoTest[17] untersuchten Warmwasserspeicher

Zusatzwärmeerzeuger

Um die Versorgungssicherheit in einem solarthermisch unterstützten System sicherzustellen, ist immer ein zusätzlicher Wärmeerzeuger erforderlich. Da diese Systeme in der Regel unabhängig vom solarthermischen System betrieben werden und auch deren hydraulische Integration bezüglich

[17] ÖkoTest (2010), Schön warm hier - Thermische Solaranlagen mit Heizungsunterstützung.

des Designs des solarthermischen Wärmeerzeugers nicht relevant ist, wird zu dieser Komponente keine detaillierte Darstellung erarbeitet.

3.3 Ergebnisse und Restriktionen

Für die Komponente Flachkollektor werden sechs Hauptmerkmale identifiziert. Dies sind die Verbindungstechnik, der Absorber, der Gehäusetyp, die Wärmedämmung, das Rohrregister sowie das Glas des Kollektors. Für das Merkmal Absorber werden die Untermerkmale Material und Beschichtung festgehalten. Die Struktur sowie die Ausprägung, die jedes der (Unter-) Merkmale annehmen kann, beinhaltet Abbildung 3-3.

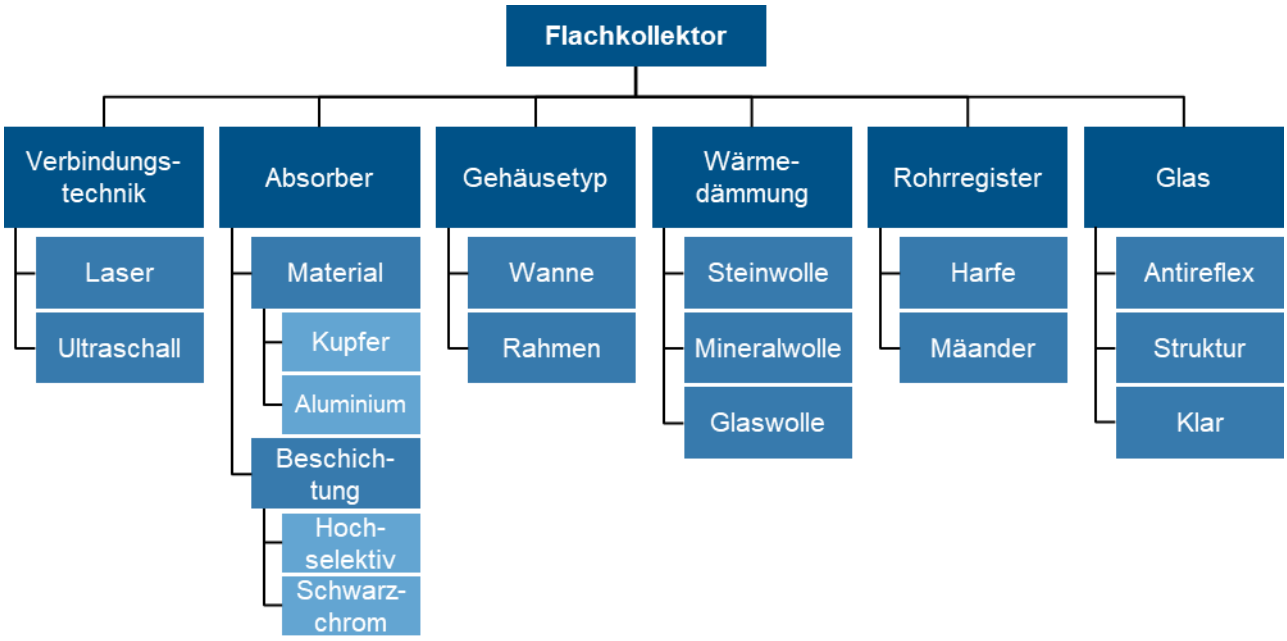


Abbildung 3-3: Klassifizierung der betrachteten thermischen Solarkollektoren[18]

Für Solarregler wird ein Merkmalsbaum ermittelt, der bis zu vier Ebenen beinhaltet, wie Abbildung 3-4 zeigt. Auf erster Ebene befinden sich die Hauptmerkmale „Hydraulikschemata" und „Schnittstellen". Hydraulikschemata können aus einem Pool vorprogrammierter Schemata ausgewählt oder individuell programmiert werden. Beim Merkmal Schnittstellen sind weitere Unterscheidungen notwendig. Es ist einerseits ein Informationsaustausch mit dem System (solarthermische Kombianlage) und andererseits mit dem Benutzer notwendig. Die Systemschnittstellen lassen sich durch die Anzahl analoger Eingänge und die Anzahl der Ausgänge zu regelbaren Aktoren charakterisieren. Für die Benutzerschnittstelle wird wiederum eine weitere Differenzierung eingeführt. Das Datenlogging erfolgt dezentral und extern in Form einer Cloud-basierten Anwendung. Die Visualisierung der für den Benutzer relevanten Daten kann über ein Display und / oder in einer Browseranwendung erfolgen.

[18] Sonne Wind und Wärme (2013), Marktübersicht Flachkollektoren, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 10, Bielefeld.

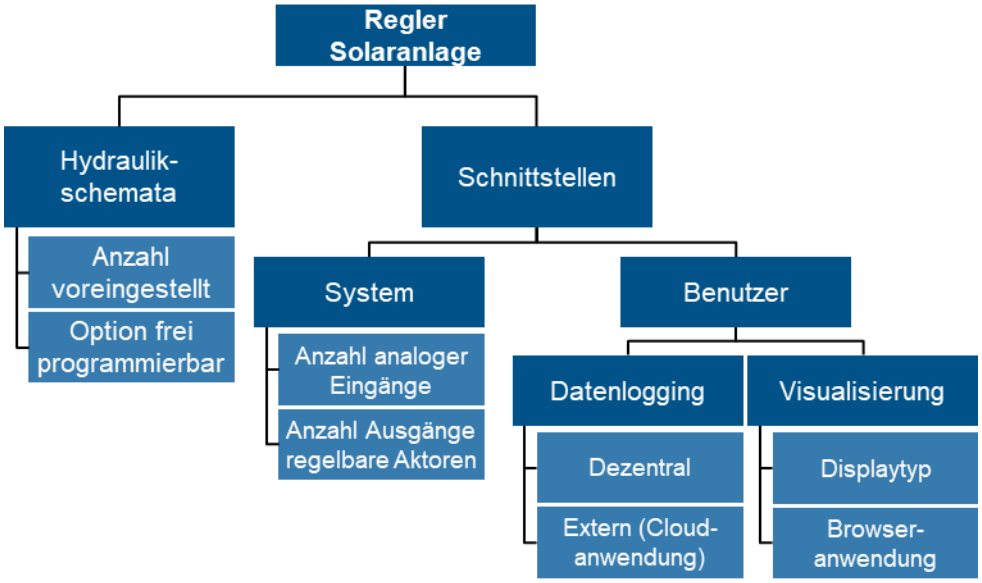


Abbildung 3-4: Klassifizierung der untersuchten Regler nach technischen Eigenschaften[19]

Solarstationen können mit einem Umschaltventil ausgestattet sein oder nicht. Auch für die Wärmemengenzählung gilt, dass einige Solarstationen diese Funktion erfüllen können und andere nicht. Für das Merkmal „Systemtrennung" gibt es am Markt auch zwei Varianten. Entweder es erfolgt eine Systemtrennung mittels einer Übergabestation die sich durch ihre Übertragungsleistung charakterisieren lässt oder die Übertragungsleistung wird direkt über die Solarstation abgegeben, das heißt es liegt keine Systemtrennung vor. Dies veranschaulicht Abbildung 3-5.

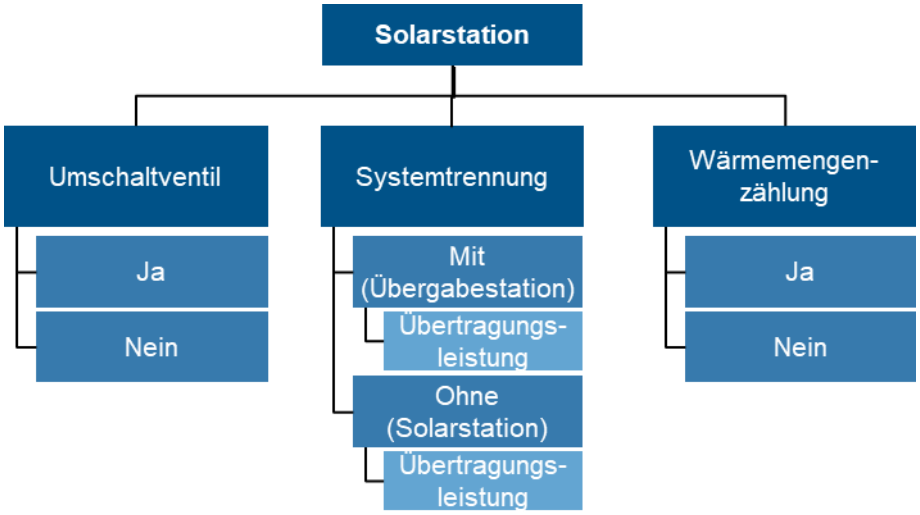


Abbildung 3-5: Klassifizierung der untersuchten Solar- und Übergabestationen[20]

Die hier betrachteten Frischwasserstationen unterscheiden sich grundsätzlich im Regelungsprinzip. Die Einstellung von Massenstrom und damit der Temperatur kann thermostatisch oder elektronisch realisiert werden. Ein weiteres von den Herstellern angegebenes Merkmal ist die Übertragungsleis-

[19] Sonne Wind und Wärme (2016), Marktübersicht Solarregler, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 03, Bielefeld.
[20] Sonne Wind und Wärme (2015), Marktübersicht Solarstationen, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 05, Bielefeld.

tung. Frischwasserstationen verfügen immer über eine Anbindung an die Zirkulationsleitung und können in Teilen auch im Rücklauf umschalten. Das Material des Wärmetauschers, der zur Trinkwassererwärmung im Durchflussprinzip benötigt wird, kann je nach Preis- und Hygieneanforderungen Messing, Kupfer oder Edelstahl sein. Einige Frischwasserstationen sind zu größeren Einheiten zusammenschaltbar. Abbildung 3-6 stellt den beschriebenen Merkmalsbaum dar.

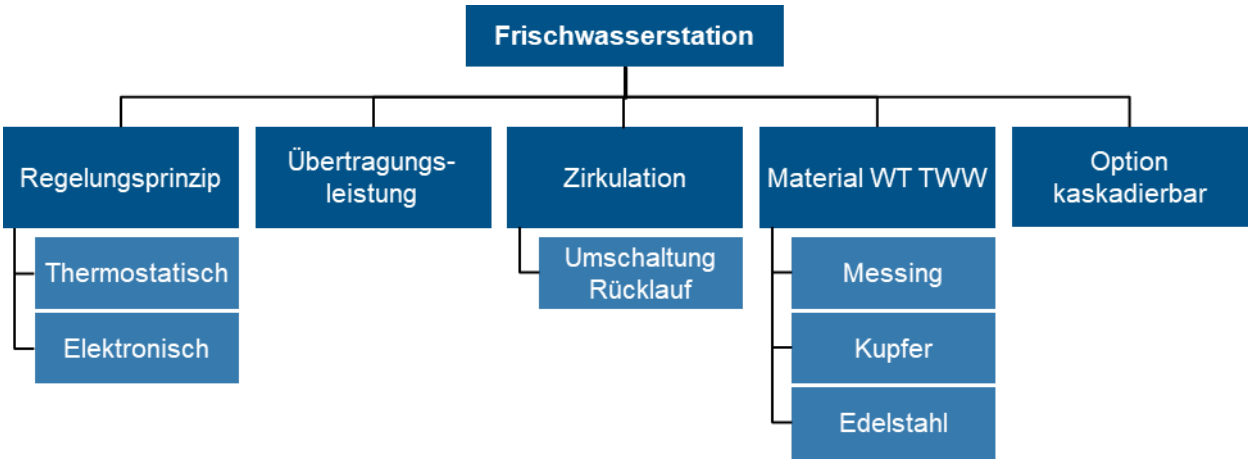


Abbildung 3-6: Klassifizierung der untersuchten Frischwasserstationen[21]

Für solarthermische Kombianlagen werden üblicherweise bivalente Wärmespeicher genutzt. Die diversen Merkmale eines solchen Speichers zeigt Abbildung 3-7. Bivalente Wärmespeicher verfügen über zwei Wärmetauscher. Es steht ein Wärmetauscher für die Einbindung des Solarkreises und ein Wärmeübertrager zum Anschluss der (konventionellen) Nachheizung zur Verfügung. Der Vorlauf des Solarkreises kann mit oder ohne Schichteinrichtung ausgestattet sein. Die Schichteinrichtung dient der Erzeugung eines für die Effizienz der Solaranlage optimalen Temperaturniveaus. Die an den Speicher abgegebene Wärme wird direkt zum Heizen genutzt und dient indirekt der Erwärmung des Trinkwassers. Trinkwarmwasser kann durch eine Tank-in-Tank-Bauweise oder in einer Edelstahl-Rohrwendel im Speicher selbst erzeugt werden oder extern mittels einer Frischwasserstation. Wie auch für den Vorlauf des Solarkreises, kann im Rücklauf des Trinkwarmwasser- bzw. des Heizkreises eine Einrichtung zur Temperaturschichtung, wie zum Beispiel eine Ladelanze, vorgesehen sein oder nicht.

[21] Sonne Wind und Wärme (2014), Marktübersicht Frischwasserstationen, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 10, Bielefeld.

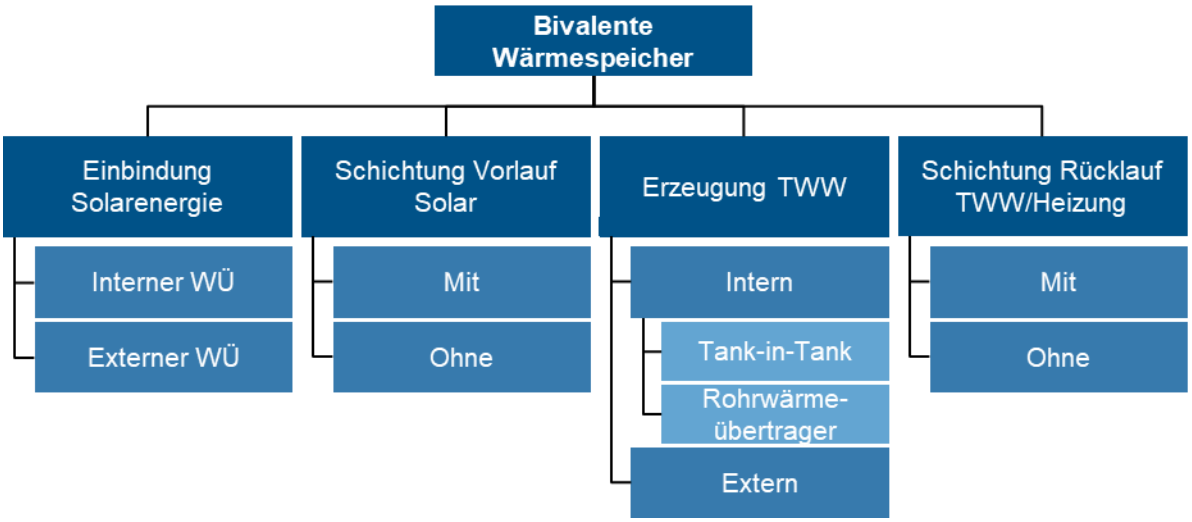


Abbildung 3-7: Klassifizierung der untersuchten bivalenten Warmwasserspeicher[22,23]

In der vorangegangenen Klassifizierung der bivalenten Warmwasserspeicher wird das Merkmal „Wärmedämmung" bewusst in den in Abbildung 3-8 folgenden Merkmalsbaum ausgegliedert. Die Wärmedämmung bestimmt essentiell die Wärmeverlusteigenschaften und auch die Montagemöglichkeiten des Speichers. Speicher können im Produktionsprozess mit einer in den Mantel ausgeschäumten Wärmedämmung versehen werden. Diese ist nicht abnehmbar und wird daher nur für Speicher mit kleinen Volumina verwendet. Eine abnehmbare Wärmedämmung ist für die Einbringung größerer Speicher im Heizungsraum notwendig. Diese kann aus Polyurethan Weich- oder Hartschaum oder aus Polyesterfaservlies gefertigt sein.

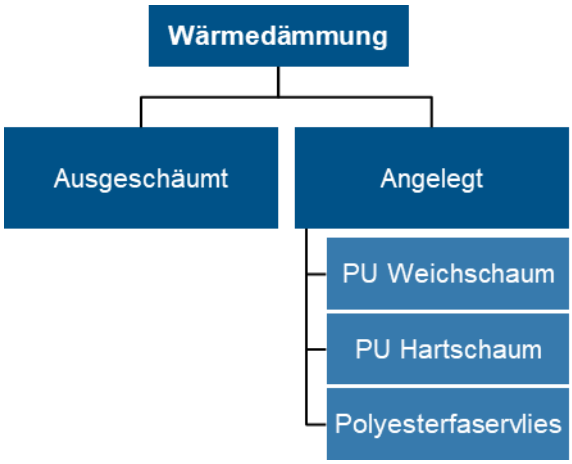


Abbildung 3-8: Klassifizierung der untersuchten Wärmedämmung für Warmwasserspeicher[24,25]

Einen umfassenden Blick auf die möglichen Merkmalsausprägungen für solarthermische Kombianlagen gibt die folgende Abbildung 3-9. Dabei werden die Ausprägungen und möglichen Kombinationsmöglichkeiten der sieben Hauptmerkmale Kollektorart, Kollektorfläche, Speichergröße, Spei-

[22] Sonne Wind und Wärme (2014), Marktübersicht Wärmespeicher, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 12, Bielefeld.
[23] ÖkoTest (2010), Schön warm hier - Thermische Solaranlagen mit Heizungsunterstützung.
[24] Sonne Wind und Wärme (2014), Marktübersicht Wärmespeicher, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 12, Bielefeld.
[25] ÖkoTest (2010), Schön warm hier - Thermische Solaranlagen mit Heizungsunterstützung.

cherart, Solarstation, TWW-Erzeugungsprinzip und TWW-Layout untersucht und anschließend visualisiert. Eine Erhöhung des Informationsgehaltes des Merkmalsbaumes kann durch das Hinzufügen von Marktdaten und Verkaufszahlen zu den einzelnen Kombinationspfaden aus der Unternehmenspraxis erreicht werden. Dies ist jedoch nicht der Fokus des Forschungsprojekts *TEWISol*.

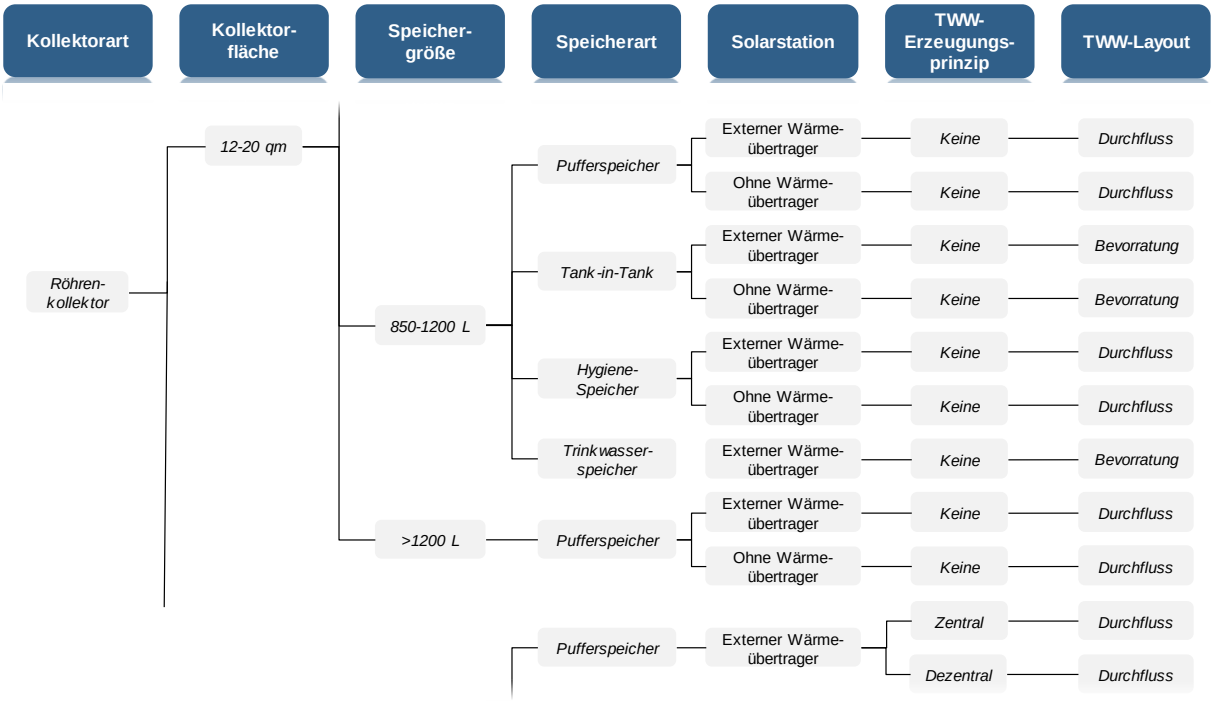


Abbildung 3-9: Ausschnitt aus dem Merkmalsbaum für solarthermische Kombisysteme

Im Projektverlauf zeigt sich, dass die erstellten Klassifizierungen in einem weiteren Iterationsvorgang zu überarbeiten sind. Hintergrund ist der, dass sich die weiter zu entwickelnden Kostenmodelle beim Verbundpartner WZL sehr stark auf Funktionen beziehen. Die Herangehensweise Seitens des ISE ist im hier dargestellten Schritt primär auf konstruktive Merkmale abgestellt. Es wird daher eine erweiterte Eingabe für ein Funktionsmodell seitens des ISE erarbeitet. Das Funktionsmodell wird dann in Kapitel 4 Methodenentwicklung zur wirtschaftlichen Bewertung aufgegriffen.

4
Methodenentwicklung zur wirtschaftlichen Bewertung

Im AP 3 wird der Fokus auf ökonomische Faktoren bei der Herstellung, dem Vertrieb sowie der Installation von solarthermischen Kombianlagen gelegt. Die wirtschaftliche Sichtweise wird aufgrund fallender Absatzzahlen und damit eines steigenden Wettbewerbs insbesondere für die Solarthermiebranche zunehmend wichtig.

Es werden die Methoden Funktionskostenanalyse (Kapitel 4.1) und Prozesskostenanalyse (Kapitel 4.2) angewandt und für die Solarthermiebranche weiterentwickelt. Diese beiden Methoden haben eine Senkung der Herstellungskosten sowie dem Entwurf einer Produktpalette, die den Kundenwünschen möglichst umfassend und effizient entgegenkommt, zum Ziel. Abschließend wird für einen monetären Vergleich der Gesamtkosten (inklusive bedarfs- und verbrauchsgebundener Kosten) unterschiedlicher Gesamtsysteme über einen festgelegten Betrachtungszeitraum die Kennzahl der Wärmegestehungskosten Kapitel 4.4) berechnet. Die genannten drei Verfahren werden in vorgestellten Grundlagenteilen grundsätzlich erklärt. Es folgt je Kapitel ein Abschnitt, der die Vorgehensweise im Forschungsprojekt *TEWISol* enthält. Abschließend werden die Ergebnisse und Restriktionen für jedes Verfahren aufgezeigt.

Der Fokus des AP 3 liegt auf ökonomischen Gesichtspunkten

- Indirekte Wertschöpfungskette ermitteln
- Wertanalyse
- Komplexitäts- und Variantenanalyse
- Prozesskostenanalyse
- Kunden: Handwerker, Vertrieb, Komponentenhersteller, Zulieferer, Systemanbieter
- Zielfunktion für Endkunde: Preis/Leistung
- Angelehnt an die Vorgehensweise in einer Kapitalwertmethode werden die optimierenden Maßnahmen beurteilt sowie der optimale Ersatzzeitpunkt bestimmt. (wie müssen Änderungen in einer Komponente gebündelt werden, um schnell hohe Stückzahlen im Markt zu erreichen)

4.1 Identifikation werthaltiger Anlagenkomponenten

4.1.1 Grundlagen der Funktionskostenanalyse

Das Bestreben der Umsatzmaximierung stellt Unternehmen inmitten des dynamischen Unternehmensumfelds, gekennzeichnet durch das fortschreitende Maß an Branchendiskontinuität, Globalisierung und Wettbewerbsintensität und dem damit einhergehenden Preisdruck, vor weitreichende Herausforderungen. In diesem vom Kunden bestimmten Markt sehen Unternehmen in der zusätzlichen Orientierung an Randgruppen des Nachfragemarktes und der Erweiterung ihrer Produktvielfalt eine Möglichkeit diesem Wettbewerbsumfeld gerecht zu werden.[26]

Jedoch wird bei der Bildung von Produktvarianz die Bewertung vom generierten Kundennutzen zum zusätzlichen Aufwand in der Wertschöpfungskette aufgrund der Produktkomplexität nur bedingt durchgeführt. Die funktionsübergreifenden Komplexitätskosten werden nur selten in ihrer vielfältigen Wirkung verstanden, was durch eine auf einzelne Funktionen fokussierte Unterneh-

[26] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 3.

mensorganisationsstruktur in unterschätzen Kostenkonsequenzen resultiert. Ebenso sind Nutzen- und Kostenwirkungen eines Produktes nicht von den übrigen Produkten des Produktprogramms losgelöst zu betrachten. So werden Entwicklungsentscheidungen häufig auf mangelndem Verständnis für Ursache und Wirkung von Komplexität sowie unsicheren Datensätzen getroffen.[27]

Weiterhin fordert die Multidisziplinarität von Produkten einen stärkeren Fokus auf die Funktionen im Vergleich zur Mechanik und Geometrie bei Produktentwicklungen zu legen. Als notwendig werden integrierte Funktions- und Eigenschaftsabsicherungen im Rahmen von modellbasierten Konzepten erachtet, um die Produkt- und Kundenforderungen zu berücksichtigen.[28] In der Produktentwicklung ist somit nicht mehr nur die Struktur, sondern vor allem die Funktionalität des Produktes stärker zu beachten.[29]

Der Ausgangspunkt für ein erfolgreiches Bestehen am Markt stellt für Unternehmen die Positionierung von Produkten innerhalb des produktspezifischen Zieldreiecks bestehend aus den Dimensionen Preis, Funktion und Qualität dar. Die Ausprägungsintervalle dieser drei Dimensionen, in welchen das Produkt zu positionieren ist, werden insbesondere durch konkurrenzähnliche Produkte für den gleichen Kundenmarkt eingegrenzt.[30] In der japanischen Industrie der 60iger bis 80iger Jahre werden dazu sowohl die Grundlagen der Kostenmanagementinstrumente des Zielkostenmanagements (engl.: Target Costing) als auch der Wertanalyse (engl.: Value Engineering) gelegt, welche im Rahmen des Forschungsprojektes weiterentwickelt und auf die Solarthermiebranche adaptiert werden. [31]

Mithilfe des Zielkostenmanagements werden die Kosten eines Produktes unter Berücksichtigung der erforderlichen Funktionalität und Qualität sowie der gewünschten Erlöse über den gesamten Produktlebenszyklus bestimmt. Das Zielkostenmanagement betrachtet somit die drei geforderten Dimensionen des Zielkostendreiecks, indem es die Funktionalität sowie die Qualität als Restriktionen zur Bestimmung der Zielkosten innehat.[32] Im Vergleich zur klassischen Kalkulation, welche als bottom-up Ansatz ausgehend von Herstellkosten und Zuschlägen den kalkulierten Preis ermittelt, handelt es sich bei dem Zielkostenmanagement um einen top-down Ansatz. Hier werden ausgehend von einem wettbewerbsorientierten Marktpreis und unter Abzug des Gewinns und den Overhead-Kosten die zulässigen Herstellkosten ermittelt.[33]

Der Vorteil dieser Betrachtung liegt vor allem an der Berücksichtigung des Marktumfelds bei der Kostenermittlung. Bei der bottom-up Betrachtung erfolgt der kostenseitige Abgleich hinsichtlich einer Marktakzeptanz erst am Ende des Entwicklungsprozesses. Die top-down Ermittlung der Kosten betrachtet hingegen von Beginn an die kostenverursachten Marktauswirkungen und beinhaltet somit bereits implizit die Suche nach Optimierungsrichtungen der Herstellkosten.

Diese Methode findet sowohl in Entwicklungsprozessen für Produkte und Leistungen im Rahmen der variablen Produktkonzeption als auch bei bereits vorliegenden Produkten und Querschnittfunktionen zu Zwecken der Kostensenkung ihren Einsatz.[34]

Das Zielkostenmanagement ist ein Prozess, der sich laut SCHUH ET AL. aus den drei aufeinanderfolgenden Phasen der Zielkostenermittlung, Zielkostenspaltung sowie der Zielkostenerreichung zusammensetzt und im Folgenden detailliert erläutert wird.[35] Eine ähnliche Aufteilung erfolgt auch

[27] Schuh et al. (2010), Maximaler Wirkungsgrad Produktkomplexität, S. 473f.
[28] Anderl et al. (2012), Smart Engineering, S. 14.
[29] Kristin Paetzold (2006), Ansätze funktionale Repräsentation, S. 66.
[30] Cooper und Slagmulder (1998), Target costing and value engineering, S. 5f.
[31] Kim und Berry (2014), Target Costing, S. 275f.; Cooper und Slagmulder (1998), Target costing and value engineering, S. 7.
[32] Cooper und Slagmulder (1998), Target costing and value engineering, S. 10.
[33] Ehrlenspiel et al. (2014), Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, S. 64f.
[34] Schawel und Billing (2018), Zielkostenmanagement/Target Costing, S. 377.
[35] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 138.

durch COOPER ET AL.. Zu Beginn werden die zulässigen Kosten jedes Produktes anhand der Zielgewinnmarge sowie des erwarteten Verkaufspreises bestimmt. Darauf folgt die Bewertung der Zielkosten auf Ebene des aktuellen Produktes durch die Produktentwicklung. Als Referenzwert für die Festlegung der zulässigen Kosten werden die gegenwärtigen Kosten des Produktes genutzt. Als letzten Schritt erfolgt die Aufspaltung der Zielkosten auf Komponentenebene, so dass die Komponenten zu Zielkosten vom Lieferanten beschafft oder in Eigenfertigung produziert werden.[36]

Im Zentrum der **Zielkostenermittlung** steht die Bestimmung des Einflusses einzelner Produktfunktionen auf den Gesamtnutzen aus Kundensicht.[37] Zur Bestimmung des Kundennutzen sowie der gewünschten Produkteigenschaften und der Zahlungsbereitschaft eignen sich neben Marktumfragen und direkten Kundengesprächen auch die Methode des Conjoint Measurement, bei denen verschiedene Merkmalskombinationen vom Kunden beurteilt werden.[38] Des Weiteren wird in dieser ersten Phase der Absatzmarkt analysiert und Zielkosten mithilfe der Größen Zielpreis, Zielrendite sowie der Overheadkosten als unternehmerische Fixkosten bestimmt.[39] Betrachtungsgegenstände können dabei Vergangenheitsdaten von Gewinnmargen sowie veränderte Faktoren wie Konkurrenzprodukte und der Produktlebenszyklus sein.[40]

Für gewöhnlich ist ein Produkt aus mehreren Einzelteilen und Komponenten aufgebaut, auf die es die Zielkosten zu dekomponieren gilt.[41] Die Produktarchitektur kann dabei weiterhin von der Wahl des Produktstrukturtyps nach Baukästen, Modulen, Baureihen und Paketen gegliedert und gestaltet sein.[42] Zur Dekomposition der Zielkosten existieren zwei Methoden, namentlich Komponenten- und Funktionsmethode.[43] Dieses Ziel wird mit der zweiten Phase **Zielkostenspaltung** verfolgt.[44]

Im Rahmen der Komponentenmethode wird auf ein Referenzprodukt mit ähnlicher Kostenstruktur zurückgegriffen, mithilfe dessen die direkte Aufteilung der Zielkosten auf Produktbauteile erfolgt. Als wesentlicher Kritikpunkt der Komponentenmethode sind insbesondere die fehlende Ausrichtung an die Marktbedürfnisse sowie Bewertung der Produktkomponenten sowie das Verschenken von Kostensenkungspotenzialen anzumerken.[45]

Beim Einsatz der Funktionsmethode wird hingegen Expertenwissen aus dem Produktmanagement und der Entwicklung genutzt, um zunächst die prozentuale Bedeutung der Produktkomponenten zur Erfüllung der einzelnen Funktionen festzulegen. Ebenso werden Funktionen hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Kunden bewertet und gewichtet. Darauf folgt die Multiplikation dieser Gewichtungskoeffizienten der Produktkomponenten, die für jede Funktion aufgestellt werden, mit dem Gewichtungsfaktor der entsprechenden Funktion. Als Ergebnis steht für jede Produktkomponente ein numerischer Wert zur Verfügung, welcher die Bedeutung der Produktkomponente für eine Funktion unter Berücksichtigung der Wichtigkeit der jeweiligen Funktion auf das Gesamtprodukt ausdrückt. Der Nutzenanteil einer einzelnen Produktkomponente für das Gesamtprodukt ergibt sich demnach durch die Summe der neu errechneten Koeffizienten, die der betrachteten Produktkomponente zugeordnet sind, über alle Funktionen.[46] Die Zielkosten einer Produktkomponente ergeben

[36] Cooper und Slagmulder (1998), Target costing and value engineering, S. 10f.
[37] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 139.
[38] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 300.
[39] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 139f.
[40] Cooper und Slagmulder (1998), Target costing and value engineering, S. 11f.
[41] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 306
[42] Schuh und Bender (2012), Grundlagen des Innovationsmanagements, S. 10.
[43] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 306ff.
[44] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 141.
[45] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 307f.
[46] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 308f.

sich somit durch die Multiplikation des Nutzenanteils der Komponente mit den Gesamtzielkosten des Produktes.[47]

Der dritte und abschließende Schritt, die **Zielkostenerreichung**, umfasst die Ermittlung von Plankosten, des Zielkostenindex sowie Maßnahmen zur Zielkostenerreichung und die damit verbundene Wertanalyse.[48]

Die zentrale Größe der vorangehenden Schritte des Zielkostenmanagements sind die marktseitig bestimmten Zielkosten, welche im vorliegendem Schritt den Plankosten (engl.: Drifting Costs) zum Zweck der Zielkostenkontrolle und der Ermittlung des Kostensenkungspotenzials gegenüberzustellen sind.[49] Plankosten entsprechen den resultierenden Stückkosten auf Basis der eingesetzten Technologien und Materialien.[50] Ebenso sind bei der Kalkulation der Plankosten alle Phasen des Produktlebenszyklus sowie die anfallenden Material, Fertigungseinzel-, Sonder-, und Gemeinkosten zu berücksichtigen. Grundlage hierfür bilden richtige und verursachungsgerechte Kosteninformationen.[51] Für die geforderte verursachungsgerechtere Produktkalkulation eignet sich das Kostenrechnungsverfahren der Prozesskostenrechnung, welches im Kapitel „4.2 Prozesskostenanalyse zur Identifikation von Kostentreibern" detailliert erläutert wird.[52]

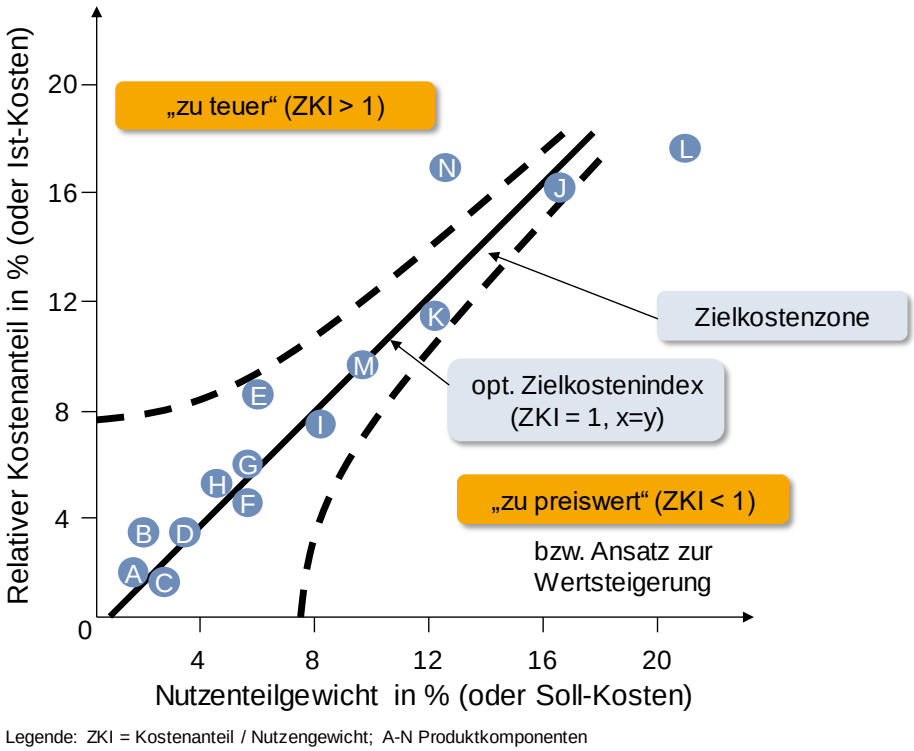
Die Berechnung des Kostensenkungspotenzials ergibt sich durch die Differenz zwischen den Plankosten[53] als prognostizierte Kosten mit den entsprechenden Zielkostenanteilen der Komponente. Eine weitere Möglichkeit zur Visualisierung des Kostensenkungspotenzials stellt der Zielkostenindex dar. Dieser beschreibt das Verhältnis von Nutzenanteil zu Plankostenanteil einer Komponente.[54] Der Zielkostenindex stellt somit den Kundennutzen ins Verhältnis zum tatsächlichen Ressourcenverbrauch einer Komponente.[55] Im Idealfall beträgt der Zielkostenindex somit für alle Komponenten eins. Ein Wert kleiner als eins suggeriert, dass die Komponente zu kostenaufwendig umgesetzt wird. Bei einem Wert größer als eins, kann es sich lohnen den Kostenaufwand der betroffenen Komponente weiter zu erhöhen, um so dem vom Kunden zugeordneten Nutzen gerecht zu werden. Der absolute Wert der Reduktion und gegebenenfalls Erhöhung an Kosten kann jedoch nicht durch den Zielkostenindex abgelesen werden und ist nur durch die Differenz der Größen Plan- und Zielkosten ersichtlich.[56]

Da die Plankosten über den Zielkosten einer Komponente liegen, besteht die Handlungsempfehlung bei Komponenten mit einem Zielkostenindex kleiner als eins die ersten Kostensenkungsmaßnahmen vorzunehmen. Die Erreichung des Idealfalles mit einem Wert gleich eins ist durch die Kostensenkung in der Regel nicht möglich und so stellen Komponenten mit einem Zielkostenindex größer als eins die Kompensation der Zielkosten für das Gesamtprodukt dar. Eine Anpassung und Aufbesserung der Funktionen dieser Komponenten ist somit nicht immer für die gesamtheitliche Betrachtung empfehlenswert.[57]

Der Zielkostenindex kann ebenso graphisch in einem Zielkostenkontrolldiagramm abgebildet werden (vgl. Abbildung 4-1: Zielkostenkontrolldiagramm nach HORSCH). Hierzu wird das Nut-

[47] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 309.
[48] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 143ff.
[49] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 143; Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 309.
[50] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 309.
[51] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 143f.
[52] Mayer (1993), Target Costing und Prozesskostenrechnung, S. 77.
[53] FISCHER verwendet den Begriff Standardkosten anstelle von Plankosten
[54] Fischer (2008), Kostenbewusstes Konstruieren, S. 64.
[55] Mohnkopf et al. (2008), Innovationserfolgsrechnung, S. 395.
[56] Fischer (2008), Kostenbewusstes Konstruieren, S. 64f.
[57] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 312.

zenteilgewicht als y-Achse in Abhängigkeit des Kostenanteilgewichts der Komponenten als x-Achse aufgetragen. Die Winkelhalbierende stellt den Idealfall des Zielkostenindex mit dem Wert eins dar. [58]



Legende: ZKI = Kostenanteil / Nutzengewicht; A-N Produktkomponenten

Abbildung 4-1: Zielkostenkontrolldiagramm nach HORSCH[59]

Zusätzlich ist vom Management ein Toleranzbereich, die Zielkostenzone, zu definieren, der die realistische und akzeptable Abweichung vom Idealfall des Zielkostenindex für die Komponenten beschreibt.[60] Die Zielkostenzone wird durch folgende Formeln für die obere y1-, und untere y2-Grenze in Abhängigkeit des Parameters q beschrieben:[61]

$$y_1 \geq \sqrt{x^2 - q^2}\ falls\ x \geq q\ , sonst\ y_1 \geq 0$$

$$y_2 \leq \sqrt{x^2 + q^2} \qquad (1)$$

x = Nutzenanteil

y = Wertanteil

Der Parameter q ist beispielsweise für kostenintensive Wettbewerbe relativ klein festzulegen.[62] Für die Automobilindustrie stellt DEISENHOFER die Werte 10 und 15 für den Parameter q gegenüber und empfiehlt den kleineren der beiden Werte für eine aussagekräftige Entscheidungsgrundlage.[63]

[58] Mohnkopf et al. (2008), Innovationserfolgsrechnung, S. 397.
[59] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 311.
[60] Mohnkopf et al. (2008), Innovationserfolgsrechnung, S. 397.
[61] Meyer (2003), Produktinnovationserfolg und Target Costing, S. 234.
[62] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 311.
[63] Deisenhofer (1993), Marktorientierte Kostenplanung auf, S. 106f.

Die primären Handlungsempfehlungen des Zielkostenkontrolldiagramms fokussieren sich auf Komponenten außerhalb der Zielkostenzone. Innerhalb der Zielkostenzone sind Komponenten mit einem Zielkostenindex kleiner als eins und somit oberhalb der Winkelhalbierenden jedoch nicht gänzlich zu vernachlässigen, da es so zu einer Verfehlung der Zielkosten bei einer überwiegenden Mehrheit dieser Komponenten kommen würde. Das Zielkostenkontrolldiagramm zeigt zudem, dass Abweichungen von Komponenten mit höherem Nutzen- und Kostenanteil im Vergleich zu weniger bedeutenden sich stärker auf die Einhaltung der Grenzen der Zielkostenzone auswirken.[64]

Im Anschluss an die Ermittlung der Kostensenkungsbedarfe einzelner Komponenten gilt es den Target Gap, im Sinne der Differenz zwischen Plan- und Zielkosten im Zeitintervall der Entwicklungszeit bis zur Serienreife des Produktes zu eliminieren. Hierbei zählt die Wertanalyse zu den verbreitetsten Methoden in der produzierenden Industrie, um Kostenoptimierungspotenziale zu identifizieren.[65]

Die **Wertanalyse** hatte ihren Ursprung als Instrument in der Marktphase eines Produktes zur Senkung der Materialkosten unter Beibehaltung der Qualität. Der Einsatzbereich der Wertanalyse hat sich im Laufe der Zeit auf die Entstehungsphase eines Produktes erweitert und hat sich neben der Analyse von Produkten materieller und immaterieller Art auch zu Zwecken der Rationalisierung des Gemeinkostenbereiches als wichtige Methode im Kostenmanagement etabliert.[66] Die Wertanalyse ist somit als integrierendes Element des Zielkostenmanagements zu verstehen, da es die Funktionalität und Qualität des Produktes sowie Einhaltung der Zielkosten zu steigern versucht. Hierzu werden Produkte sowohl auf ihre notwendigen Funktionen als auch Anforderungen an Zuverlässigkeit und Qualität analysiert und Vorschläge zur Erreichung dieser Anforderungen erarbeitet.[67] Das zentrale Konstrukt der Wertanalyse bildet der aus zehn sequenziellen Schritten bestehende Wertanalyse-Arbeitsplan, beginnend mit der Vorbereitung des Projektes über Funktionsanalyse und Lösungsgenerierung bis hin zum finalen Schritt der Realisierung.[68] Der Arbeitsplan ist als eine strukturierte Handlungsbeschreibung zu verstehen, dessen Art und Weise der Umsetzung den Beteiligten obliegt.[69]

Die Wertanalyse verfolgt das Ziel, das Verhältnis von Funktionskosten und Funktionserfüllung eines Produktes zu optimieren.[70] Dieses Verhältnis wird als der Wert eines Produktes definiert. So lassen sich anhand der ermittelten Funktionskosten aus der Wertanalyse Funktionen nach ihrem Kostenverursachungsanteil bei der Suche nach alternativen Lösungsansätzen priorisieren.[71] Weitergehend wird zwischen der technischen Wertigkeit als Verhältnis von realer zu geforderter Funktionserfüllung als auch der wirtschaftlichen Wertigkeit als Verhältnis von Kostenziel zu Kosten unterschieden. Hierbei ist die gesamtheitliche Betrachtung beider Wertigkeiten notwendig mit dem Ziel einer maximalen Annäherung an die Zielvorgaben, um eine wirtschaftlich und technisch befriedigende Lösung zu erlangen.[72]

Die Funktionenanalyse ist eine zentrale Methode der Wertanalyse, indem Funktionen eines Objektes zur Erfüllung der gestellten Anforderungen untersucht werden.[73] Objekte können dabei physische Produkte, Prozesse sowie Dienstleistungen sein. Die Funktion eines betrachteten Objektes wird

[64] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 311f.
[65] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 146f.
[66] Friedl (2007), Wertanalyse nach DIN EN 12973 als Instrument des produktorientierten Kostenmanagements, S. 1.
[67] Cooper und Slagmulder (1998), Target costing and value engineering, S. 13.
[68] DIN EN 12973 (2002), S. 31ff.
[69] Wiest (2011), Der Wertanalyse-Arbeitsplan, S. 39.
[70] Fischer (2008), Kostenbewusstes Konstruieren, S. 85.
[71] Fischer (2008), Kostenbewusstes Konstruieren, S. 96.
[72] Fischer (2008), Kostenbewusstes Konstruieren, S. 85f.
[73] VDI 2803 (2019), S. 2.

dabei nach der VDI-Norm 2803 als das Wirken im Sinne eines Vorgangs wie auch als das Ergebnis dieses Wirkens definiert.[74]

Funktionen lassen sich hinsichtlich ihrer Art und Klasse unterteilen. Unter Funktionsarten wird zwischen Gebrauchsfunktionen und Geltungsfunktionen unterscheiden. Gebrauchsfunktionen stellen ein objektives Wirkungsmaß für die Nutzung des Produktes dar. Geltungsfunktionen beschreiben die subjektiven individuellen Wirkungen des Produktes auf die betrachtete Person. Die Funktionenklassen lassen sich wiederum in Haupt- und Nebenfunktionen untergliedern. Die Zuordnung von Funktionen zu Klassen ist im Rahmen des jeweiligen Vorhabens vorzunehmen. Beide Klassen sind voneinander unabhängig und frei zu wählen, wobei mindestens eine Hauptfunktion zu beschreiben ist.[75]

Im Rahmen der abschließenden Bewertung des Zielkostenmanagements ist der Kundenmarkt als Ausgangspunkt für die Kostenbewertung des Produktes und seiner Komponenten als die zentrale positive Eigenschaft des Verfahrens hervorzuheben. Daraus resultieren die permanente Rationalisierung sowie die Betrachtung des gesamten Wertschöpfungsprozesses und des Produktlebenszyklus bei der Planung und Kontrolle von Kosten. Lediglich sind die Reliabilität der Conjoint Analyse sowie der Preisprognose und des Lebenszyklus als kritische Aspekte im Rahmen des Verfahrens zu sehen.[76]

4.1.2 Vorgehen im Forschungsprojekt

Im Rahmen des zweiten Arbeitspaketes wird zunächst ein Vorgehensmodell für die Identifikation der werthaltigen Teile einer solarthermischen Kombianlage entwickelt, welches aus vier zentralen Schritten besteht. Die Grundlage der Funktionskostenanalyse bildet die Dekomposition des Gesamtsystems in eine Funktionsstruktur (vgl. Methodenschritt 1: Aufbau einer Funktionsstruktur) sowie eine einheitliche Beschreibung mittels der generischen Produktstruktur (vgl. Methodenschritt 2: Aufbau einer generischen Produktstruktur). Als Eingangsgröße wird in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE eine generische Produktstruktur aufgebaut, welche eine branchenweite Gültigkeit besitzt, um so sämtliche aktuell am Markt befindlichen Anlagentypen beschreiben zu können. Weiterhin wird unter identischen Anforderungen eine Funktionsstruktur aufgebaut und mit den beteiligten Projektpartnern abgestimmt. Der Methodenschritt 3: Zuordnung Komponenten zu Funktionen dient dazu, anteilig zu beschreiben, welchen Erfüllungsgrad eine Komponente an den verschiedenen Funktionen hat. Abschließend wird beschrieben, wie ausgehend von den vorherigen Methodenschritten, die relevanten Erkenntnisse abzuleiten sind und welche Auswertungsmöglichkeiten dieser Methodenschritt liefert (vgl. Methodenschritt 4: Bewertung de).

Methodenschritt 1: Aufbau einer Funktionsstruktur

Der erste Methodenschritt dient dazu eine Funktionsstruktur für solarthermische Kombianlagen aufzubauen. Die Funktionsstruktur ermöglicht innerhalb der Gesamtmethodik eine von physischen Komponenten unabhängige Beschreibung von solarthermischen Kombianlagen. Diese kann dazu verwendet werden, technische Lösungen verschiedener Akteure am Markt miteinander lösungsneutral zu beschreiben und so miteinander vergleichen zu können.

Für den Aufbau einer generischen Funktionsstruktur wird das zu beschreibende Produkt zunächst auf seine Hauptfunktion reduziert und diese anschließend in Nebenfunktionen dekomponiert. So

[74] VDI 2803 (2019), S. 3.
[75] VDI 2803 (2019), S. 5.
[76] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 312.

stellt die Funktionsstruktur eine transparente Zusammensetzung der Gesamtfunktion eines Produktes anhand von generischen Teilfunktionen dar. Von zentraler Bedeutung der Dekomposition sind dabei folgende vier Eigenschaften, die dazu dienen einen sinnvollen und zielgerichteten Aufbau von Funktionsstrukturen zu gewährleisten:

1. **Allgemeingültig** *(Die Funktionsstruktur beschreibt die Zusammensetzung der Gesamtfunktion eines Produktes anhand von generischen Teilfunktionen)*
2. **Kundenorientiert** *(Die Funktionsstruktur unterstützt die ganzheitliche Beschreibung eines Produktes aus Kundensicht)*
3. **Branchenweit** *(Die Funktionsstruktur unterstützt die branchenweite Beschreibung von Funktionen)*
4. **Lebenszyklusübergreifend** *(Die Funktionsstruktur stellt eine kontinuierliche Anforderungserfüllung über mehrere Produktgenerationen hinweg sicher)*

Eine nach diesen Kriterien erstelle Funktionsstruktur bildet die Grundlage der Wertanalyse zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher solarthermischer Anlagen und dient der ganzheitlichen Beschreibung eines Produktes aus Sicht des Kunden. Erste mögliche Handlungsbedarfe aus Marktsicht werden dabei durch fehlende oder vom Kunden als unbedeutend wahrgenommene Realisierung von Funktionen aufgenommen.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Funktionsstruktur von solarthermischen Kombianlagen weist 11 Hauptfunktionen auf, aus denen sich 34 untergeordnete Funktionen ergeben. Abbildung 4-2 zeigt einen Ausschnitt der entwickelten Funktionsstruktur. Die vollständige Funktionsstruktur findet sich in Anhang (vgl. Anhang A).

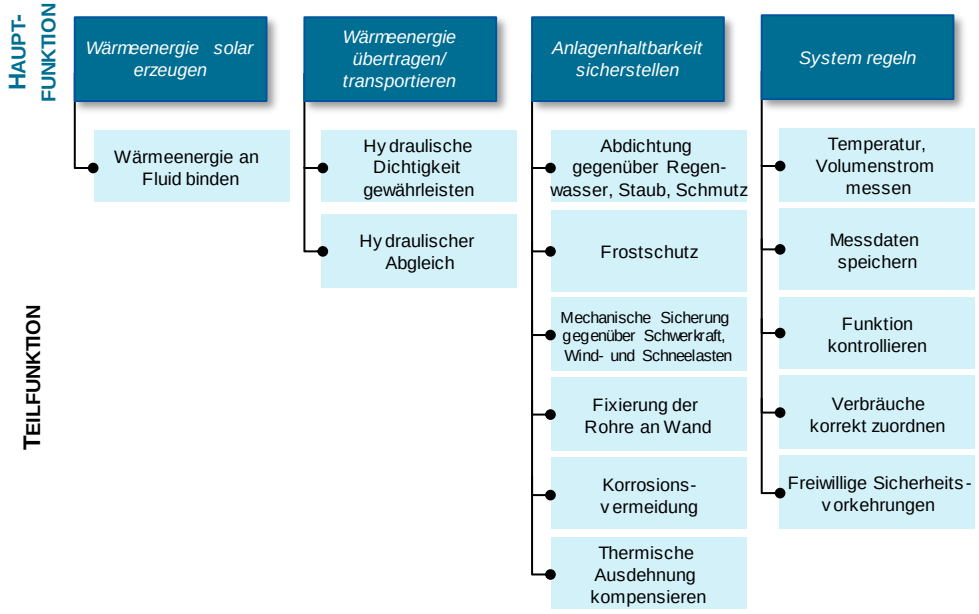


Abbildung 4-2: Ausschnitt aus der Funktionsstruktur einer solarthermischen Kombianlage

Methodisch hat sich dabei das Vorgehen als erfolgreich bewährt die einzelnen Funktionen systematisch von der zentralen Funktion „Raum und Trinkwasser erwärmen" über Haupt- und Nebenfunktion abzuleiten und mit Hilfe eines Funktionsbaums zu visualisieren. Hauptfunktionen erfüllen dabei direkt die Aufgaben und Erwartungen, die ein Nutzer an ein Produkt stellt. Teilfunktionen sind diejenigen Funktionen, die zur Erfüllung der Hauptfunktion benötigt werden. Im ersten Schritt werden dazu die technischen Funktionen als Wirkungen beschrieben, die sich durch Substantive oder einer zusätzlichen Kombination mit Verben prägnant formulieren lassen. Zu den Funktionen werden zum Teil zusätzlich wirkungsbestimmende Größen angegeben, welche Quantifizierungen der Funktio-

nen darstellen. Zum Beispiel stellt die Funktion „Wärmeenergie erzeugen“ eine Hauptfunktion dar. Um die Wärmeenergie erzeugen zu können, muss die Wärmeenergie an das Fluid gebunden werden. Die Funktion „Wärmeenergie an Fluid binden“ ist folglich als eine Nebenfunktion zu klassifizieren. Anschließend ist es notwendig die jeweilige Wichtigkeit der einzelnen Haupt- und Nebenfunktionen zu ermitteln. Dazu wird die Methode der Funktionskostenanalyse dahingehend adaptiert, dass auch die *TEWISol*-spezifische Berücksichtigung der Perspektiven unterschiedlicher Stakeholder ermöglicht wird. So wird sichergestellt, dass die aufgenommene Wichtigkeit der Funktionen nicht nur die Anforderungen aus der Sicht der Entwicklungssicht des Herstellers widerspiegelt, sondern auch die Einschätzungen aus den Perspektiven des Handels, Handwerks und des Kunden Berücksichtigung finden.

Die Bewertung der Funktionen lässt sich dabei einerseits anhand eines konzipierten Fragenbogens oder andererseits anhand eines entwickelten Excel-Tools vornehmen. Während sich im industriellen Umfeld die Bewertung mittels des Excel-Tools bewährt hat, sind insbesondere Endkunden stärker gewohnt, einen leicht verständlichen Fragenbogen auszufüllen.

Exkurs Fragenbogenerstellung für die Funktionskostenanalyse

Im Rahmen des Programms zur Funktionskostenanalyse wird auch ein Dominanzpaarvergleich durchgeführt. Dabei sollen die Stakeholder eine Aussage darüber treffen, ob eine Funktion wichtiger, unwichtiger oder von derselben Wichtigkeit ist wie jede der übrigen Funktionen. Die Bewertung der Funktionen durch die Stakeholder soll nicht direkt in der unübersichtlichen Matrix für den Dominanzpaarvergleich erfolgen. Stattdessen soll die Matrix indirekt über einen vorgeschalteten Fragebogen befüllt werden. Nur dieser Fragebogen wird den Stakeholdern vorgelegt.

Der Fragebogen ist klar und übersichtlich strukturiert und mit farbigen Akzenten hinterlegt. Die ausgewählten Farben orientieren sich an den Logos der Projektpartner. Ein ansprechendes Design hat zum Ziel die Motivation des Befragten alle Fragen zu beantworten und den ausgefüllten Bogen zurückzuschicken zu erhöhen.

Der Fragebogen wird in zwei inhaltlich deckungsgleichen Varianten erstellt. Eine Variante ist ein zum Ausdrucken vorgesehenes MS Word-/PDF-Dokument. Die andere Version der Umfrage wird als Formular in *MS Excel* realisiert. Die Umfrage in *MS Excel* soll den ressourcenschonenden Versand und Rückversand per E-Mail sowie das direkte Ausfüllen des Fragebogens am Computer erleichtern. Sowohl die verwendete Sprache, als auch der Inhalt sind dem Kenntnisstand der Befragten angepasst.

In einem ersten einführenden Abschnitt werden Hintergründe zur Befragung genannt. Dazu zählen Projektname, Projektpartner, Projektziel und Beitrag der Umfrage zum Erreichen des Projektziels. Dem Bewertenden wird darauf hingewiesen, dass seine Daten und Angaben anonym behandelt werden. Es wird erläutert worin seine Aufgabe liegt, wie lange das Ausfüllen des Fragebogens voraussichtlich dauert und welche Personen im Falle von Fragen als Ansprechpartner fungieren. Außerdem wird der Link zur Projekthomepage genannt, auf welcher weitere Informationen zu finden sind. Eine Umfrage, bei der nicht alle Fragen beantwortet werden, ist für die Verwendung im Programm zur Funktionskostenanalyse nicht brauchbar. Der Befragte wird daher in der Einleitung auch darum gebeten bei jeder Frage ein Kreuz zu setzen.

Der zweite Abschnitt der Umfrage dient dazu den Befragten entsprechend seiner Funktion in eine der Stakeholder-Gruppen (Hersteller, Handwerker, Großhändler, Endkunde) einzuordnen. Dies wird in der *MS Excel*-Variante mit Optionsfeldern umgesetzt. Dabei muss aus mehreren vorgegebenen Antwortmöglichkeiten eine gewählt werden. Somit erfolgt die Angabe der Funktion des Befragten sowie bei Bedarf die Spezifikation der Funktion. Beispielsweise kann ein Hersteller angeben, welche Komponenten er produziert. Für Handwerker stehen als Vertiefung „Hydrauliker“ oder „Elektriker“ zur Auswahl. Wer sich in keiner der genannten Kategorien wiederfindet, kann das Feld „Sonstiges“ ankreuzen und seine Funktion in einem Textfeld eintragen.

Zur Gestaltung des eigentlichen Fragenteils stehen zwei Alternativen zur Diskussion. Die erste Alternative ist die Begrenzung des paarweisen Vergleichs auf die Hauptfunktionen und einer anschließenden Angabe zur Gewichtung der Teilfunktionen innerhalb der Hauptfunktionen. Bei Hauptfunktionen mit nur einer Unterfunktion, ist keine Gewichtung nötig und möglich. Problematisch ist jedoch hierbei, dass aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Unterfunktionen keine ausreichende Vergleichbarkeit gegeben ist. Die Konsistenz der Urteile und der weiteren Verrechnung müsste im Rahmen einer Testbefragung ermittelt werden.

Zielführender ist die zweite Alternative, die Nutzung einer Rankingskala. Es soll pro Teilfunktion ein unabhängiges Ranking auf einer vorgegebenen Skala erfolgen. Auf die Bewertung der Hauptfunktionen wird verzichtet, da sie zur Irritation des Befragten führen kann. Es wird eine Skala von eins bis sechs eingeführt. Die Ränder dieser Bewertungsskala entsprechen den Einschätzungen „Unwichtig“ und „Sehr wichtig“. Eins steht für „Unwichtig“ und sechs für „Sehr wichtig“. Durch die sechs Skalenschritte ist der Befragte dazu gezwungen eine Entscheidung zu treffen und kann nicht bei Unentschlossenheit den mittleren Wert auswählen, wie es bei einer Skala von eins bis fünf der Fall ist.

Abschließend besteht die Möglichkeit in einem Freitextfeld Kommentare zu hinterlassen. Außerdem wird dem Bewertenden für seine Teilnahme gedankt. Einen Eindruck über die in der *MS Excel*-Variante implementierte Variante des Fragebogens gibt Abbildung 4-3. Anhang enthält die gedruckte Version des Fragebogens.

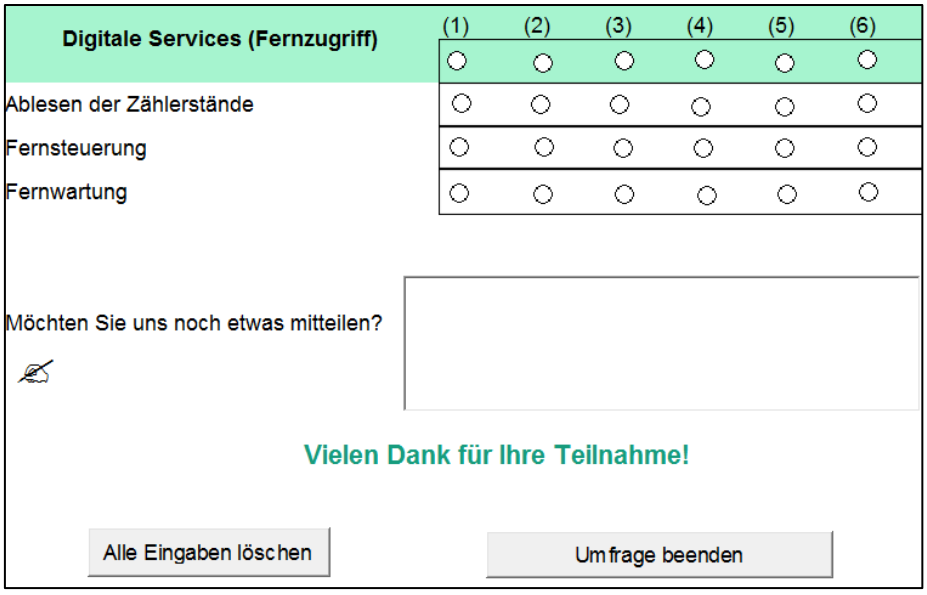


Abbildung 4-3: Zusätzliche Funktionen des Fragebogens in *Microsoft Excel*

Da eine Aufnahme der Wichtigkeit einzelner Funktionen mittels eines paarweisen Vergleichs in Excel eine höhere Genauigkeit aufweist, muss das fragebogenbasierten Ranking der Funktionen zunächst mittels eines definierten Algorithmus überführt werden.

Für die Überführung des Rankings in den paarweisen Vergleich spielt die Anzahl der gegebenen Antworten keine Rolle. Es kann nur mit einem einzelnen Wert weitergearbeitet werden. Es könnte dafür der Modus genutzt werden. Als Modus wird die meistgewählte Antwortmöglichkeit bezeichnet. Im Beispiel wäre dies mit 15 Nennungen die Antwort (5). Da somit aber alle übrigen Antworten keine Rolle mehr spielen, ist der arithmetische Mittelwert $\tilde{x}$ aus der Anzahl der Beobachtungswerte n zu berechnen und anschließend kaufmännisch zu runden. x_i steht für den i-ten Beobachtungswert.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2}$$

Mit den Beispielwerten ergibt sich ein Mittelwert von 4,97, also aufgerundet 5. Des Weiteren ist die Standardabweichung des Einzelwertes s zu ermitteln, die ein Maß für die Streuung um den Mittelwert $\bar{x}$ ist. Sie errechnet sich nach Formel (3.2).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{3}$$

Hier ergibt sich mit den exemplarischen Daten für die Stichprobe eine Standardabweichung $s = 1{,}03$.

Mit den abgerundeten arithmetischen Mittelwerten aus der Auswertung einer Gruppe von Stakeholdern kann der paarweise Vergleich erstellt werden. Es ist sukzessive, zunächst manuell, jede Teilfunktion mit den übrigen Teilfunktionen zu vergleichen. Für die Teilfunktion mit der höheren Wichtigkeit wird eine zwei eingetragen. Bei gleicher Wichtigkeit erhält die Teilfunktion eine eins und ist die Teilfunktion unwichtiger als die andere, bekommt sie die Wertung null. Dabei wird immer nur aus der Sichtweise der einen Teilfunktion das Ergebnis eingetragen. Das Ergebnis aus Sicht der jeweils anderen Teilfunktionen wird automatisch gespiegelt eingetragen. Eine Automatisierung der gesamten Auswertung kann durchgeführt werden, wenn sich abzeichnet, dass das Verfahren regelmäßige Anwendung bei Umfragen mit vielen Teilnehmern findet. Über den paarweisen Vergleich werden die Funktionen ihrer Wichtigkeit nach sortiert und dann wieder in der Kostenverteilung in der Software zur Funktionskostenanalyse aufgegriffen. Des Weiteren können Hypothesen zu unterschiedlichen Auffassungen zwischen den Stakeholder-Gruppen aufgestellt und ins Anlagenkonzept integriert werden. Beispielsweise haben die Fragen zur Legionellenprävention auch den Sinn zu erfahren, ob neue Methoden der Vermeidung von Legionellenbildung gefragt sind.

Das Ergebnis dieses Methodenschrittes ist zum einen die vollständige funktionale Beschreibung einer solarthermischen Kombianlage mittels Haupt- und Nebenfunktionen in einer generischen Funktionsstruktur. Zum anderen lässt sich eine Stakeholder-orientierte Bewertung der einzelnen Funktionen mittels eines Excel-Tools oder eines Fragebogens durchführen.

Methodenschritt 2: Aufbau einer generischen Produktstruktur

Der zweite Methodenschritt dient dem Aufbau einer generischen Produktstruktur. Die generische Produktstruktur ermöglicht eine allgemeingültige Beschreibung einer solarthermischen Kombianlage. So wird für das Forschungsprojekt eine herstellerunabhängige Darstellung des Produktes ermöglicht und die Ergebnisse lassen sich abstrakt erarbeiten und anschließend unternehmensindividuell konkretisieren. Außerdem können so, wie auch mit der generischen Funktionsstruktur, die technischen Lösungen von verschiedenen Herstellern durch die neutrale Beschreibung miteinander verglichen werden.

Die Hauptelemente der Struktur bilden Module, Sub-Module und Komponenten. Diese Strukturierungsebenen sind dabei, entsprechend den oben beschriebenen Anforderungen, so definiert worden, dass sie zwischen verschiedenen Produktreihen übertragen und über mehrere Produktgenerationen hinweg wiederverwendet werden können. So erfüllt die Produktstruktur maßgeblich die folgenden vier zentralen Eigenschaften:

- **Allgemeingültig** *(Die Produktstruktur beschreibt die Zusammensetzung eines Produktes mithilfe von generischen „Containern", die kundenspezifisch befüllt werden)*

- **Funktionsorientiert** *(Die Produktstruktur unterstützt die ganzheitliche, funktionsorientierte Beschreibung eines Produktes)*
- **Portfolioübergreifend** *(Die Produktstruktur unterstützt die Übertragbarkeit von Modulen/ Sub-Modulen/ Baugruppen zwischen verschiedenen Produktreihen)*
- **Lebenszyklusübergreifend** *(Die Produktstruktur unterstützt die Wiederverwendung von Modulen/ Sub-Modulen/ Baugruppen über mehrere Produktgenerationen hinweg)*

So können auf Basis der generischen Produktstruktur auch Varianten verschiedener Hersteller unabhängig von den tatsächlichen Stücklisten beschrieben werden, was einen branchenweiten Einsatz der Struktur ermöglicht. Abbildung 4-4 zeigt einen Ausschnitt der im Forschungsprojekt entwickelten Produktstruktur. Die vollständige Produktstruktur findet sich in Anhang (vgl. Anhänge B, C, D).

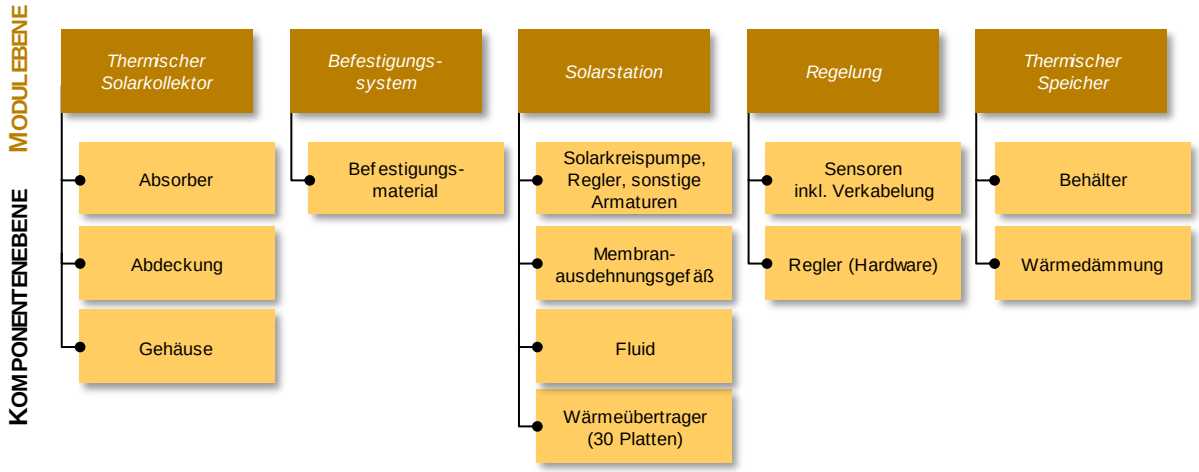


Abbildung 4-4: Ausschnitt aus der Produktstruktur einer solarthermischen Kombianlage

Es werden für das Forschungsprojekt unterschiedliche Technologien für die Art der Trinkwarmwasserbereitung (TWW-Bereitung) vorgesehen. Diese Unterscheidung schlägt sich in folgenden Modulvarianten nieder:

- Dezentrale TWW-Bereitung: Wohnungsübergabestation (dDF)
- Zentrale TWW-Bereitung: Frischwasserstation (zDF)
- Zentrale TWW-Bereitung: Erwärmung im Trinkwasserspeicher (zSL)

Die vollständige Produktstruktur beinhaltet 10 generische Module, welche sich insgesamt aus 29 bzw. 30 untergeordneten Komponenten zusammensetzen. Je nach Wahl der Technologie weist das Modul 10 „Wohnungsübergabestation" andere Komponentenausprägungen auf. So setzen sich die alternativ anwendbaren Module 10 „Wohnungsübergabestation" und „Frischwasserstation" aus 5 Komponenten zusammen während bei der TWW-Erwärmung im Trinkwasserspeicher dem Modul 10 6 Komponenten zugeordnet sind. Alle restlichen Module gleichen sich in ihrer Ausprägung über die drei Technologien zur Warmwasseraufbereitung.

Das Ergebnis des Methodenschritts ist die vollständige und generische Beschreibung einer solarthermischen Kombianlage in Modulen und Komponenten. Außerdem sind für eine solarthermische Kombianlage beispielhaft die IST-Herstellkosten ermittelt worden, um so die weiteren Berechnungen durchzuführen und exemplarisch Ergebnisse der weiteren Methodik vorzustellen.

Methodenschritt 3: Zuordnung Komponenten zu Funktionen

Im dritten Methodenschritt muss die Zuordnung von Komponenten der generischen Produktstruktur zu den Subfunktionen der generischen Funktionsstruktur vorgenommen werden. Die quantitative Zuordnung des Funktionsbeitrags einzelner physischer Komponenten einer solarthermischen Kombianlage zu den ermittelten Funktionen erfolgte im Rahmen des Forschungsprojekts durch das Expertenwissen der beteiligten Projektpartner. Dabei folgt die Festlegung der jeweiligen Anteile keinem vordefinierten Algorithmus, sondern ist das Ergebnis von Diskussionen und Workshops.

Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Zuordnung je nach Orientierung des späteren Ergebnisses auf zwei unterschiedliche Arten normiert werden kann. Es werden die Fälle einer komponenten- bzw. funktionsorientierten Zuordnung unterschieden:

Komponentenorientierte Zuordnung

Bei der komponentenorientierten Variante der Funktionskostenanalyse erfolgt die Zuordnung ausgehend von Funktionen in Richtung der Komponenten. Somit wird beschrieben zu welchen Anteilen einzelne Komponenten eine Funktion zu 100 % erfüllen. Die ermittelten Werte müssen dabei für jede Funktion 1 ergeben (vgl. Abbildung 4-5).

Funktionsorientierte Zuordnung

Bei der funktionsorientierten Auslegung der Methode erfolgt die Zuordnung ausgehend von den Komponenten in Richtung der Funktionen. Hier wird beschrieben zu welchen Anteilen eine Funktion von welchen Komponenten erfüllt wird. Folgerichtig lassen sich so die Anteile entlang der Komponente auf 1 summieren (vgl. Abbildung 4-5).

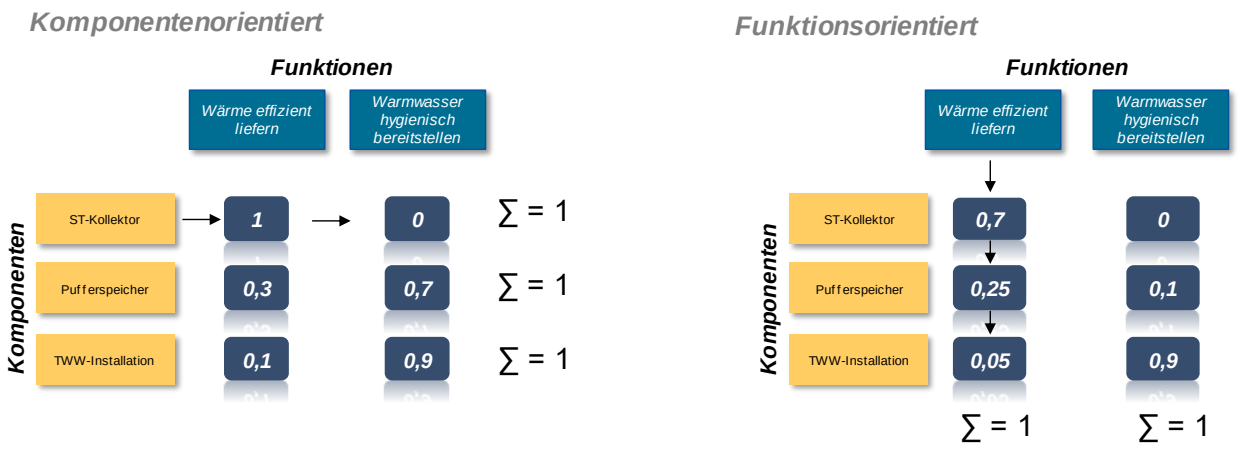


Abbildung 4-5: Gegenüberstellung der funktionsorientierter und komponentenorientierter Zuordnung

Basierend auf diesen Überlegungen liegt ein Microsoft Excel basiertes IT-Tool vor, welches die identifizierten Funktionen als Spalten und die Module mit ihren Komponenten als Zeileneinträge in einer Matrixform gegenüberstellt. Die Matrix ist außerdem um die Werte der Funktionsnutzen aus dem Methodenschritt 1 für die jeweiligen Stakeholder sowie beispielhaft ermittelte Ist-Herstellkosten der Komponenten erweitert. Ebenso werden die prozentualen Gewichtungen aus der komponentenorientierten und der funktionsorientierten Zuordnung ergänzt, die aber zur differenzierten Betrachtung der zwei Methoden separat erfolgte.

Das Ergebnis des vierten Methodenschritts ist die exemplarische Zuordnung von Funktionen und Komponenten. Dabei werden sowohl die komponentenorientierte als auch die funktionsorientiere Vorgehensweise berücksichtigt und in ein Excel-Tool zur weiteren Verwendung integriert.

Methodenschritt 4: Bewertung des Zielwerts von Komponenten und Funktionen

Im vierten Methodenschritt werden die Ergebnisse der zuvor durchlaufenden Methodenschritte vereint und analysiert. Das Ziel ist es zum einen Funktionen zu identifizieren, welche einen zu hohen Wert aufweisen im Vergleich zu dem Nutzen, den sie aus Sicht unterschiedlicher Stakeholder generieren. Zum anderen sollen Komponenten identifiziert werden, welche SOLL-Kosten für einzelne Komponenten auf Basis des Wertbeitrags einzelner Funktionen möglich sind.

Funktionsorientierte Auswertung

Die funktionsorientierte Auswertung verfolgt das Ziel, die Kosten und den Nutzen einzelner Funktionen des Gesamtsystems miteinander zu vergleichen. Dazu werden die technologisch unterschiedlichen Realisierungen in einem Kosten-/ Nutzen-Diagramm abgebildet und miteinander verglichen (vgl. Abbildung 4-6) Die einzelnen Punkte im Diagramm beschreiben dabei die einzelnen Funktionen. Die eingezeichnete Diagonale stellt den optimalen Fall dar, dass sich Kosten und Nutzen für den jeweiligen Stakeholder genau entsprechen und der Zielkostenindex daher 1 ergibt.

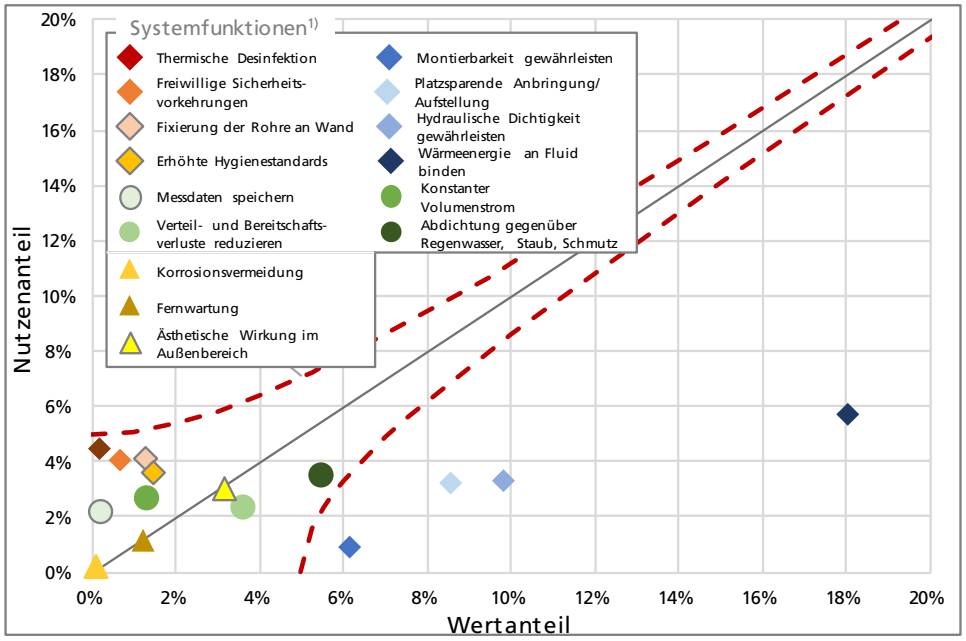


Abbildung 4-6: Darstellung ausgewählter Systemfunktionen im Zielkostenkontrolldiagramm für Variante *zSL*

Grundsätzlich trennt diese Diagonale die Funktionen in zwei Bewertungsfälle. Für Funktionen, die unterhalb der Diagonalen liegen, und damit einen Zielkostenindex kleiner als 1 haben, besteht die Handlungsempfehlung Kostensenkungsmaßnahmen vorzunehmen. In diesem Fall ist die relative Bedeutung der Funktion kleiner als die relativen Kosten der Funktion, es liegen somit kostentreibende Funktionen vor. Im umgekehrten Fall, d.h. wenn die Produktfunktion oberhalb der Diagonalen liegt, sind die die relativen Kosten dieser Funktion kleiner als die relative Wichtigkeit. Somit liegt in diesem Fall eine potenzialbehaftete Funktion vor. Zusätzlich wird ein Zielkostenbereich eingezeichnet, welcher durch die folgenden Funktionen aufgespannt wird:

$$y_1 \geq \sqrt{x^2 - q^2}\ falls\ x \geq q\ , sonst\ y_1 \geq 0$$

$$y_2 \leq \sqrt{x^2 + q^2} \qquad (4)$$

$$x = Wertanteil$$

y = Nutzenanteil

Der Parameter q ist hier die bestimmende Größe für die obere und untere Zielkostengrenze. Für die im Forschungsprojekt bestimmte Anzahl an Funktionen und auf Basis der aufgenommenen Funktionswerte hat sich hier eine Parametereinstellung von 5 % als zielführend erwiesen (siehe vergleichend auch Abschnitt 4.1.1). Für Funktionen, die außerhalb des Zielkostenbereichs liegen, sollten primär Maßnahmen zur Funktionsoptimierung definiert werden. Für Funktionen, deren Wert rechts außerhalb des Zielkostenbereichs liegt, sind Kostensenkungsmaßnahmen zu initiieren, da in diesem Fall die Funktionalität nicht in dem Maße wertgeschätzt wird, wie sie Kosten verursacht. Differenzierter müssen Funktionen betrachtet werden, welche oberhalb des Zielkostenbereichs liegen. Dort liegt augenscheinlich ein „Underengineering" vor. Diese Funktionen weisen einen größeren Nutzenanteil als einen verursachenden Kostenanteil auf. Diese Diskrepanz kann einerseits dazu genutzt werden, um Kostennachteile anderer Funktionen auf gesamtheitlicher Produktbetrachtung zu beheben, welche sich nicht weiter beheben lassen. Andererseits können Verbesserungen der betroffenen Funktionen und eine Aufwertung der Komponentenqualität vorgenommen werden, um der Attraktivität und den Wert der Funktion seitens des Kunden gerecht zu werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass diese Darstellung vor allem dazu genutzt werden kann, um aus einer neutralen funktionsorientierten Perspektive Produktoptimierungsrichtungen abzuleiten. Letztlich kann dadurch eine zielgerichtete Weiterentwicklung von solarthermischen Kombianlagen ermöglicht werden.

Komponentenorientierte Auswertung

Die komponentenorientierte Auswertung hingegen verfolgt das Ziel, konkrete Zielkosten für die Module und Komponenten der generischen Produktstruktur zu ermitteln. Der Ausgangspunkt dazu liegt zunächst in der Ermittlung eines theoretisch erzielbaren Marktpreises einer solarthermischen Kombianalage. Alternativ können auch aktuelle IST-Preise verwendet werden, um auf dieser Basis die Optimierungspotenziale der Herstellkosten einzelner Module und Komponenten aufzuzeigen.

Ausgehend von einem definierten Zielpreis, werden die ermittelten Kosten auf Basis der relativen Nutzenanteile auf die Funktionen verteilt. So hat die Funktion „Wärmeenergie an Fluid binden" beispielsweise einen Wert von 1.311,94 € basierend auf dem Nutzenanteil von 5,70 % aus der Perspektive des Endkunden. Diese Summe wird anschließend auf die Komponenten Absorber, Abdeckung des Solarkollektors, Gehäuse und Fluid entsprechend der Funktionserfüllungsanteile gemäß dem dritten Methodenschritt aufgeteilt. Wenn alle Funktionskosten nach diesem Algorithmus aufgeteilt sind, lassen sich über die Summe der zugeordneten Kosten je Komponente die Zielkosten für diese ermitteln. Vorteile dieser Auswertung gegenüber der klassischen Kostenrechnung liegen vor allem in der Fokussierung auf Funktionskosten aus der Perspektive verschiedener Stakeholder der solarthermischen Kombianlage. Abbildung 4-7 zeigt dazu beispielhaft für ausgewählte Komponenten den Vergleich zwischen den in Methodenschritt 2 beschriebenen exemplarischen Kosten sowie den anzustrebenden Zielkosten auf Basis der durchgeführten Funktionskostenanalyse. Die Zielkosten hängen jedoch in dieser Methode stets von der Bewertung des Nutzenanteils der jeweiligen Stakeholder ab. Somit führt diese Auswertung auch zu unterschiedlichen Einsparpotentialen der Ist-Komponentenkosten.

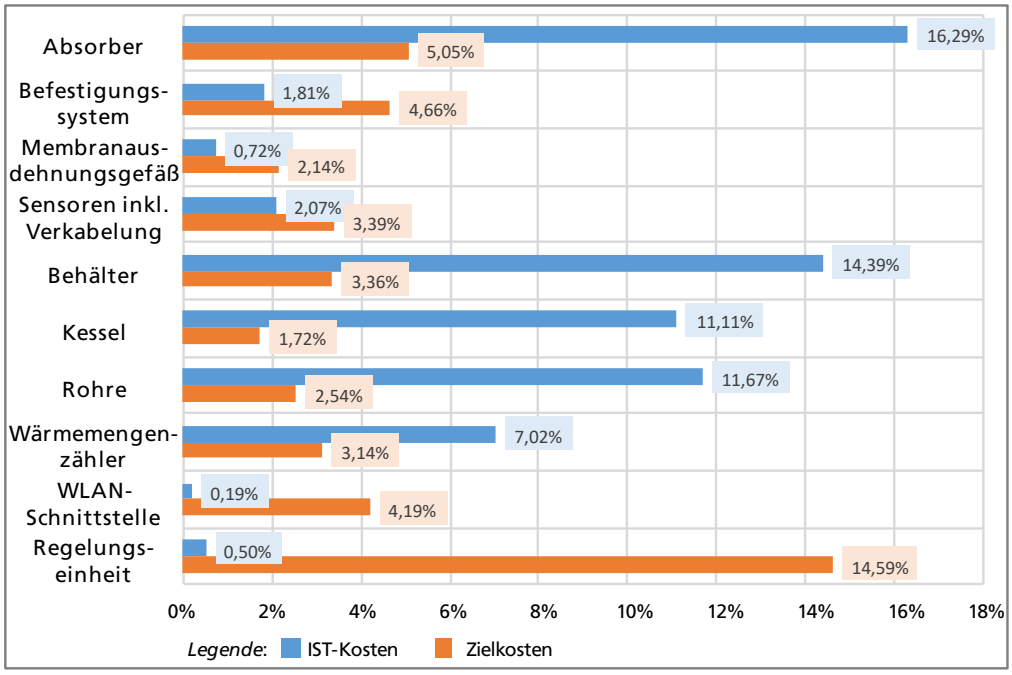


Abbildung 4-7: Vergleich IST-Kosten und Zielkosten ausgewählter Komponenten für Variante *zSL*

4.1.3 Ergebnisse und Restriktionen

Zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der, in Abschnitt 4.1.2 vorgestellten Methodenschritte, wird diese mit den Projektpartnern validiert. Sowohl die generische Produktstruktur als auch die generische Funktionsstruktur wird gemeinschaftlich mit den Experten des Fraunhofer ISE entwickelt. Auch die in Methodenschritt 3 beschriebene Zuordnung von Funktionen zu Komponenten wird von Systemexperten des Fraunhofer ISE exemplarisch durchgeführt.

Der zentrale Schritt der Methode und damit auch des Forschungsprojekts ist jedoch die Bewertung der Funktionen aus der Perspektive unterschiedlicher Stakeholder. Die Funktionsbewertung aus der Perspektive des Handwerksbetriebs wird mit dem am Projekt beteiligten Handwerksbetrieb durchgeführt. Dabei wird der paarweise Vergleich auf Basis einer Microsoft Excel-basierten Matrix vorgenommen. Es hat sich gezeigt, dass diese Art der Bewertung verhältnismäßig zeitaufwendig ist, da für eine Bewertung von 28 Funktionen 378 Entscheidungen getroffen werden müssen. Zwar unterstützt die Matrixdarstellung die Fortschrittsanzeige, jedoch benötigt selbst eine drei-stufige Entscheidungsskala zwischen „wichtiger“, „unwichtiger“ oder „gleich bedeutend“ ungefähr 60 Minuten für die vollständige Bewertung. Auf Grund dieser Erfahrungen wird für die Kundenbefragung der oben beschriebene und im Anhang abgebildete Fragebogen entworfen. Dieser erleichtert die Befragung sowohl seitens des Verständnisses als auch hinsichtlich des zeitlichen Aufwands merklich.

Es ist anzumerken, dass die Ergebnisse der fragebogenbasierten Funktionsbewertung weniger präzise sind, da nicht alle Funktionen miteinander verglichen werden. Stattdessen werden die detaillierten Vergleiche anschließend berechnet. Diese Ungenauigkeit kann aber aus Sicht der Autoren vernachlässigt werden. In der Darstellung der Ergebnisse weist die entwickelte Methode eine gewisse Scheingenauigkeit auf. Die Bestimmung der Funktionsgewichtung sowohl mittels Matrix als auch mittels Fragebogen ermöglicht ausschließlich eine Rangfolge der Funktionen entlang ihrer Wichtigkeit für den jeweiligen Stakeholder. Die gezeigten Prozentwerte sind eine rechnerische Größe, welche sich bei der Annahme von äquidistanten Abständen der Funktionen ergeben. Diese Annahme kann jedoch deswegen übernommen werden, da das Ergebnis der Funktionskostenana-

lyse in dieser Anwendung lediglich Hinweise zur Optimierung von solarthermischen Anlagen liefert und keine dedizierten Aussagen treffen soll, um welchen Grad einzelne Designparameter justiert werden müssen.

Ein Ergebnis des Arbeitspaketes 3 zeigt Abbildung 4-8. Hier wird der Nutzen- und Wertanteil einer solarthermischen Kombianlage aus der Sicht des Kunden dargestellt. Es wird deutlich, dass bereits viele der abgefragten Funktionen in der definierten Zielkostenzone liegen. Allerdings zeigt die Darstellung auch, dass die Funktion „Wärmeenergie an Fluid binden" (dunkelblaue Raute) mit einem Wertanteil von 18,08 % und einem Nutzenanteil von 5,70 % in ihrer aktuellen Realisierung deutlich zu kostenintensiv ist bzw. der Kunde andere Funktionen deutlich stärker wertschätzt. Diese Erkenntnis lässt sich als Indikator dafür werten, dass eine weitere Steigerung des Wirkungsgrads von solarthermischen Kombianalagen nicht mit höheren Preisen am Markt honoriert wird. Stattdessen sollten andere Funktionen der Anlage weiter ausgebaut werden. Ein Hinweis für weitere Entwicklungstrends lässt sich ebenfalls bereits erkennen. So wird die Funktion „Legionellenprävention" (dunkelrote Raute) oder „Sicherheitsregelungen des Systems" (orange Raute) von Kunden relativ als sehr wichtig erachtet.

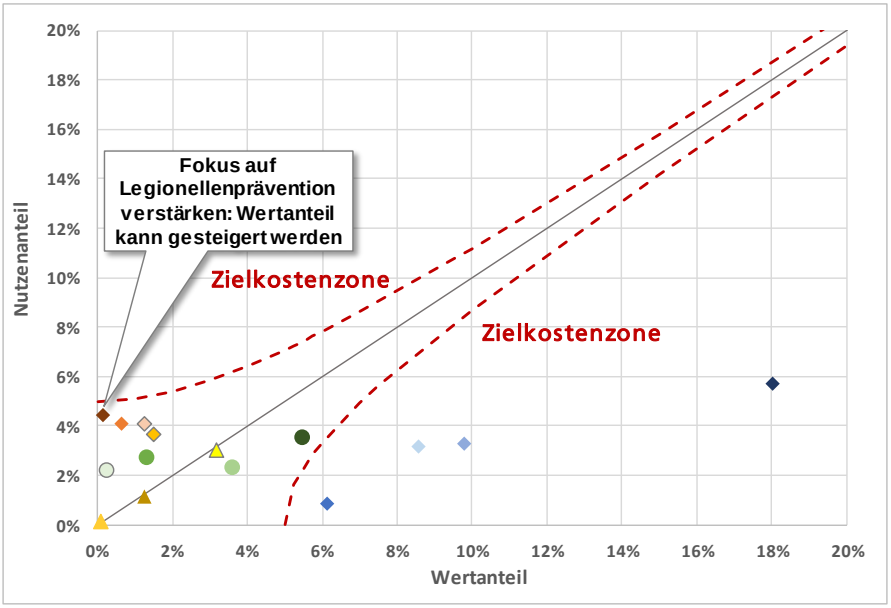


Abbildung 4-8: Handlungsfeld Trinkwasserhygiene aus Sicht des Kunden für Variante zSL

Ein weiteres Ergebnis des Arbeitspaktes zeigt Abbildung 4-9. Das Diagramm bildet den Nutzen- und Funktionsanteil von 10 ausgewählten Funktionen einer solarthermischen Kombianlage aus der Perspektive des Kunden und auch des Handwerks ab. Dabei bleibt die kostenseitige Bewertung der Funktionen unberührt. Die Bewertung der solarthermischen Kombianlage durch unterschiedliche Stakeholder wirkt sich ausschließlich auf die Nutzenwerte aus. So lässt sich zeigen, dass Funktionen aus unterschiedlichen Perspektiven bewertet auch einen nahezu identischen Nutzenwert aufweisen können. Ein Beispiel hierfür ist die Funktion „Abdichtung gegenüber Staub/ Schmutz". Aus Sicht des Forschungsprojekts sind jedoch die unterschiedlichen Bewertungen interessanter. Beispielsweise liegen deutliche Unterschiede in der Bewertung der Funktionen „Temperaturschichtung sicherstellen" oder „Strahlungskonversion" durch Handwerk und Kunde vor. Für den ersten Fall, lässt sich diese eventuell damit erklären, dass einem durchschnittlichen Kunden das detaillierte technische Verständnis für die Auswirkungen der Temperaturschichtung im Wärmespeicher der solarthermischen Kombianlage fehlt und somit die Funktion unterbewertet wird. Umgekehrt verhält es sich mit der Funktion „Strahlungskonversion". Dort ist es denkbar, dass der Kunde diese Funktion in seiner Wichtigkeit überbewertet, da er die Gesamtfunktionalität des Systems in diese Funktion projiziert. Im umgekehrten Fall ist jedoch auch ebenfalls denkbar, dass Funktionen, welche die Effizienz des Gesamtsystems beschreiben im Handwerk niedriger bewertet werden, als Funktionen, welche auf

die Montier- oder Wartbarkeit des Systems abzielen. Diese Funktionen betreffen den montierenden Handwerksbetrieb stärker als die konkrete Leistungsfähigkeit der solarthermischen Anlage.

Als Ergebnis des Forschungsprojekts kann so eindrucksvoll gezeigt werden, dass eine einseitige Bewertung von solarthermischen Kombianlagen ausschließlich aus einer Perspektive zu einem verzerrten Bild bezüglich der Entwicklungspotenziale führt. Erst durch das Gesamtbild aller beteiligten Anspruchsgruppen an die Anlage ergeben sich sinnvolle Optimierungspotenziale. Dabei wird auch deutlich, dass zukünftig vor allem auch das Handwerk stärker eingebunden werden sollte, da dort ein detailliertes Wissen verborgen ist.

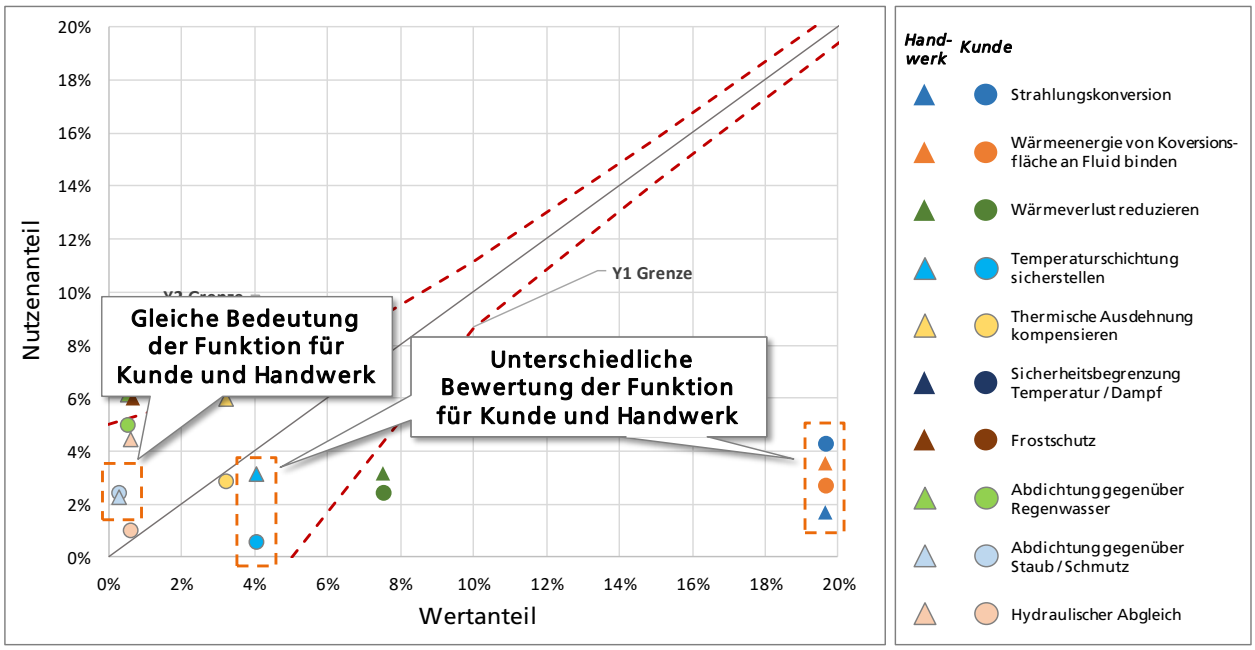


Abbildung 4-9: Vergleich ausgewählter Funktionen aus Kunden- und Handwerksicht im Zielkostenkontrolldiagramm für Variante *zSL*

4.2 Prozesskostenanalyse zur Identifikation von Kostentreibern

4.2.1 Grundlagen der Prozesskostenanalyse

Ausschlaggebend für ein erfolgreiches Zielkostenmanagement ist nicht nur die Erkenntnis über Kundenbedürfnisse auf der Marktseite. Auch die richtigen unternehmensinternen Kosteninformationen und eine verursachungsgerechte Leistungszuordnung spielen eine entscheidende Rolle. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die verursachungsgerechte Verteilung von Gemeinkosten eine wesentliche Herausforderung für Unternehmen, die mit konventionellen Ansätzen, wie der Zuschlagskalkulation, nicht ausreichend bewältigt werden kann.[77] Das unternehmerische Umfeld hat sich durch Veränderungen der Wertschöpfungsstruktur in Form von flexibler und variantenreicher Fertigung, sowie dem Einsatz von Just-in-time Prozessen zur Materialflusssteuerung und einem

[77] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 144.

umfangreichen Qualitätsmanagement gewandelt, was sich unter anderem in einer Verlagerung der Kostenstrukturen widerspiegelt.[78]

Insbesondere vergrößern Unternehmen ihr Produktprogramm und führen vermehrt differenzierte Produktvarianten ein, um die individuellen Kundenbedürfnisse zu adressieren.[79] Diese Erhöhung der Variantenvielfalt geht mit sogenannten Komplexitätskosten einher. Dabei handelt es sich um „zusätzliche Kosten, die aufgrund der Bewältigung einer erhöhten Komplexität entstehen".79F[80] So entstehen beispielsweise zusätzliche Aufwände bei der Lagerung und Verwaltung neuer Bauteile, der Planung einer komplexeren Fertigung, der Ansprache unterschiedlicher Zielgruppen im Marketing, der Schulung der Vertriebsmitarbeiter sowie durch zusätzliche zeit- und damit kostenintensive Rüstvorgänge in der Produktion, wenn eine neue Produktvariante eingeführt wird.[81] Eine komplexere Organisation, bedingt durch eine zu hohe Variantenvielfalt, führt weiterhin zu fehleranfälligeren Prozessen mit erhöhten Durchlaufzeiten und geringerer Reaktionsgeschwindigkeit.[82] Zudem können entgangene Skaleneffekte oder Kosten für zusätzlich notwendige Werkzeuge und Materialien konstatiert werden. Somit ist davon auszugehen, dass mit einer Erhöhung der Variantenvielfalt ein überproportionaler Anstieg der prozeduralen Kosten einhergeht.[83] Die steigende Anzahl an planenden, steuernden und kontrollierenden Aufgaben sorgt für einen größeren Anteil der Gemeinkosten an den Gesamtkosten im Vergleich zu den direkten variablen Kosten.[84]

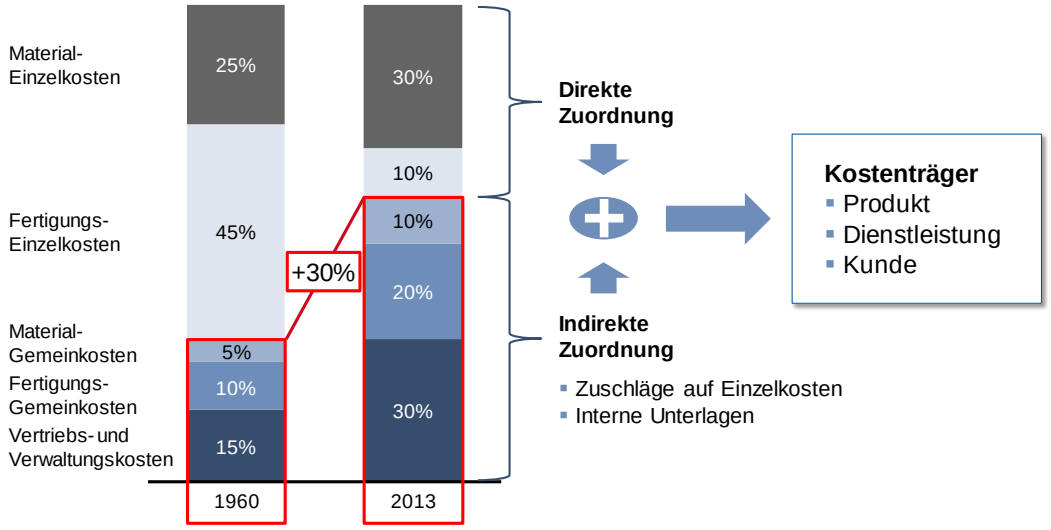


Abbildung 4-10: Anstieg des Gemeinkostenblocks in den letzten 50 Jahren[85]

Dabei werden Komplexitätskosten jedoch oftmals nicht ausreichend berücksichtigt, sodass Preise, insbesondere für kundenindividuelle Produkte beziehungsweise Produktneuentwicklungen, zu niedrig angesetzt werden. Versuchen Unternehmen die Verluste dieser unprofitablen Exoten durch eine

[78] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 145f.Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 145f.
[79] Büschken und Thaden (2007), Produktvariation, -differenzierung und -diversifikation, S. 597.
[80] Olbrich und Battenfeld (2000), Komplexität aus Sicht des Marketings, S. 5.
[81] Olbrich und Battenfeld (2005), Variantenvielfalt und Komplexität., S. 161
[82] Olbrich und Battenfeld (2000), Komplexität aus Sicht des Marketings, S. 9.
[83] Olbrich und Battenfeld (2005), Variantenvielfalt und Komplexität, S. 161.
[84] Horváth und Mayer (2011), Prozesskostenrechnung, S. 5.
[85] Finanzchef (2016), Anstieg des Gemeinkostenblocks in den letzten 50 Jahren.

Preiserhöhung der absatzstarken Produkte zu kompensieren, entsteht ein oftmals schwerwiegender Wettbewerbsnachteil im Bereich der Basisprodukte.[86]

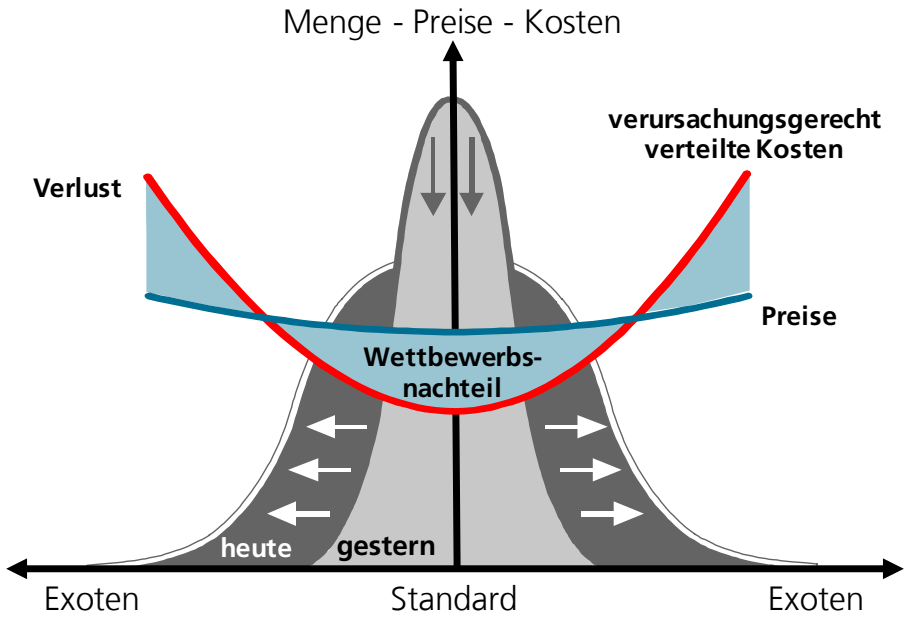


Abbildung 4-11: Quersubventionierung im Produktprogramm

In der Literatur wird davon ausgegangen, dass der Gesamtumsatz eines Unternehmens im Gegensatz zu den Kosten nur unterproportional ansteigt.[87] Vor dem Hintergrund überproportional steigender Kosten und unterproportional steigender Umsätze, wird deutlich, dass die Einführung weiterer Produktvarianten gegebenenfalls zu einer Verschlechterung der Wettbewerbsfähigkeit führen kann.

Eine Methode der Kostenrechnung, die sich auf den Gemeinkostenbereich und insbesondere auf die indirekten Leistungsbereiche fokussiert, stellt die Prozesskostenrechnung dar.[88] Dabei werden anstelle pauschaler Zuschlagssätze Prozessanteile der betrieblichen Leistung verwendet um die Verteilung von Gemeinkosten auf Kostenträger zu verrechnen.[89] Als Beispiele der indirekten Leistungsbereiche können Entwicklung, Einkauf, Logistik, Produktionsvorbereitung, Qualitätsmanagement, Marketing und Vertrieb sowie Controlling und Personalmanagement gezählt werden.[90] Die Prozesskostenrechnung trägt somit zur Erhöhung der Kosten-, und Prozesstransparenz bei, indem *„[…] die betrachteten organisatorischen Bereiche in sachlich zusammengehörige, kostenstellenübergreifende Prozessketten neu strukturiert […]"* werden.[91]

Im Zusammenhang mit der Prozesskostenrechnung sind die daraus resultierenden strategischen Informationsvorteile unter den Begriffen Allokations-, Degressions-, und Komplexitätseffekt zu erwähnen.[92]

[86] Schuh (2013), Lean Innovation, S. 88ff.
[87] Olbrich und Battenfeld (2005), Variantenvielfalt und Komplexität, S. 161.
[88] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 277.
[89] Posluschny (2009), Kostenrechnen leicht gemacht, S. 94.
[90] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 276f.
[91] Mengen und Urmersbach (2006), Prozesskostenrechnung im Industrieunternehmen, S. 218.
[92] Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 88.

Allokationseffekt

Der Allokationseffekt beschreibt die möglichen Fehler, die infolge einer Verrechnung der Gemeinkosten durch Zuschlagsätze in Abhängigkeit von den Einzelkosten entstehen können. Da im realen Fall die Gemeinkosten kein proportionales Verhältnis zu den Zuschlagsätzen haben, stellt die Prozesskostenrechnung mit der Verteilung der Gemeinkosten in Abhängigkeit der in Anspruch genommenen Prozesse eine sinnvollere Lösung dar.[93]

Degressionseffekt

Der Degressionseffekt hingegen berücksichtigt die Auswirkungen von Stückzahlen auf Gemeinkosten. Während bei einer Zuschlagskalkulation die Gemeinkosten proportional zu den Stückzahlen anfallen, verlaufen die Gemeinkosten bei einer Prozesskostenrechnung degressiv. Dies stellt den in der Regel auftretenden Fall dar, da einige Prozesse unabhängig von der geforderten Stückzahl ausgeführt werden und die Stückkosten sich mit steigenden Bestellungen verringern.[94]

Komplexitätseffekt

Anhand des Komplexitätseffekts werden die Komplexität und das Variantenreichtum von Produkten und der dafür benötigten Prozesse in Betracht gezogen. So erfordern Produkte mit einer größeren Anzahl an Komponenten mehr gemeinkostenverursachende Prozesse, wie Einkaufs-, oder Logistikprozesse. Bei einer klassischen Zuschlagskalkulation werden tendenziell komplexere Produkte mit zu niedrigen Gemeinkosten und weniger komplexe Produkte mit zu hohen Gemeinkosten beaufschlagt.[95]

Somit können mithilfe der Prozesskostenrechnung Entscheidungen über die Einführung neuer Teile oder Produktvarianten besser getroffen werden, da Auswirkungen von technischen oder prozessbedingten Änderungen auf den Gemeinkostenblock transparenter zur Verfügung stehen und damit eine Überschreitung der zulässigen Gesamtkosten vermieden werden kann. [96] *„Man kann somit die Prozesskostenrechnung als Basis für marktorientierte Zielkosten der Produktkalkulation des Target Costing betrachten."*[97]

Die Prozesskostenrechnung kann in zwei Hauptschritte unterteilt werden. Zunächst werden *die betrieblichen Prozesse und ihre Prozessgrößen bestimmt*, anhand dessen darauffolgend *die Prozesskostenkalkulation durchgeführt* wird.[98] Eine ähnliche Vorgehensweise beschreibt KREMIN-BUCH anhand der sechs Schritte: *Tätigkeitsanalyse, Erstellung einer Prozesshierarchie, Ermittlung von Kostentreibern, Ermittlung von Kostentreibermengen, Planung der Prozesskosten und Ermittlung von Prozesskostensätzen*.[99] Dabei können die ersten vier Schritte unter Bestimmung der betrieblichen und ihrer Prozessgrößen und der fünfte und sechste Schritt unter Prozesskostenkalkulation zusammengefasst werden.[100]

Zu Beginn der Prozesskostenrechnung erfolgt die Tätigkeitsanalyse auf Kostenstellenebene, die erst zu Teilprozessen und darauffolgend zu Hauptprozessen gebündelt werden.[101] Ein Prozess kann de-

[93] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 280.
[94] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 280f.
[95] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 281f.
[96] Mayer (1993), Target Costing und Prozesskostenrechnung, S. 77.
[97] Mohnkopf et al. (2008), Innovationserfolgsrechnung, S. 407.
[98] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 150.
[99] Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 40.
[100] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 151ff.
[101] Mengen und Urmersbach (2006), Prozesskostenrechnung im Industrieunternehmen, S. 219f.

finiert werden als *„[…] die Zusammenfassung zusammenhängender Arbeitsschritte, die einen bestimmten Input […] in einen bestimmten Output […] umwandeln […].“*[102] Als Input sind betriebliche Produktionsfaktoren und als Output die Produkte zu verstehen. Kunden können sowohl von externer Seite als auch von unternehmensinterner Seite kommen. Tätigkeiten sind in diesem Zusammenhang die bis auf die unterste mögliche Ebene heruntergebrochenen Prozesse einer Kostenstelle. Teilprozesse ergeben sich durch eine Zusammenfassung zusammenhängender Tätigkeiten je Kostenstelle. Im Vergleich dazu stellen Hauptprozesse die wesentlichen Arbeitsvorgänge der unternehmerischen Leistungserstellung dar, die in der Regel kostenstellenübergreifend betrachtet werden.[103] Möglich ist jedoch auch, dass sich ein Hauptprozess aus Teilprozessen einer einzigen Kostenstelle zusammensetzt.[104] Die Komprimierung der Prozesse führt zu einer Prozesshierarchie (vgl. Abbildung 4-12)

Die Ermittlung der Prozesse sowie der dafür benötigte Einsatz von Personal und Betriebsmitteln erfolgt mit dem zuständigen Verantwortungspersonal der Kostenstelle anhand von Interviews.[105] Für die Anwendbarkeit der Prozesskostenrechnung sollte dabei der Fokus auf repetitive Prozesse mit geringen Entscheidungsspielräumen beschränkt werden.[106] Die so im Rahmen der Prozessanalyse erarbeiteten Teilprozesse werden zu Hauptprozessen gebündelt, die bereits erste Handlungsempfehlungen zur Organisationsstruktur des Unternehmens geben sowie bei der Bestimmung der einheitlichen Kostentreiber unterstützen.[107]

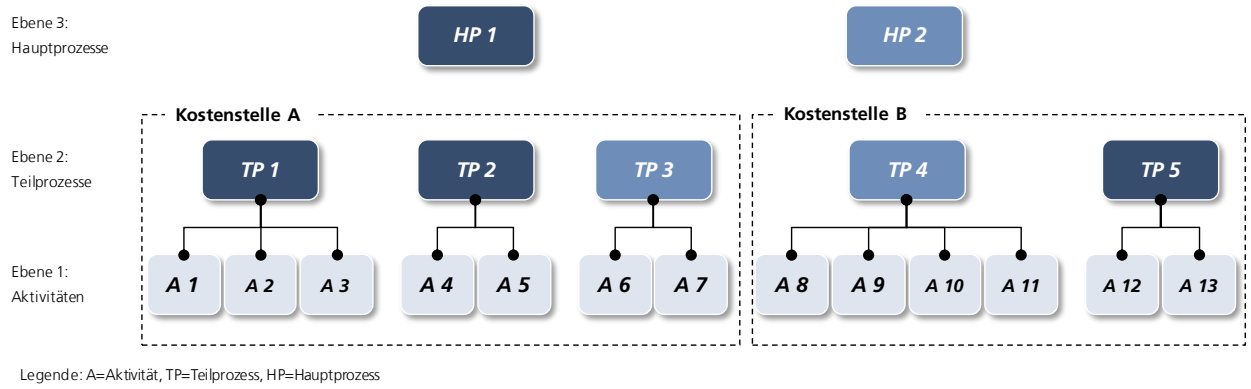


Abbildung 4-12: Prozesshierarchie nach Joos[108]

Ein Kostentreiber (engl.: Cost Driver) stellt das quantitative Merkmal dar, welches die Kosten der jeweiligen Tätigkeit oder des Prozesses aus dem indirekten Bereich bestimmt.[109] Zu unterscheiden sind hierbei leistungsmengeninduzierte Prozesse (lmi-Prozesse) und leistungsmengenneutrale Prozesse (lmn-Prozesse). Erstere sind leistungsvolumenabhängige Prozesse und können in ihrem Umfang quantifiziert werden, während letztere leistungsmengenneutral sind. Für jeden lmi-Prozess sind dementsprechend Kostentreiber zu bestimmen.[110] Bespiele für lmn-Prozesse sind Angebote bearbeiten oder Material prüfen, während Abteilung leiten oder Abläufe organisieren als lmi-

[102] Posluschny (2009), Kostenrechnen leicht gemacht, S. 96.
[103] Posluschny (2009), Kostenrechnen leicht gemacht, S. 96.
[104] Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 46Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 46.
[105] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 152.
[106] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 277f.Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 277f.
[107] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 153.
[108] Joos-Sachse (2014), Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement, S. 353.
[109] Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 48.
[110] Joos-Sachse (2014), Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement, S. 355.

Prozesse zu interpretieren sind.[111] Als wichtigste Anforderungen an die Kostentreiber sind eine proportionale Beziehung zu Kostenstellenkosten und ein nachvollziehbarer Bezug zu Kostenträgern[112] zu erwähnen.[113]

In der Regel handelt es sich bei Kostentreibern um Mengen- oder Zeitgrößen. Beispiele hierfür sind die Zahl der Materialbestellungen oder die Zahl der Kundenaufträge. Mit der zahlenmäßigen Ausprägung des Kostentreibers ist die Prozessmenge gemeint, bei der es sich beispielhaft um 1.000 Materialbestellungen handeln könnte.[114] Der empfohlene Planungshorizont für Prozessmengen beträgt ein oder mehr Jahre, um kurzfristige Ausreißer zu vermeiden. Die Komprimierung erweist sich dabei als Vorteil bei der Planung der Prozessmengen, da es sich um eine übersichtliche und zusammenhängende Darstellung der Prozesse handelt, anhand der ein Herunterbrechen auf einzelne Teilprozesse vorgenommen wird und damit eine abgestimmte Kostenplanung gemacht werden kann. Voraussetzung ist hierfür jedoch eine plausible Produkt- und Prozessmengenstruktur.[115]

Die definierten Prozesse, Kostentreiber sowie Prozessmengen bilden die Grundlage für eine verursachungsgerechtere Zuordnung der Kosten im Rahmen der Prozesskostenkalkulation, in der Prozesskosten erhoben, Prozesskostensätze ermittelt, Kosten von lmn-Prozessen verrechnet werden und abschließend eine Zurechnung zum Kostenträger erfolgt.[116]

Die Prozesskosten setzen sich hauptsächlich aus Personalkosten zusammen, die um Raum-, Strom-, und Büromaterialkosten erweitert werden können.[117] Der lmi-Prozesskostensatz ergibt sich durch Anwendung des Durchschnittsprinzips, indem das Verhältnis von Prozesskosten zu Prozessmenge gebildet wird (vgl. Formel 2).[118]

$$lmi - Prozesskostensatz = \frac{Prozesskosten}{Prozessmenge} = \frac{Input}{Output} \tag{5}$$

Zusätzlich zu dem direkt ermittelten lmi-Prozesskostensatz müssen im Sinne einer Vollkostenrechnung die lmn-Kosten auf die Kostenträger verrechnet werden. Dazu kann der Umschlagesatz in proportionaler Abhängigkeit der lmi-Prozesskostensätze ermittelt werden (vgl. Formel (5)). Der Gesamtprozesskostensatz ist die Summe aus dem lmi-, und lmn-Prozesskostensatz.[119]

$lmn - Prozesskostensatz$:

$$= \frac{lmi - Prozesskostensatz}{\sum lmi - Prozesskostensatz} * \sum lmn - Prozesskostensatz \tag{6}$$

Die proportionale Art der Verrechnung gilt zwar als aufwandsarm, jedoch können unkorrekte Rückschlüsse gezogen werden, da lmn-Prozesse in ihrem Grund unabhängig von einzelnen Prozessen und Prozessmengen sind. Als Alternative sollte entweder nur von den lmi-Prozesskostensätzen aus-

[111] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 159.
[112] i.d.R. Endprodukte, vgl. Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 50
[113] Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 49.
[114] Joos-Sachse (2014), Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement, S. 356.
[115] Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 56.
[116] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 156ff.
[117] Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 57.
[118] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 158.
[119] Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 60.

gegangen werden oder die lmn-Prozesskosten kostenstellenübergreifend zusammengefasst und mit prozentualen Zuschlägen auf die Gesamtsumme der produktbezogenen Einzel- und Prozesskosten verrechnet werden.[120]

Abschließend gilt es die Prozesskostensätze den Kostenträgern bei Inanspruchnahme des jeweiligen Prozesses zuzuordnen, was durch die direkte oder indirekte Prozesskostenkalkulation erfolgt. Bei direktem Zusammenhang zwischen Prozess und dem Kostenträger ist der jeweilige Prozesskostensatz mit der Anzahl der benötigten Prozessanzahl zur Erzeugung einer Einheit zu multiplizieren. Die indirekte Prozesskalkulation hingegen kommt zum Einsatz, wenn Prozesse nicht einer Einheit des Kostenträgers zugeordnet werden können, sondern in Abhängigkeit von einer Losgröße stehen (vgl. Abbildung 4-13: Arten der indirekten Prozesskalkulation). Beim einstufigen mengenorientierten Verfahren wird beispielsweise der Prozesskostensatz durch die korrelierte Gesamtlosgröße dividiert, um Kosten je Einheit des Kostenträgers zu erhalten. Beim mehrstufigen Verfahren hingegen werden die unterschiedlichen Mengen der verschiedenen Bauteile oder Varianten eines Produktes bei der Kalkulation zu einer Kostenträgereinheit berücksichtigt.[121]

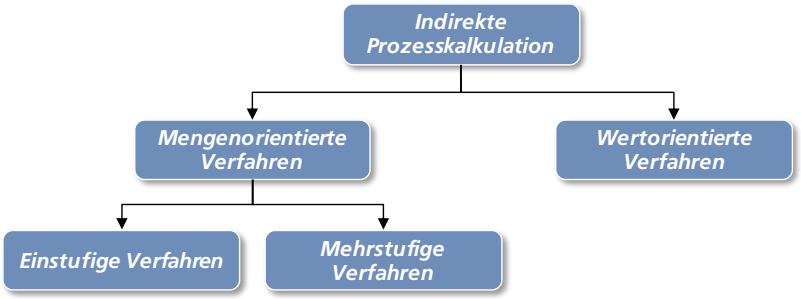


Abbildung 4-13: Arten der indirekten Prozesskalkulation[122]

Zum Abschluss werden die Unzulänglichkeiten und die Vorteile der Prozesskostenkostenrechnung gegenübergestellt. Kritisch anzumerken ist die Prämisse einer proportionalen Beziehung zwischen Ressourcenverzehr und Prozessmenge, da diese die Folgen von Größendegressionseffekten wie Automatisierung oder Lerneffekten verletzt. Ebenso können die Resultate der Prozesskostenrechnung durch die Aufschlüsselung der Gemeinkosten, wie der Bündelung von Tätigkeiten zu Hauptprozessen sowie der Verrechnung von lmn-Prozessen, beeinflusst werden. Weiterhin muss betont werden, dass die Prozesskostenrechnung nur für repetitive Prozesse geeignet ist, sich nicht für eine kurzfristige Planung eignet und durch die Ermittlung der wesentlichen Größen wie Prozessen, Kostentreibern, Prozessmengen sowie Prozesskosten ein hoher Implementierungsaufwand besteht. Allerdings trägt die Prozesskostenrechnung stark zur Kosten-, und Prozesstransparenz der indirekten Leistungsbereiche im Unternehmen bei. Aus den Informationen lassen sich Gestaltungsmöglichkeiten von einzelnen Prozessen ableiten sowie das Denken und die Zusammenarbeit auf kostenstellenübergreifender Ebene fördern.[123] Ein weiterer großer Vorteil des Verfahrens ist seine vielseitige Einsetzbarkeit und praxisnahe Kombinierbarkeit mit anderen Instrumenten der Kostenrechnungen wie der Zuschlagskalkulation oder der Deckungsbeitragsrechnung, die den Arbeitsaufwand im Vergleich zur Einführung einer allumfassenden Prozesskostenrechnung vermindert.[124]

[120] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 160f.
[121] Joos-Sachse (2014), Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement, S. 361f.
[122] Joos-Sachse (2014), Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement, S. 362.
[123] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 296ff.
[124] Horváth und Mayer (2011), Prozesskostenrechnung, S. 6.

4.2.2 Vorgehen im Forschungsprojekt

Weiterhin wird im zweiten Arbeitspaket ein Vorgehensmodell zur Bewertung der Prozesskosten einer solarthermischen Kombianlage entworfen. Damit lassen sich diejenigen Kosten aufnehmen und aufnehmen und bewerten, welche entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Erzeuger über den Handel, den Handwerker bis hin zum Kunden, durch einzelne Anlagenvarianten erzeugt werden. Dieses Modell stellt eine Ergänzung der Wertanalyse aus Abschnitt 4.1 dar. Da die Wertanalyse ausschließlich auf die direkt zuordenbaren Materialkosten abzielt, stellt die Prozesskostenanalyse einen Hebel dar, um auch die indirekten Kosten entlang des Wertschöpfungsprozess aufdecken und optimieren zu können. Durch das Instrument der Prozesskostenanalyse wird eine Transparenz und verursachungsgerechte Zuordnung des über die Jahre ansteigenden Anteils des Gemeinkostenblocks, bedingt durch höhere Variantenvielfalt und komplexere Produkte, ermöglicht. Der Gemeinkostenblock wird demnach nicht durch Zuschläge auf Einzelkosten verrechnet, sondern den verursachenden Varianten zugerechnet. Hierfür werden im Rahmen der Prozesskostenanalyse die in den Gemeinkostenblöcken enthaltenen varianteninduzierten Kosten bestimmt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird die Wertschöpfungskette dazu durch die drei Akteure Zulieferer, Hersteller/Systemanbieter sowie dem, die solarthermische Kombianlage installierenden Handwerker abgebildet. Der Großhandel kann in der Betrachtung aufgrund keiner signifikanter Auswirkungen auf die Modellierung vernachlässigt werden. Die im Folgenden vorgestellten Methodenschritte werden anhand der Anwendung beim Zulieferer erläutert aber behalten ihre Gültigkeit für den Hersteller und das Handwerk. Anzumerken ist hierbei, dass für die Akteure Zulieferer und Handwerker ein Modell zur Errechnung der Komplexitätskosten unter Mitarbeit der jeweils unternehmensinternen Experten erstellt wird. Hingegen basieren die Daten für die Herstellerperspektive aus anonymisierten Werten, die außerhalb dieses Forschungsprojekts vom Werkzeugmaschinenlabor WZL erhoben werden.

Methodenschritt 1: Aufbau eines Prozessmodells

Der erste Methodenschritt dient dazu, ein umfassendes Prozessmodell der Abteilungen oder Funktionsbereiche des Unternehmens aufzubauen. Im Zentrum der Betrachtung stehen dabei diejenigen Abteilungen, die unmittelbar und am stärksten von der zunehmenden Komplexität weiterer Varianten von solarthermischen Kombianlagen betroffen sind. Dazu zählen in den industriellen Unternehmen vor allem die Entwicklung, das Produktmanagement sowie die Produktion. Aber auch der Einkauf oder das Marketing kann in die Analyse eingeschlossen werden. In Handwerksbetrieben haben sich vor allem die Angebotserstellung und der Service als relevante Funktionsbereiche herausgestellt.

Innerhalb der identifizierten Abteilungen werden die einzelnen Arbeitsschritte auf dem Level von Teilprozessschritten, wie „Arbeitsplan anlegen“ im industriellen Umfeld oder „Angebotsvorlage aktualisieren“ im Handwerk aufgenommen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wird aufgrund von begrenzten Kapazitäten dazu zunächst ein generisches Prozessmodell für elf Abteilungen des Projektpartners entworfen. Dieses Modell beinhaltet typische komplexitätsbehaftete Teilprozessschritte der jeweiligen Abteilungen und wird durch den Projektpartner eigenständig auf die tatsächlich auftretenden Schritte spezifiziert. Die zu berücksichtigenden Prozessschritte der einzelnen Abteilungen können dabei in Interviews durch ein Abfragen konkreter Szenarien, wie die „Modifikation eines Bauteils“ oder „Ergänzung eines Produktkatalogs“ aufgedeckt werden.

Parallel zur Bestimmung der Prozessschritte werden zusätzlich die Ressourcen aufgenommen, welche an der Durchführung einzelner Aktivitäten beteiligt sind. Zur Vereinfachung des Modells und aufgrund eines bedeutenden Anteils von Personalkosten an den Gesamtkosten der analysierten Abteilungen, wird lediglich die Ressource Mitarbeiter und nicht beispielsweise weitere Betriebsmittel betrachtet. Jedoch lassen sich je Abteilung unterschiedliche Mitarbeiterressourcen identifizieren. So treten in der Produktion beispielsweise reguläre Produktionsmitarbeiter, aber auch Mitarbeiter

für die Prüftechnik oder Lagerarbeiter auf, welche jeweils unterschiedliche Kostensätze abrufen (vgl. Abbildung 4-14).

Produktion			
Ansprechpartner:			
Eingabegrößen	**Ressource 1**	**Ressource 2**	**Ressource 3**
Ressource	Mitarbeiter Produktion	Mitarbeiter Prüftechnik	Mitarbeiter Lager
Einheit			
Ressourcenverbrauch p.a. in Einheiten			
Ressourcenverbrauch p.a. in h			
Durchschn. Kostensatz pro Stunde:	17,65 €/h	30,56 €/h	17,65 €/h

Teilprozesse	**Ressource**
1) Planung neuer Produkte und Teile	
Abstimmung Verarbeitung der Teile mit Produktionsplanung	Mitarbeiter Produktion
Abstimmung Verarbeitung der Teile mit Produktionsplanung	Mitarbeiter Produktion
Abstimmung und Freigabe Produktunterlagen (Arbeitspläne, Montagepläne	Mitarbeiter Produktion
Abstimmung und Freigabe Produktunterlagen (Arbeitspläne, Montagepläne	Mitarbeiter Produktion
2) Verwendung neuer/geänderter Betriebsmittel	
Änderung am Betriebsmittel	Mitarbeiter Produktion
Änderung am Betriebsmittel	Mitarbeiter Produktion
3) Änderungsumsetzung	
Änderungskoordination Werkstatt (Planung und Umsetzung)	Mitarbeiter Produktion
Änderungskoordination Werkstatt (Planung und Umsetzung)	Mitarbeiter Produktion
Änderungsumsetzung in der Produktion	Mitarbeiter Produktion
Änderungsumsetzung in der Produktion	Mitarbeiter Produktion
4) Fertigungsendprüfung	
Festlegung Fertigungsendprüfung	Mitarbeiter Prüftechnik
Festlegung Fertigungsendprüfung	Mitarbeiter Prüftechnik
Abstimmung Verpackung	Mitarbeiter Produktion
Abstimmung Verpackung	Mitarbeiter Produktion
5) Lagerung von Artikeln und Materialien	
Einlagerung neuer Artikel (Lagerplatz anlegen)	Mitarbeiter Lager
Einlagerung neuer Artikel (Lagerplatz anlegen)	Mitarbeiter Lager
Lagerpflege (Inventur etc)	Mitarbeiter Lager
Lagerpflege (Inventur etc)	Mitarbeiter Lager

Abbildung 4-14: Ausschnitt des generischen Prozessmodells der Abteilung Produktion

Das Ergebnis des ersten Methodenschritts ist ein umfassendes und detailliertes Modell der Prozessschritte wesentlicher Abteilungen sowie die Übersicht der relevanten Ressourcen, welche zur Durchführung der Arbeitsschritte benötigt werden.

Methodenschritt 2: Erfassung des komplexitätsbedingen Aufwands und Komplexitätstreibern

Das Ziel des zweiten Methodenschritts ist die Ergänzung des Prozessmodells um die konkreten Kosten der identifizierten Prozessschritte in Abhängigkeit sogenannter Komplexitätstreiber.

Als Komplexitätstreiber werden die Größen verstanden, von denen der Aufwand der jeweiligen Arbeitsschritte des Prozessmodels abhängt. Von der Qualität dieser Treiber hängt maßgeblich das Gesamtergebnis dieses Vorgehensmodells ab. Daher müssen die Komplexitätstreiber gewissenhaft in sogenannten Komplexitätskosteninterviews identifiziert und deren Aufwand sorgfältig evaluiert werden. Typische Treiber sind beispielweise die Anzahl der Materialnummern für den Teilprozessschritt „Stammdatenpflege" oder die Anzahl der Sprachen bei der „Erstellung von Handbüchern" in der Produktdokumentation.

Die Aufwände für die Komplexitätstreiber werden als Zeit angegeben, welche die identifizierte Ressource den Treiber in dem jeweiligen Prozessschritt bearbeitet. Dabei wird der Einfachheit halber ein linearer Zusammenhang zwischen der Zeit und dem Aufwand angenommen. Bei der Durchführung des Methodenschritts mit den am Forschungsprojekt beteiligten Unternehmen hat sich sowohl industrieseitig als auch im Handwerk gezeigt, dass die größte Herausforderung in der Bestimmung des Aufwands je Treiber und Prozessschritt lag. Es hat sich dabei als hilfreich erwiesen die Aufwän-

de über Nebenrechnungen grob abzuschätzen. So fiel es den Interviewpartnern beispielsweise schwer den Aufwand für die Pflege der Stammdaten einzelner Materialnummern abzuschätzen. Einfacher ist es jedoch zu beziffern, wie viele Stammdaten im Jahr gepflegt werden und wie viele FTE diese Aufgabe erfüllen. Über die jährliche Arbeitszeit eines FTE konnte so zumindest eine Abschätzung getroffen werden.

Weiterhin gilt es in diesem Methodenschritt zu differenzieren, inwiefern die Aufwände einmalig anfallen oder regelmäßig anfallen. Letztere müssen dabei für alle Prozessschritte und alle Abteilungen auf einen einheitlichen Zeitraum skaliert werden, um die Vergleichbarkeit und die Aggregation zu einem Gesamtmodell zu ermöglichen. Es hat sich dabei als hilfreich erwiesen, die laufenden Aufwände stets auf ein Geschäftsjahr zu beziehen, um sicherzustellen, dass alle Prozesse einmal vollständig durchlaufen werden.

Das Ergebnis des zweiten Methodenschrittes ist somit ein prozessorientiertes Kostenmodell, das jedem komplexitätsbehafteten Prozess eine Ressource und einen Kostentreiber mit dem entsprechenden Kostensatz zuordnet und zwischen laufenden und einmaligen Teilprozesskosten unterscheidet (vgl. Abbildung 4-15).

Produktmanagement	
Ansprechpartner:	
Eingabegrößen	**Ressource 1**
Ressource	Mitarbeiter Produktmanagement
Einheit	
Ressourcenverbrauch p.a. in Einheiten	
Ressourcenverbrauch p.a. in h	
Durchschn. Kostensatz pro Stunde:	42,21 €/h

Teilprozesse	Ressource	Kostentreiber	Kategorien	Aufwand in Stunden (h)	Kosten pro Kostentreiber (€)	laufend	einmalig
1) Product Request (PR) bearbeiten							
Technische Bewertung des PR, keine neu	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Produktadaption	2,00 h	84,42 €		x
Technische Bewertung des PR, keine neu	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neuprodukt (best. Serie)	10,00 h	422,10 €		x
Technische Bewertung des PR, keine neu	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 1 Variante(n)	45,00 h	1.899,45 €		x
Technische Bewertung des PR, keine neu	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 2 Variante(n)	90,00 h	3.798,90 €		x
Technische Bewertung des PR, keine neu	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 3 Variante(n)	135,00 h	5.698,35 €		x
Technische Bewertung des PR, keine neu	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 4 Variante(n)	180,00 h	7.597,80 €		x
Wirtschaftliche Bewertung des PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Produktadaption	2,00 h	84,42 €		x
Wirtschaftliche Bewertung des PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neuprodukt (best. Serie)	10,00 h	422,10 €		x
Wirtschaftliche Bewertung des PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 1 Variante(n)	45,00 h	1.899,45 €		x
Wirtschaftliche Bewertung des PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 2 Variante(n)	90,00 h	3.798,90 €		x
Wirtschaftliche Bewertung des PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 3 Variante(n)	135,00 h	5.698,35 €		x
Wirtschaftliche Bewertung des PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 4 Variante(n)	180,00 h	7.597,80 €		x
Marktrecherche zum PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Produktadaption	1,00 h	42,21 €		x
Marktrecherche zum PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neuprodukt (best. Serie)	16,00 h	675,36 €		x
Marktrecherche zum PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 1 Variante(n)	80,00 h	3.376,80 €		x
Marktrecherche zum PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 2 Variante(n)	160,00 h	6.753,60 €		x
Marktrecherche zum PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 3 Variante(n)	240,00 h	10.130,40 €		x
Marktrecherche zum PR	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 4 Variante(n)	320,00 h	13.507,20 €		x
Erstentwurf Lastenheft	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Produktadaption	2,00 h	84,42 €		x
Erstentwurf Lastenheft	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neuprodukt (best. Serie)	10,00 h	422,10 €		x
Erstentwurf Lastenheft	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 1 Variante(n)	45,00 h	1.899,45 €		x
Erstentwurf Lastenheft	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 2 Variante(n)	90,00 h	3.798,90 €		x
Erstentwurf Lastenheft	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 3 Variante(n)	135,00 h	5.698,35 €		x
Erstentwurf Lastenheft	Mitarbeiter Produktmanagement	Projekttyp	Neue Produktserie 4 Variante(n)	180,00 h	7.597,80 €		x

Abbildung 4-15: Ausschnitt des Komplexitätskostenmodells für die Abteilung Produktmanagement

Methodenschritt 3: Ableitung des Gesamtmodells der Komplexitätstreiber

Das Ziel des dritten Methodenschrittes ist die Aggregation der Komplexitätskostentreiber. So lässt sich ein gesamtheitliches Komplexitätskostenmodell für das jeweilige Unternehmen erstellen.

Aufbauend auf den ersten beiden Methodenschritten werden die identifizierten Kosten der Teilprozesse je Komplexitätstreiber im Rahmen einer komplexitätstreiberbasierten Evaluierung aggregiert. Dazu wird zunächst eine Homogenisierung der Komplexitätstreiber zwischen den unterschiedlichen Abteilungen vorgenommen. Anschließend lässt sich das unternehmensspezifische Komplexitätskostenmodell aufbauen. Dazu werden die identischen Kostentreiber der einzelnen Abteilungen zusammengefasst und deren finanzielle Auswirkungen summiert. So lässt sich allgemein der gesamtunternehmerische Aufwand einzelner Komplexitätstreiber angeben.

In dem Komplexitätskostenmodell können so auf Basis der einzelnen Treiber verschiede Referenzfälle simuliert und die gesamten Abteilungsübergreifenden Komplexitätskosten erfasst werden. Weiterhin können in Abhängigkeit der Ausprägungen der Kostentreiber die laufenden und initialen Kosten ermittelt und Referenzmodelle miteinander verglichen werden. Dazu wird das Modell im Rahmen des Forschungsprojekts in einem Microsoft Excel-basierten Tool umgesetzt (vgl. Abbildung 4-16).

Das Ergebnis des dritten Methodenschritts ist das vollständige und unternehmensspezifische Komplexitätskostenmodell, welches die komplexitätsabhängigen Aufwände des Unternehmens abbildet. Die weiteren Funktionalitäten und die Anwendung des Modells werden ausführlich im nachfolgenden Kapitel Methodenschritt 4: Bewertung von Referenzfällen erläutert.

Kostentreiberbasierte Evaluierung

Kostentreiber pro Unternehmensbereich	Anzahl/ Auswahl	Eingabefeld	Gesamtkosten für 1. Jahr:	laufende Kosten:	einmalige Kosten:
			- €	- €	- €
Produktmanagement					
Projekttyp	Auswahl		- €	- €	- €
Anzahl neuer Artikel	Anzahl		- €	- €	- €
Projektleitung					
Projekttyp	Auswahl		- €	- €	- €
Konstruktion Mech.-Hydr.					
Anzahl neuer Artikel (mech.)	Anzahl		- €	- €	- €
Anzahl neuer mech. Bauteile	Anzahl		- €	- €	- €
Anzahl neuer mech. Baugruppen	Anzahl		- €	- €	- €
Anzahl mech. Neugeräte	Anzahl		- €	- €	- €
Anzahl neuer Materialnummern (mech. Bauteil)	Anzahl		- €	- €	- €
Anzahl neuer Materialnummern (mech. Baugruppe)	Anzahl		- €	- €	- €
Anzahl neuer Materialnummern (mech. Neugerät)	Anzahl		- €	- €	- €

Abbildung 4-16: Ausschnitt der kostentreiberbasierten Evaluierung

Methodenschritt 4: Bewertung von Referenzfällen

Das Ziel des vierten Methodenschritts ist die Definition und der Aufbau von Referenzfällen zur Bewertung der typischen Komplexitätskosten eines Unternehmens. Typische Referenzfälle sind beispielsweise die Erstellung einer neuen Variante eines Bauteils, einer Baugruppe oder einer Produktvariante.

Für jeden dieser identifizierten Referenzfälle findet eine Quantifizierung der zuvor bestimmten Komplexitätstreiber im aufgebauten Komplexitätskostenmodell statt. So kann sich beispielsweise die Einführung einer neuen Baugruppe für eine Produktvariante aus zwei zusätzlichen mechanisch-hydraulischen Bauteilen und einem elektronischen Bauteil ohne Software zusammensetzten. Diese beiden Komplexitätstreiber führen somit sowohl in der mechanisch-hydraulischen als auch in der elektronischen Konstruktion zu Aufwänden. Außerdem müssen in der Funktionsprüfung neue Prüfpläne geschrieben werden, sodass auch hier komplexitätsbedingte Kosten entstehen. Weiterhin ist es denkbar, dass neue strategische Lieferanten eingebunden werden müssen und so auch Kosten für Verhandlungen und Zertifizierung im Einkaufsbereich anfallen.

Die Quantifizierung der einzelnen Treiber während des Konfigurationsprozess führt jedoch nicht nur zu einer Aufschlüsselung der initialen Komplexitätskosten. Durch die Aufnahme der laufendenden Kosten in Abhängigkeit der identischen Komplexitätstreiber im Methodenschritt 2, werden automatisch auch die laufenden Komplexitätskosten ausgegeben. Auf diese Weise lassen sich verschiede Referenzfälle äußerst präzise konfigurieren, um so zunächst unternehmensintern die Kosten eines Unternehmens zu analysieren.

Im Rahmen des Forschungsprojekts gilt es jedoch nicht nur die komplexitätsabhängigen Aufwände eines Unternehmens abzubilden, vielmehr ist es das Ziel die Kosten der gesamten Wertschöpfungskette zu erkennen. Dazu werden separate Komplexitätskostenmodelle für ein Zuliefererunterneh-

men, den Systemhersteller sowie einen Handwerksbetrieb aufgebaut. Es ist jedoch nicht möglich, die Komplexitätstreiber der verschiedenen Wertschöpfungsstufen inhaltlich miteinander so in Bezug zu setzen, dass eine durchgängige vollautomatisierte Konfiguration der gesamten Wertschöpfungskette ermöglicht wird. Dieses lässt sich damit begründen, dass das Endprodukt des Zulieferers bereits eine Baugruppe oder Komponente des Systemherstellers ist. Es existieren zu viele Varianten möglicher Verbindungen um diese vollumfänglich modellieren zu können. Daher wird eine referenzfallbasierte Vorgehensweise gewählt. Dabei wird ein Referenzfall für einen der drei Akteure definiert und anschließend werden die Auswirkungen dieses Falls für die anderen beiden Wertschöpfungsstufen untersucht. Darauf aufbauend werden die entsprechenden Referenzfälle in diesem Unternehmen konfiguriert. Abbildung 4-19 zeigt beispielhaft den Fall, dass eine Produktneuentwicklung des Zulieferers eine Produktadaption des Systemherstellers auslöst. Für den Handwerksbetrieb bedeutet diese Adaption eine weitere Installationsvariante.

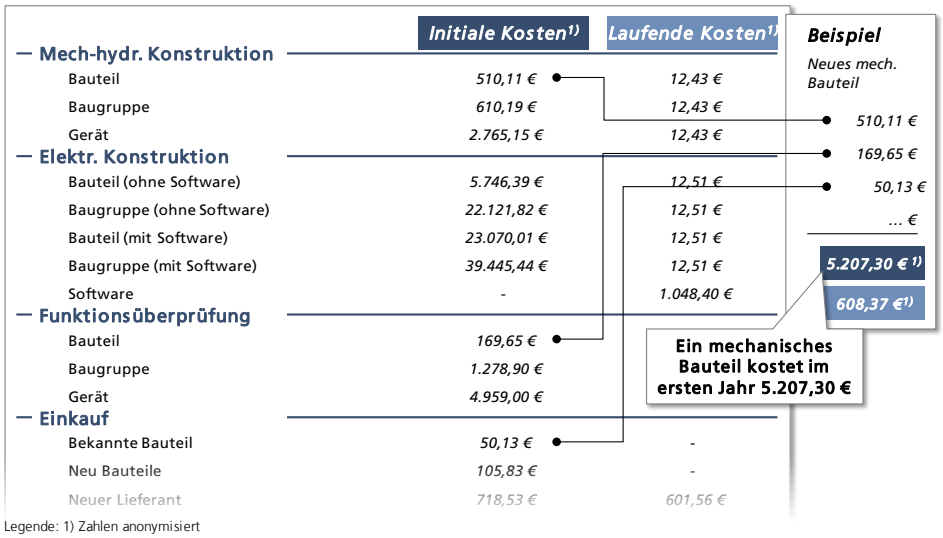
Das Ergebnis des vierten Methodenschritts ist somit zunächst eine detaillierte Betrachtung der komplexitätsbasierten Aufwände für einzelne Unternehmen. Weiterhin lassen sich jedoch auch die Auswirkungen von Produktänderungen in einer Stufe der Wertschöpfungskette auf die übrigen Akteure analysieren und bewerten.

4.2.3 Ergebnisse und Restriktionen

Zur Validierung der in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Methodenschritte werden diese vollständig mit dem beteiligten industriellen Projektpartner durchlaufen. Dazu werden im Folgenden die unternehmensinternen Ergebnisse anonymisiert, die unternehmensübergreifenden Ergebnisse vorgestellt und auf Limitationen der Ergebnisse hingewiesen.

Für den beteiligten industriellen Projektpartner stellt das vollständige Komplexitätskostenmodell des Unternehmens das zentrale Ergebnis dieses Arbeitspakets dar. Dazu zeigt Abbildung 4-17 beispielhaft den Anwendungsfall der Bewertung eines neuen mechanischen Bauteils. Es wird deutlich, dass die mechanische Konstruktion eines mechanischen Bauteils zunächst in der Entwicklung finanzielle Aufwände in der Höhe von 510,11 € erzeugt. Die elektrische Konstruktion ist in diesem Anwendungsfall nicht betroffen, sodass hier keine Aufwände berücksichtigt werden müssen. Für die Durchführung der Funktionsüberprüfung fallen einmalig Aufwände in Höhe von 169,65 € an. So lassen sich systematisch die einmaligen und laufenden Aufwände aller Unternehmensbereiche auflisten und zu einem durchgängigen Anwendungsfall konfigurieren. Das Ergebnis für ein neues mechanisches Bauteil ergibt sich zu 5.207,30 € im ersten Jahr. Die laufenden Kosten aller drauffolgenden Jahre betragen 608,37 € pro Jahr. Die Kosten beinhalten keine Herstellungs- oder Materialkosten. Sie veranschaulichen lediglich den notwendigen finanziellen Aufwand dafür, dass dieses Bauteil im Unternehmen „lebendig bleibt" und produziert werden könnte.

So ist ein erstes Ergebnis des Arbeitspakets das Aufdecken von bislang intransparenten, da in den Gemeinkosten versteckten, Kosten der Wertschöpfungskette eines Unternehmens der Solarthermiebranche. Mithilfe dieses Ergebnisses können vor allem Variantenentscheidungen besser getroffen werden, da die vollständigen finanziellen Auswirkungen konstruktiv neuer Varianten auf das Unternehmen sichtbar werden.



Legende: 1) Zahlen anonymisiert

Abbildung 4-17: Ausschnitt der kostentreiberbasierten Evaluierung für ein neues mechanisches Bauteil

Das zweite Ziel des Forschungsprojekts ist der Übertrag dieser Transparenz auf die vollständige Wertschöpfungskette der Branche. Auch hier muss zunächst auf die Limitationen der Ergebnisse eingegangen werden. Wie bereits oben beschrieben, ist es nicht möglich einheitliche Komplexitätskostentreiber für die gesamte Wertschöpfungskette zu ermitteln.

Die Lösung zum Erreichen des definierten Ziels liegt darin, für eine gesamtheitliche Betrachtung der Wertschöpfungskette und der Vergleichbarkeit zwischen den Akteuren die Komplexitätstreiber der jeweiligen Prozesskostenmodelle von Zulieferer, Hersteller und Handwerk zu aggregieren und möglichst zu standardisieren (vgl. Abbildung 4-18). Das bedeutet, dass Kostentreiber funktionsübergreifend betrachtet und bei inhaltlicher Ähnlichkeit zusammengefasst werden.

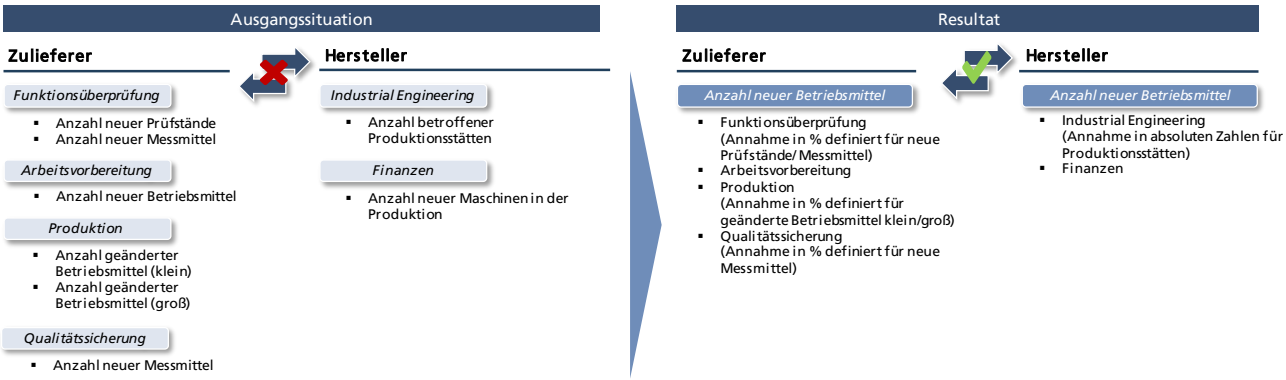


Abbildung 4-18: Beispiel der Aggregation und Standardisierung von Kostentreibern zwischen Zulieferer und Hersteller

Anhand der so standardisierten und aggregierten Kostentreiber sind Referenzfälle nicht nur innerhalb der eigenen Wertschöpfungsleistung je Akteur erstellbar, sondern können vielmehr in ihrer gesamtheitlichen Auswirkung auf die Wertschöpfungskette betrachtet werden, was Ausgangspunkt des Bedarfs zur Einsatz der Prozesskostenanalyse im Rahmen dieses Forschungsprojektes darstellt. Dazu zeigt Abbildung 4-19 exemplarisch die durchgängige Betrachtung die Änderungen einer Komponente einer solarthermischen Kombianlage. Es wird deutlich, dass diese verhältnismäßig geringe Kostenänderung beim Zulieferer, vor allem beim Systemhersteller um ca. 400 % höhere Kosten hervorruft. Dieses Ergebnis zeigt eindrucksvoll die Notwendigkeit die vollständige Wertschöpfungskette bei der Bewertung von Produktoptimierungen zu betrachten. Nur so kann eine

branchenweite Optimierung von solarthermischen Anlagen erreicht werden. Dazu liefern die in diesem Forschungsprojekt erstellten Kostenmodelle erste Hinweise, welche Auswirkungen Produktänderungen in einem Glied der Lieferkette haben können. Zusätzlich befähigt die vollständige Methodik des Forschungsprojektes Unternehmen der Solarthermiebranche diese Kosten im Detail zu ermitteln und so auch, anstelle eines Teilbereichs, die gesamte Wertschöpfungskette zu optimieren.

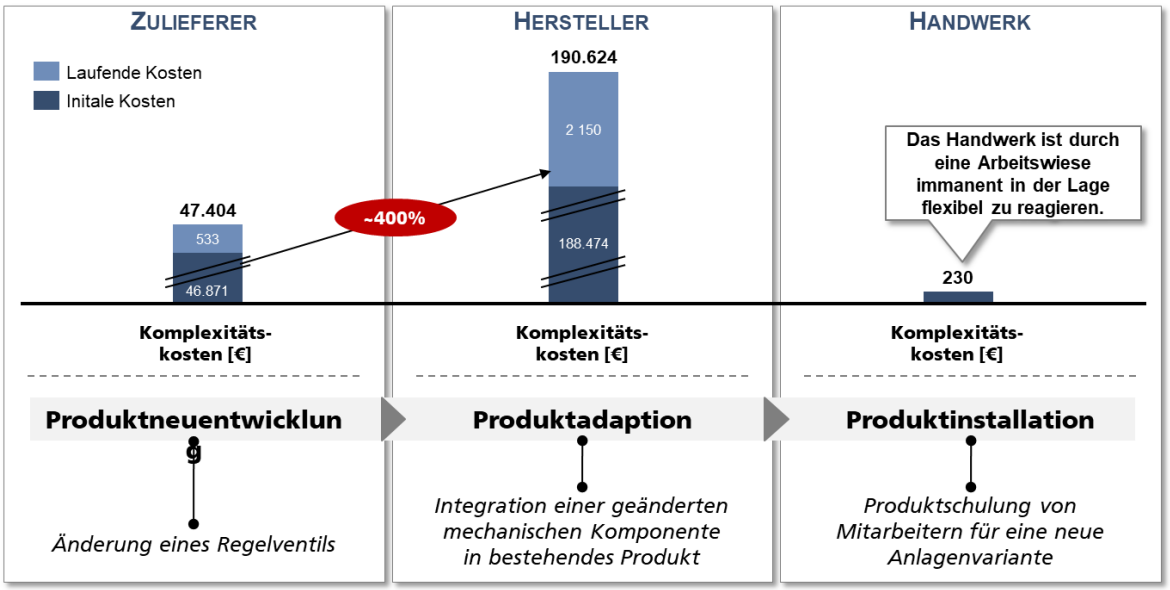


Abbildung 4-19: Beispielhafte Betrachtung der Komplexitätskosten in der Wertschöpfungskette

4.3 Exkurs: Komplexität solarthermischer Bauprojekte

Da im Projekt ein möglichst umfassendes Bild von der Anwendung solarthermischer Kombisysteme notwendig war, ist ein Blick in die Praxis unabdingbar. Diese Tatsache sorgt dafür, dass eine Kostenbetrachtung erschwert wird. Eine kostenseitige Verallgemeinerung ist nur durch das Treffen von Annahmen erreichbar.

Innerhalb des Projektes *TEWISol* kam es zu einer Verschiebung des Fokus von Seiten des Projektpartners vom klassischen Einfamilienhaus zum Geschosswohnungsbau. An dieser Stelle erfolgt eine Beschreibung der Abläufe vor, während und nach der Anlageninstallation bei Bauprojekten in Mehrfamilienhäusern. Außerdem werden die beteiligten Akteure charakterisiert. Dabei gibt es nicht den einen Weg, den alle Bauprojekte nehmen, sondern viele Möglichkeiten. Hinzu kommen die unterschiedlichen Sichtweisen und Anforderungen der verschiedenen Stakeholder.

Als Auftraggeber kommen im Geschosswohnungsbau zum Beispiel Eigennutzer oder private Vermieter, die sich in Wohnungseigentümergemeinschaften zusammenschließen, in Frage. Des Weiteren sind Genossenschaften, private und kommunale Wohnungsbaugesellschaften oder große Immobilienunternehmen als potentielle Auftraggeber zu nennen.[125]

Investitionen sind vor den Eigen- und Fremdkapitalgebern zu rechtfertigen. Daher erfolgt eine Planung der Anlage durch interne oder externe Fachleute. Ziel der Planung ist es die umzusetzenden Baumaßnahmen vorstellbarer zu machen, eine Kosteneinschätzung zu erlauben und, falls möglich,

[125] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015), Energieeffizienzstrategie Gebäude, S. 57.

technische Alternativen aufzuzeigen. Dabei spielen auch Energieeffizienzziele eine Rolle. Diese müssen erreicht werden, um die gesetzlichen Anforderungen sowie die der Geldgeber zu erfüllen. Zur Planung werden deshalb auch oftmals Energieberater hinzugezogen. Ein weiterer Punkt, der die Planung maßgeblich beeinflusst, ist die Frage ob es sich um einen Neubau oder ein Bestandsgebäude handelt. Während im Neubau weitestgehend planerische Freiheiten gegeben sind, sind im Bestandsgebäude vorhandene Geometrien, Bewohnerstrukturen etc. zu berücksichtigen. Auch ist im Bestand bei vermieteten Gebäuden der Mieter ins Bauvorhaben ein zu beziehen.

Der Mieter ist in der Umbauphase der „Leidtragende" und hat bei einer Steigerung des Wohnwerts durch die Umbaumaßnahmen mit Mieterhöhungen zu rechnen[126].

Alternativ zur Übernahme der Baumaßnahmen durch den Eigentümer des Mehrfamilienhauses, ist die Abgabe der Verantwortlichkeit für die Wärmebereitstellung für Beheizung und TWW-Bereitung an einen Wärmecontractor möglich. Durch höhere Abnahmemengen und eine starke Spezialisierung in ihrem Bereich, können Contracting-Unternehmen Kostenvorteile gegenüber anderen (Handwerks-) unternehmen generieren. Contracting wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, da dies zu weit führt.

Für die Ausführung der Arbeiten wird häufig ein Generalunternehmer beauftragt, der die Bestellung und Koordination der Bauarbeiten übernimmt, die benötigten Komponenten beschafft, über qualifiziertes Personal verfügt und die Bauleitung übernimmt. Alternativ können die Wohnungsbaugesellschaften die Baustellen auch mit eigenem Personal leiten und die Bauarbeiten durchführen. Im Bedarfsfall können externe Handwerker zur Hilfe genommen werden. In diesem Zusammenhang ist die hohe Nachfrage nach Handwerkern vor allem in Ballungsräumen zu nennen. Oft wird von den Auftraggebern von Bauprojekten bemängelt, dass Handwerker nur schwer zu finden sind. Wenn es zu einer Übereinkunft zwischen Auftraggeber und Handwerker kommt, gibt der Handwerker den Termin für den Beginn der Arbeiten vor und der Auftraggeber ist gezwungen sich danach zu richten. Diese Tatsache erschwert nicht nur die Terminplanung und die Nennung eines verbindlichen Termins für die Fertigstellung sondern kann auch die Finanzplanung des Auftraggebers vor Herausforderungen stellen. Hohe Zahlungen können sich entgegen ursprünglicher Planungen von einem Abrechnungszeitraum in den anderen verschieben. Zudem ist mit unbekannten Preissteigerungen zu rechnen.

Bei der Beschaffung der Komponenten für die Anlageninstallation ist zwischen mehreren Klassen von Komponenten zu unterscheiden. Eine Klasse sind Standard-Bauteile wie Rohrleitungen, Dichtungen, Dämmmaterial, Schrauben, Halterungen für Wände und Decken etc. Diese Bauteile werden in jedem Fall über den Fachgroßhandel beschafft. Sie unterliegen zumeist Normen, wodurch zumindest bei den Maßen keine Unterschiede zwischen den Produkten unterschiedlicher Anbieter bestehen.

Anders sieht es bei den komplexeren Komponenten, wie etwa Solarkollektoren, Speichern, Regelungen oder Heizkesseln aus. Hierbei hängt der Beschaffungsweg vom Hersteller ab.

Während einige Heizungstechnik-Hersteller wie V*aillant*, *Brötje Heizung* oder *Wolf* einen dreistufigen Vertriebsweg verfolgen, werden Produkte des Herstellers *Viessmann* lediglich auf zweistufigem Weg vertrieben. Die zwei Stufen sind der Hersteller und der Fachpartner (Handwerker). Beim dreistufigen Vertrieb wird der Großhandel zwischen Hersteller und Handwerker geschaltet. Damit können alle Komponenten beim Großhandel beschafft werden. Dabei fehlt jedoch die individuelle Beratung durch den Hersteller, wie es etwa Viessmann mit seinem Netz aus Fachpartnern erreichen möchte.

[126] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015), Energieeffizienzstrategie Gebäude, S. 57 ff.

Ebenso unterschiedlich wie die Vertriebswege der Hersteller sind, gibt es auch keine einheitlichen und transparenten Rabattierungspraktiken. Während einige Hersteller ihren Kunden nur über die abgenommenen Mengen bzw. Beträge Preisnachlässe gewähren, erfolgt die Rabattierung bei anderen Herstellern auch nach Treuekriterien. Dabei spielt es eine Rolle, ob der Kunde ausschließlich Produkte dieses Herstellers bezieht oder parallel auch die Produkte von Marktbegleitern verbaut. Es wird auch erfasst wie regelmäßig welche Mengen an Produkten abgenommen werden. Folglich gibt es keinen Standardpreis, der problemlos in Preislisten zu finden ist. Es kommt hinzu, dass die Preislisten der meisten Hersteller nicht öffentlich zugänglich sind, sondern nur den Fachpartnern bereitgestellt werden. Eine monetäre Bewertung der Komponenten und Dienstleistungen kann daher ohne konkrete Informationen von Herstellern oder Handwerkern aus dem Bauwesen nur schätzungsweise erfolgen.

4.4 Berechnung der Wärmegestehungskosten

4.4.1 Grundlagen

Bei der Umsetzung von Energieprojekten unterscheiden sich die anfallenden Kosten je nach gewählter Alternative in ihrer Höhe und im Zeitpunkt zu dem sie entstehen. Die Wärmeerzeugung mittels konventioneller Technik, wie etwa einem Ölkessel, führt zu vergleichsweise niedrigen Anfangsinvestitionen. Über die Lebensdauer sind jedoch fortwährende Ausgaben für die Brennstoffe erforderlich. Anders verhält es sich bei Heizungsanlagen mit solarer Unterstützung. Diese erfordern höhere Anfangsinvestitionen, führen aber zu geringeren Ausgaben für Brennstoffe. Je größer die betrachteten Anlagen sind, desto weniger fallen die Investitionskosten über die gesamte Laufzeit ins Gewicht.[127] Für eine bessere Vergleichbarkeit wird die Kennziffer der Energiegestehungskosten für Heizung und Kühlung eingeführt, LCoHC. Im Rahmen dieses Projektes wird die Kühlung nicht weiter behandelt. Levelized Cost of Heat (LCoH) werden als die „konstanten und theoretischen Kosten einer Kilowattstunde Wärme" definiert und „entsprechen den abgezinsten Kosten über die Lebensdauer der Investition hinweg"[128]. Da die anfallenden Kosten gebäudespezifisch sind, ist auch die Berechnung nur unter Annahmen bezüglich der Investitions- und der laufenden Kosten für typisierte Wohngebäude möglich.

Für die Berechnung der *LCoH* einer Anlage müssen folgende Faktoren bekannt sein:

1. Die erwartete Lebensdauer der Komponenten der Anlage zur Wärmeerzeugung und -verteilung
2. Die über die Lebensdauer der Anlage verbrauchte Menge an Brennstoff sowie die an die Räume abgegebene Nutzraumwärme sowie die gezapften Trinkwarmwassermengen.
3. Die Kosten, die während der kompletten Lebensdauer anfallen, also Investitions- und Betriebskosten, Ausgaben für den Abbau der Anlage und mögliche Finanzierungskosten in Anlehnung an die im Rahmen des IEA SHC Task 54 entwickelte Methodik
4. Es ist festzulegen, mit welchem Zinssatz auf den Kapitalwert der Investition ermittelt werden soll.

Neben dem Vergleich von konventionellen und erneuerbaren Technologien, können auch unterschiedliche Varianten für solare Kombianlagen untereinander bewertet werden. Daher werden die

[127] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015), Zweiter Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz, S. 41 ff.

[128] Fair Renewable Heating and Cooling Options and Trade (FROnT) project (2015), Technical Report on the Elaboration of a Cost Estimation Methodology, S.4.

LCoH für solare Kombianlagen in den Varianten zur Trinkwarmwassererzeugung mit zentraler Speicherladetechnik, zentraler Durchflusstechnik und dezentraler TWW-Bereitung im Durchflussprinzip berechnet.

Für die Kostenermittlung zur Berechnung der *LCoH* können zwei unterschiedliche Zeithorizonte zur Bilanzierung verwendet werden. Ein möglicher Zeithorizont ist ein Jahr. Dabei werden die Kosten für ein Durchschnittsjahr angegeben. Diese Kosten werden als gleichbleibend definiert und entsprechen damit einer Annuität. Die Berechnungsmethode aus der Investitionsrechnung heißt entsprechend Annuitätenmethode. Der zweite mögliche Zeithorizont ist die Gesamtlaufzeit des Projekts. Es wird der Kapitalwert ermittelt, der den Zeitwert des Geldes berücksichtigt. Die periodischen Zahlungsströme werden abgezinst und mit der Anfangsinvestition verrechnet. Dieser Ansatz heißt Kapitalwertmethode.

Die Energiewerte sind in beiden Fällen für generische Anlagen mit Hilfe von Berechnungen zu erzeugen.

Die Kosten der Wärmeversorgung im Gebäude setzen sich aus drei Teilen zusammen. Dies sind die (einmalig zu Beginn anfallenden) Investitionskosten. Hinzu kommen die bei der Nutzung entstehenden verbrauchsgebundenen Kosten, also im Wesentlichen die Brennstoffkosten. Unabhängig von der Nutzungsintensität der Anlage fallen die betriebsgebundenen Kosten an. Diese umfassen beispielsweise in vorgegebenen Intervallen anfallende Wartungsarbeiten oder Kontrollen.

4.4.2 Vorgehen im Forschungsprojekt

Für die Berechnung des Kostenteils der Wärmegestehungskosten wird mit der Annuitätenmethode gearbeitet. Die Annuität ist eine in gleichmäßigen Abständen wiederkehrende Zahlung in konstanter Höhe, die durch Multiplikation des Kapitalwerts mit dem Annuitätenfaktor errechnet wird.

Der Annuitätenfaktor ANF, ergibt sich aus dem nominalen Kalkulationszinssatz i (engl. für interest rate) in % und der Nutzungsdauer ND in Jahren. Typische Nutzungsdauern der jeweiligen Komponente werden den VDI-Richtlinien 2067 und 2068 entnommen. Bezüglich des Kalkulationszinssatzes i wird in Anlehnung an *Wesselak et al.* eine Investition aus Eigenmitteln angenommen.[129] Dabei wird allgemein von einem am Geldmarkt erzielbaren Habenzinssatz $i = 5\,\%$ ausgegangen. Aufgrund der aktuellen Niedrigzinsphase soll jedoch bei langfristig ausgelegten Investitionen mit $i = 3{,}5\,\%$ gerechnet werden.

$$ANF = \frac{(1+i)^{ND} \cdot i}{(1+i)^{ND} - 1} \tag{7}$$

Durch Multiplikation des Annuitätenfaktors ANF mit den Investitionskosten, also dem Kapitalwert zum Zeitpunkt 0, K_0 in € ergibt sich die Annuität der Investition AN_I in €/a.

$$AN_I = K_0 \cdot ANF \tag{8}$$

Alle verwendeten Preise und Kosten sind Netto-Preise, also ohne Einbeziehung der Mehrwertsteuer.

Die zu Beginn investierte Summe K_0 setzt sich aus den Materialkosten, sowie den Ausgaben für Montage und Inbetriebnahme der Anlage zusammen. Die Materialkosten für den Teil solare TWW-Bereitung ergeben sich aus der Anwendung des Programms zur Funktionskostenanalyse auf das

[129] Wesselak (2017) Handbuch Regenerative Energietechnik.

Referenzgebäude, welches in der *Dymola*-Simulation verwendet wird. Dabei wird der Ist-Wert der Kosten in die LCoH-Berechnung übernommen. Hinzu kommen zusätzlich im Programm eingefügte Kosten für die Anschaffung der konventionellen Heizungstechnik. Der Gas-Brennwertkessel entspricht dem üblichen Standard für Gebäude der jeweiligen Größe und der Sanierungsstufe. Listenpreise dienen als Kostengrundlage. Diese enthalten neben den Materialkosten, je nach Preispolitik des Handwerksbetriebes, auch bereits die Montagekosten. Aufgrund der Veränderlichkeit und auch der örtlichen Unterschiede bei Marktanreizprogrammen von öffentlichen oder privaten Geldgebern, werden keine Zuschüsse berücksichtigt. Ebenso wenig fließen Rabatte oder Skonto der Hersteller in die Berechnung ein, da die Preispolitik der Hersteller weder transparent ist, noch pauschalisiert werden kann.

Sowohl für die verbrauchsgebundenen als auch für die betriebsgebundenen Kosten ist die Annualisierung nicht ohne weiteres möglich. Dies liegt vor allem daran, dass es über den Betrachtungszeitraum zu Preisschwankungen für Waren und Dienstleistungen kommt. Daher wird der Annuitätenfaktor um einen Faktor ergänzt, der eine Preissteigerungsrate PS berücksichtigt. Zur Abbildung der Sensitivität des Ergebnisses in Abhängigkeit von unterschiedlich starken oder schwachen Preissteigerungen, werden zusätzlich zur Basispreissteigerung drei weitere Varianten von Preissteigerungen (gering, mittel, hoch) eingeführt. Dieser Faktor wird als Mittelwert der Verteuerung MWV bezeichnet.

$$MWV = \frac{1+PS}{i-PS} * \left[\frac{1-(1+PS)^{ND}}{1+i}\right] * AN \tag{9}$$

Damit lassen sich die jährlichen Energiekosten EK in $€/a$ errechnen. Diese sind das Produkt aus dem aktuellen Energiepreis EP_a in ct/kWh, dem jährlichen Energieverbrauch EV in kWh/a und dem Mittelwert der Verteuerung MWV.

$$EK = EP_a * EV * MWV \tag{10}$$

Die Instandhaltungskosten belaufen sich typischerweise auf 1 bis 2 % der Investitionssumme, also $0{,}01 \times I_0 < M_t < 0{,}02 \times I_0$ [130]. Die VDI-Richtlinie 2067 enthält detaillierte Angaben zu den anteiligen Instandhaltungskosten jedes Bauteils.[131] Zur Vereinfachung wird hier jedoch mit einem Faktor gerechnet, der im IEA-SHC Task 54 definiert wird.

Durch Aufaddieren der Kostenarten ergibt sich eine Gesamtannuität. Wird diese durch den jährlichen Gesamtwärmebedarf für die Bereitstellung von Heizwärme und Trinkwarmwasser dividiert, ergeben sich die Wärmegestehungskosten (Levelized Cost of Heat $LCoH$) in $€/kWh$.

$$LCoH = \frac{Gesamtkosten\ Wärmeversorgung\ [\frac{€}{a}]}{Gesamtwärmebedarf[\frac{kWh}{a}]} \tag{11}$$

Der Energiebedarf des Referenzgebäudes für das Jahr $t = 1$ E_1 wird aus der *Dymola*-Simulationsstudie ermittelt und als konstant über den Betrachtungszeitraum angesehen.

[130] Louvet et al. (2017), Task 54 Info Sheet.

[131] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2012), VDI-Richtlinie 2067-1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Grundlagen und Kostenberechnung, S. 21 ff.

4.4.3 Restriktionen

Für die Berechnung der *LCoH* konnte eine Methodik und darauf basierend ein Software-Werkzeug entwickelt werden. Für die Berechnung der *LCoH* wird ein Programm in *Microsoft Excel* erstellt.

Zur Ausführung des Programms sind die folgenden Eingaben nötig:

1. Kalkulationszinssatz
2. Nutzungsdauer
3. Materialkosten der solarthermisch unterstützten Anlage zur Wärmeversorgung (ohne Mehrwertsteuer)
4. Raumnutzwärme sowie gezapfte Menge Trinkwarmwasser der gesamten Wohneinheiten
5. Bedarf an Endenergie für den konventionellen Energieerzeuger
6. Faktor für Montage und Inbetriebnahme
7. Faktor für Instandhaltung
8. Faktor für Planung

Aus diesen Werten lässt sich unter den in der Arbeit getroffenen Annahmen ein Preis für die durch das System erzeugte Wärmeenergiemenge in $€/kWh$ oder $Cent/kWh$ errechnen.

Die Ergebnisse sind nur unter den getroffenen Annahmen gültig und können aufgrund von Unbekannten, wie der tatsächlichen Preissteigerung, der Zinsentwicklung, schwankenden solaren Gewinnen und Energiebedarfen sowie Degradation der Anlage etc., nicht auf den gesamten Betrachtungszeitraum in der Form als absolute Zahl garantiert werden. Die *LCoH* bieten jedoch eine Vergleichsmöglichkeit zwischen verschiedenen Anlagenkonzepten und Technologien.

5
Methodenentwicklung zur energetischen Bewertung Grundlagen

Die Gesamtmethodik erfordert neben einer wirtschaftlichen Optimierung auch eine energetische Verbesserung auf Gesamtsystemebene für solarthermische Kombianlagen. Dafür ist zunächst der Ist-Zustand zu erfassen und zu beziffern um anschließend eine Wertung konstruktiver Änderungen vornehmen zu können.

Zur Beurteilung der energetischen Performance solarthermischer Kombiablagen werden zwei Ansätze gewählt. Auf der einen Seite werden einzelne Schlüsselkomponenten in unterschiedlichen technischen Ausführungen an dafür geeigneten Teststänlden messtechnisch analysiert. Die Messergebnisse dienen als Grundlage zur Erstellung und dem Abgleich von Simulationsmodellen. Auf der anderen Seite wird das Verhalten der simulierten Systeme mit messtechnischen Analysen aus Feldprojekten abgeglichen.

Abbildung 5-1 zeigt den Informationsfluss bei der Erstellung einer dynamischen, numerischen Simulation.

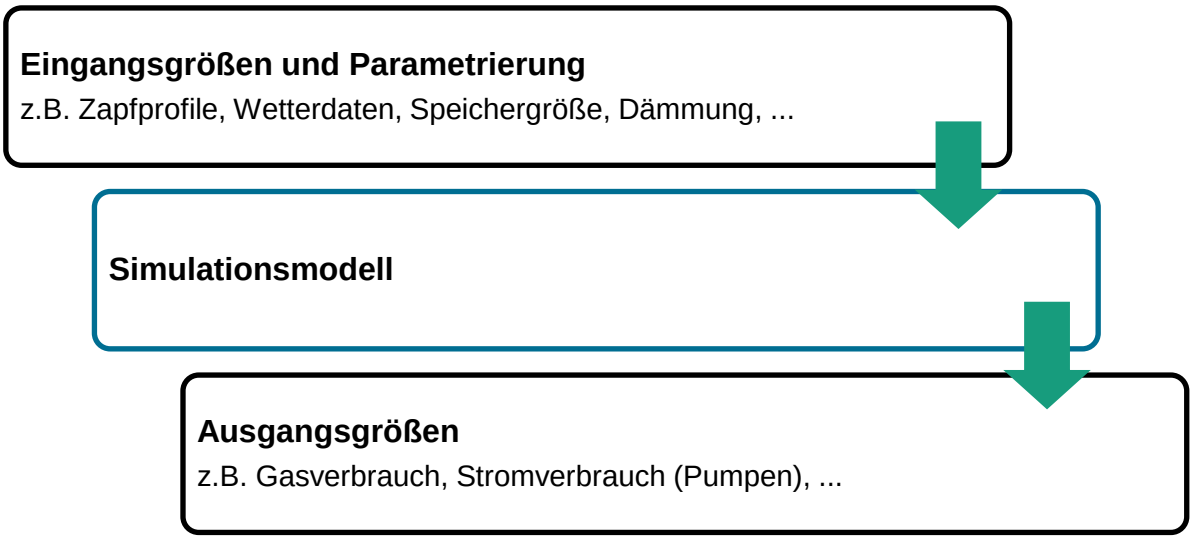


Abbildung 5-1: Informationsflussdiagramm für Simulationen, vgl. Planungshandbuch

Letztlich ist das Ziel unterschiedliche Szenarien und technologische Varianten zu analysieren und Daten zu generieren, mit denen im Folgenden weitergearbeitet werden kann.

Im folgenden Abschnitt 5.2 wird die Vorgehensweise zur energetischen Bewertung von Gesamtsystemen und Schlüsselkomponenten detailliert erörtert.

Die Komponentenmodelle werden in ein Simulationsmodell zusammengeführt, mit dem sich in der Simulationsumgebung Dymola/Modelica die relevanten Charakteristika für das System zur Wärmeversorgung für drei unterschiedliche Versorgungskonzepte abbilden lässt. Es handelt sich dabei um die folgenden drei Varianten:

- Zentrale Erzeugung von Trinkwarmwasser (TWW) mittels eines Speicherladesystems (zSL)
- Zentrale Erzeugung von TWW mittels eines zentralen Durchflusssystems/Frischwasserstation (zDF)
- Dezentrale Erzeugung von TWW mittels dezentral angeordneter Wohnungsübergabestationen (dDF)

In den folgenden Abschnitten wird auf den technischen Stand und die Hintergründe, welche für die Modellierung entscheidend sind, eingegangen.

5.1.1 Rahmenbedingungen bei der Erzeugung von Trinkwarmwasser

Für die Erzeugung von Trinkwarmwasser gilt es sowohl hygienische Standards einzuhalten, als auch die Ansprüche an den Komfort zu erfüllen und dabei eine möglichst energieeffiziente Bereitstellung zu erreichen.

Bei den hygienischen Anforderungen ist vor allem die Vermeidung der Entstehung von Legionellen relevant. Um den Ansprüchen der Bewohner gerecht zu werden, ist es außerdem notwendig, zu jeder Zeit Trinkwarmwasser mit einer bestimmten Temperatur bereitzuhalten, sodass beim Öffnen einer Zapfstelle das Wasser möglichst sofort mit der gewünschten Temperatur entnehmbar ist. Nach der DIN 1988-200 darf die Temperatur des Trinkwarmwassers 30 s nach der vollen Öffnung einer Entnahmestelle 55 °C nicht unterschreiten. Eine Ausnahme bilden dezentrale Trinkwassererwärmer.

Energieeinsparungen sind unter anderem durch Wärmedämmung als auch durch niedrige Systemtemperaturen zu erreichen. Viele dieser Anforderungen werden in Normen und Regelungen festgelegt.

5.1.2 Exkurs: Legionellen

Legionellen (Legionella pneumophila) sind im Wasser lebende Bakterien. Einige Arten von Legionellen sind für den Menschen gesundheitsgefährdend und sind der Auslöser für die Legionellose oder Legionärskrankheit. Legionellen vermehren sich sehr stark im erwärmten Trinkwarmwasser bei Temperaturen zwischen 30 °C und 45 °C, kommen aber auch in geringen Mengen im kalten Trinkwasser und im Biofilm der hydraulischen Leitungen vor. Bei Temperaturen oberhalb von 55 °C werden sie nahezu vollständig abgetötet bzw. gehen in einen inaktiven Status über. Bei erhöhter Konzentration von Legionellen im Trinkwasser stellen diese ein Gesundheitsrisiko dar. Insbesondere beim Einatmen von Wasser als Aerosol besteht die Gefahr einer Infektion. Die unbehandelt einen lebensgefährlichen Verlauf nehmen kann.

Normen und Regelungen

Die wichtigste Regelung zur Einhaltung hygienischer Standards ist die DIN 1988-200, welche technische Maßnahmen zur Vermeidung des Legionellenwachstums vorgibt. Darin sind für verschiedene Trinkwassererwärmungstechnologien Anforderungen an die technische Ausführung und den Betrieb vorgegeben. Für Speicher-Trinkwassererwärmer und zentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer in Mehrfamilienhäusern ist dort unter anderem festgelegt, dass am Warmwasseraustritt des Trinkwassererwärmers das Trinkwasser eine Temperatur von mindestens 60 °C haben muss und am Eintritt in den Trinkwassererwärmer, nach der Zirkulation, die Temperatur sich um maximal 5 K verringert haben darf. Die Zirkulation umfasst dabei alle Rohrleitungen, deren Volumen im Fließweg zwischen Trinkwassererwärmer und Zapfstelle größer als drei Liter ist. Um zu verhindern, dass in längeren Perioden ohne Zapfung eine Abkühlung des in den Leitungen stehenden Trinkwarmwassers stattfindet, muss der Zirkulationsstrom so eingestellt werden, dass die Temperaturen zwischen den geforderten Ein- und Austrittstemperaturen des Trinkwassererwärmers liegen. Ausnahmen gelten für Versorgungssysteme mit Leitungen, deren Volumen im Fließweg kleiner als drei Liter sind. Hierfür werden keine besonderen Anforderungen an die Temperatur des erwärmten Trinkwassers gestellt.

Das bedeutet zum Beispiel, dass für dezentrale Wohnungsübergabestationen, bei denen die Trinkwassererwärmung in räumlicher Nähe zu den Zapfstellen stattfindet, die Entnahmetemperatur bei der Erwärmung geringer sein darf.

5.1.3 Betrachtete Versorgungskonzepte für Trinkwarmwasser

Es gibt eine Vielzahl an Versorgungskonzepten für Trinkwarmwasser. Dabei variieren die verschiedenen Systeme in der Art der Erwärmung, dem Ort der Erwärmung und dem Einsatz eines Bereitschaftsspeichers. Nachfolgend sind drei der gängigsten Technologien zur Erwärmung von Trinkwasser dargestellt. Dabei lässt sich die Art der Trinkwarmwasserbereitung (TWW-Bereitung) in eine zentrale und dezentrale Bereitung unterteilen. Wird bei der zentralen TWW-Bereitung das Trinkwarmwasser und das Heizungswasser in 2 verschiedenen Leitungsnetzen verteilt, so bezeichnet man es als 4-Leiter-Netz. Bei 2-Leiter-Netzen wird nur ein Leitungsnetz verwendet. Das Heizungswasser wird dann sowohl zur Raumheizung, als auch zur dezentralen TWW-Bereitung verwendet.

Zentrale Erzeugung Trinkwarmwasser mittels Speicherladesystem (zSL)

Zentrale Speicherladesysteme haben einen zentralen Trinkwassererwärmer, der einen Bereitschaftsspeicher belädt. Dieser hält das erwärmte Trinkwasser zur Verwendung bereit und muss mindestens einmal am Tag vollständig beladen werden, sodass der gesamte Speicherinhalt eine Temperatur von über 60 °C einnimmt. Die Speicheraustrittstemperatur muss hier mindestens 60 °C betragen. Dabei sind Temperaturabfälle im Minutenbereich bei der Entnahme von Spitzenvolumenströmen tolerierbar. Die Temperatur am Eintritt der Zirkulationsleitung in den Bereitschaftsspeicher muss mindestens 55 °C betragen.

Der Vorteil dieser Systeme ist eine gleichmäßigere Leistungsanforderung an den Trinkwassererwärmer, da der Bereitschaftsspeicher kurzzeitige hohe Entnahmeleistungen decken kann und so Spitzenleistungen abfängt. Dadurch kann eine kleinere Dimensionierung des Trinkwassererwärmers erzielt werden. Ein beispielhafter Hydraulikplan eines Speicherladesystems ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

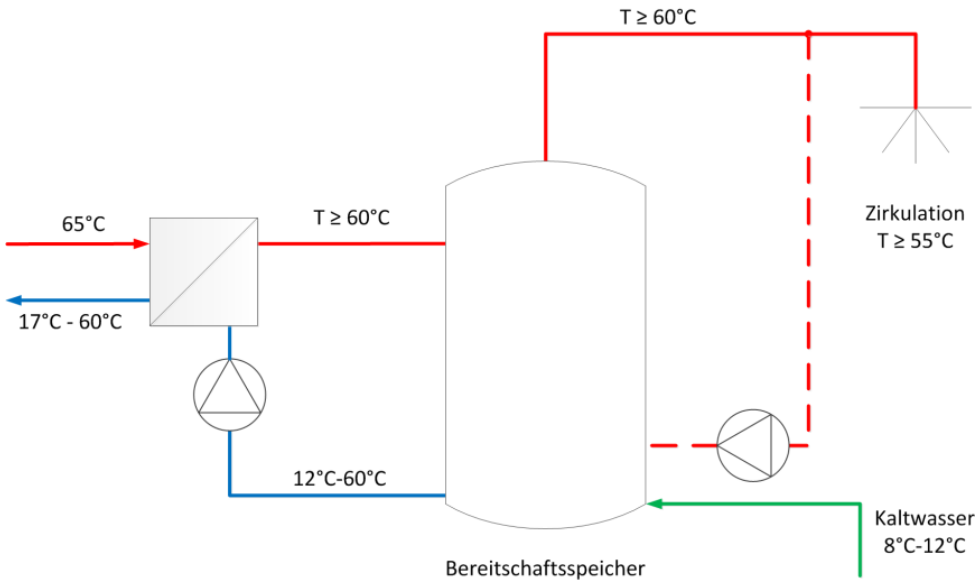


Abbildung 5-2: Hydraulikplan eines Speicherladesystems mit den jeweiligen Temperaturen

Zentrale Erzeugung Trinkwarmwasser mittels Durchflusssystem (zDF)

Bei zentralen Durchflusssystemen wird das Trinkwasser erst bei Bedarf erwärmt. Die Temperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers muss auch hier mindestens 60 °C betragen. Dies setzt eine schnelle Bereitstellung der geforderten Leistung voraus. In Abbildung 5-3 sind zwei verschiedene Ausführungen in einem Hydraulikplan dargestellt. Bei kleinen Wohngebäuden ist es üblich, dass Kaltwasser und Zirkulation vor dem Trinkwassererwärmer gemischt werden (Abbildung 5-3 a). Da-

bei entstehen große Schwankungen in der benötigten Wärmeleistung und, bei Erwärmung mit Wärmeübertragern, große Schwankungen in der Rücklauftemperatur des Primärkreises. Bei größeren Wohngebäuden werden aus diesem Grund die Zirkulation und das Kaltwasser getrennt erwärmt (Abbildung 5-3 b). Die Rücklauftemperaturen sind nun auf zwei verschiedenen konstanten Niveaus und der Rücklauf der Zirkulationsstation kann bei der Verwendung eines Speichers auf einer größeren Höhe des Speichers zurückgeführt werden.

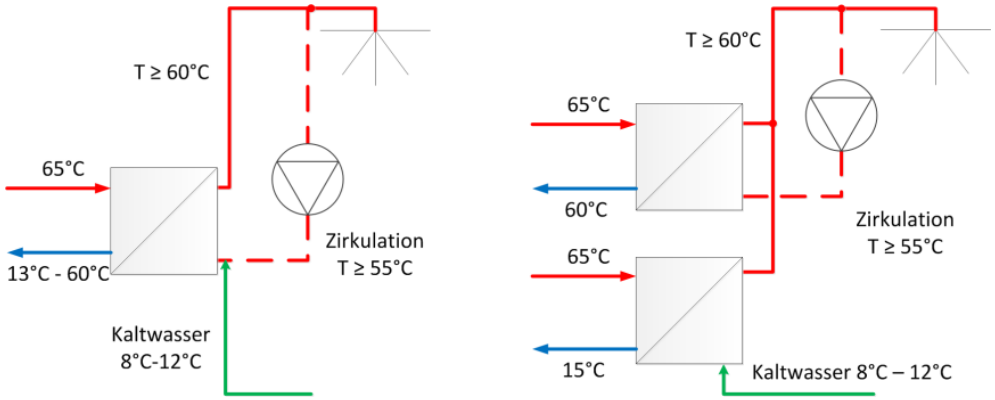


Abbildung 5-3: Hydraulikpläne eines Durchflusssystems mit einer Frischwasserstation (a - links) und eines Durchflusssystems mit Zirkulationsstation und Frischwasserstation(b - rechts)

Dezentrale Erzeugung Trinkwarmwasser mittels Durchflussprinzip (zDF)

Bei dezentralen Übergabestationen wird das Trinkwasser in unmittelbarer Nähe der Zapfstelle erwärmt. Nach der DIN 1988-200 gibt es für die Austrittstemperatur keine Vorgaben, wenn das Volumen im Fließweg des erwärmten Trinkwassers zwischen Trinkwassererwärmer und Zapfstelle kleiner als drei Liter ist. Dies hat den Vorteil niedrigerer Systemtemperaturen und damit geringerer Wärmeverluste. Um den Ansprüchen an den Komfort gerecht zu werden, ist eine Zapftemperatur von 45 °C ausreichend. Auch eine Zirkulation auf einem Temperaturniveau von über 55 °C ist damit nicht notwendig. Um stets eine Entnahme von Warmwasser mit ausreichend hoher Temperatur garantieren zu können, werden Übergabestationen üblicherweise mit einer Bypass-leitung zur Zirkulation ausgestattet.

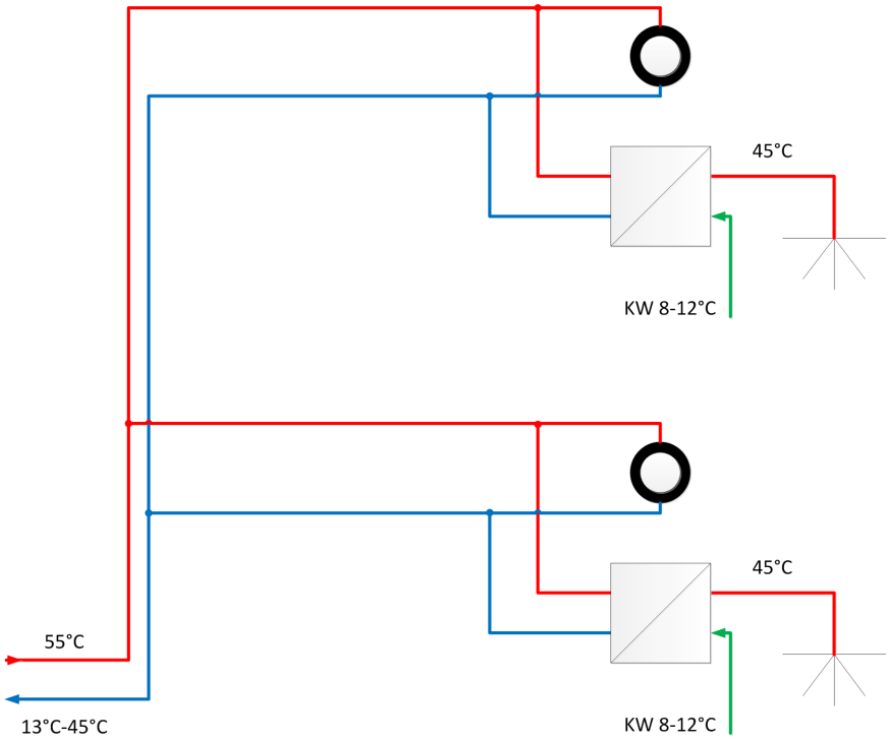


Abbildung 5-4: Hydraulikplan eines Systems mit Wohnungsübergabestationen

5.1.4 Hydraulische Systemtechnik

Es werden drei verschiedene Technologien zur Trinkwassererwärmung verglichen. Daraus ergeben sich drei verschiedene Hydrauliksysteme, die dieser Untersuchung zugrunde gelegt werden. Die Wärmeerzeugerseite, bestehend aus einem Gaskessel, Solarthermieanlage und Speicher bleibt dabei in allen Fällen unverändert. Der obere Teil des Speichers wird durch den Gaskessel beladen, sodass eine gewisse Mindesttemperatur für die Entnahme gewährleistet ist. Die Solarthermieanlage kann je nach der erzeugten Temperatur in verschiedenen Höhen den Speicher einspeisen. Gleiches gilt für den Rücklauf vom Trinkwassererwärmer, dessen Temperaturen stark variieren. Bei einer Zapfung muss Kaltwasser erwärmt werden und die Rücklauftemperaturen sind niedrig, im sonstigen Betrieb muss nur der Zirkulationsstrom erwärmt werden und die Rücklauftemperaturen sind entsprechend höher. Der Heizkreis ist mit einer Rücklaufbeimischung versehen, und die Vorlauftemperatur wird außentemperaturabhängig geregelt.

Zentrales Speicherladesystem mit 4-Leiter-Technik

Die Trinkwassererwärmung erfolgt über einen Wärmeübertrager, der primärseitig an den Speicher angeschlossen ist. Das erwärmte Trinkwasser wird in einem Bereitschaftsspeicher bereit gehalten. Bei einer Zapfung kann dieses dem Bereitschaftsspeicher entnommen werden, während Kaltwasser in den unteren Teil des Bereitschaftsspeichers nach strömt. Die Zirkulation wird in das untere Drittel des Bereitschaftsspeichers eingeleitet. Der Speicher wird regelmäßig durch geladen um im gesamten Speicher einer Temperatur von mindestens 60 °C zu erreichen. In Abbildung 5-5 ist der vereinfachte Hydraulikplan für das gesamte Gebäude dargestellt.

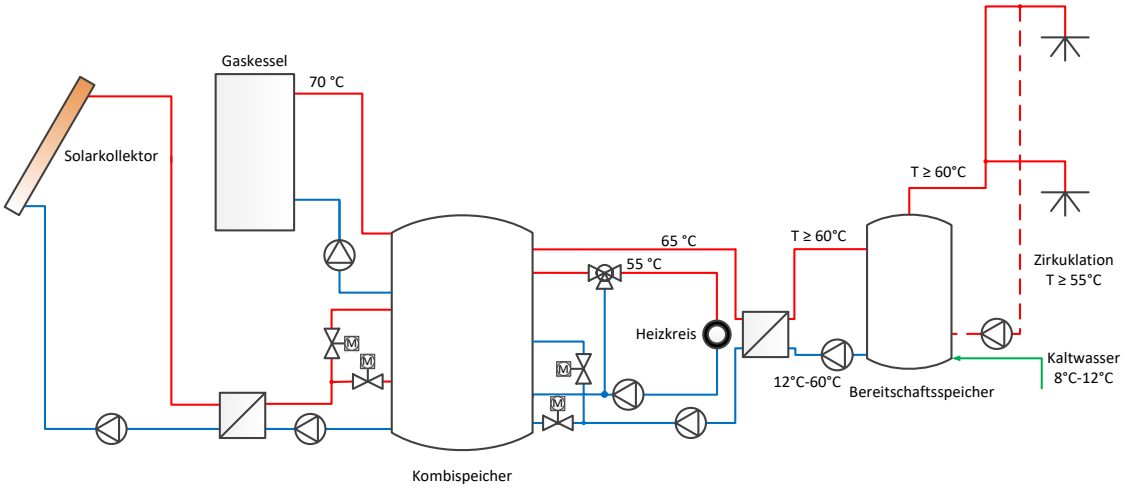


Abbildung 5-5: Systemkonzept der zentralen Erzeugung von Trinkwarmwasser nach dem Speicherladeprinzip

Zentrales Durchflusssystem mit 4-Leiter-Technik

Die Trinkwassererwärmung erfolgt über einen Wärmeübertrager, der das Kaltwasser bei Bedarf direkt erwärmt und im Zirkulationsbetrieb den Zirkulationsstrom erwärmt. Primärseitig ist der Wärmeübertrager direkt an den Speicher angeschlossen. Kaltwasser und Zirkulation werden unmittelbar vor dem Wärmeübertrager gemischt. Da in dieser Betrachtung nur ein Wärmeübertrager für die Erwärmung von Kaltwasser und Zirkulation verwendet wird, unterscheiden sich die Rücklauftemperaturen des Primärkreises je nach Betriebsart. In Abhängigkeit der Rücklauftemperatur kann die Rückführung in den Speicher auf zwei verschiedenen Höhen erfolgen und so die Auswirkungen der Temperaturschwankungen auf die Speicherschichtung minimiert werden. Abbildung 5-6 ist der vereinfachte Hydraulikplan für das gesamte Gebäude dargestellt.

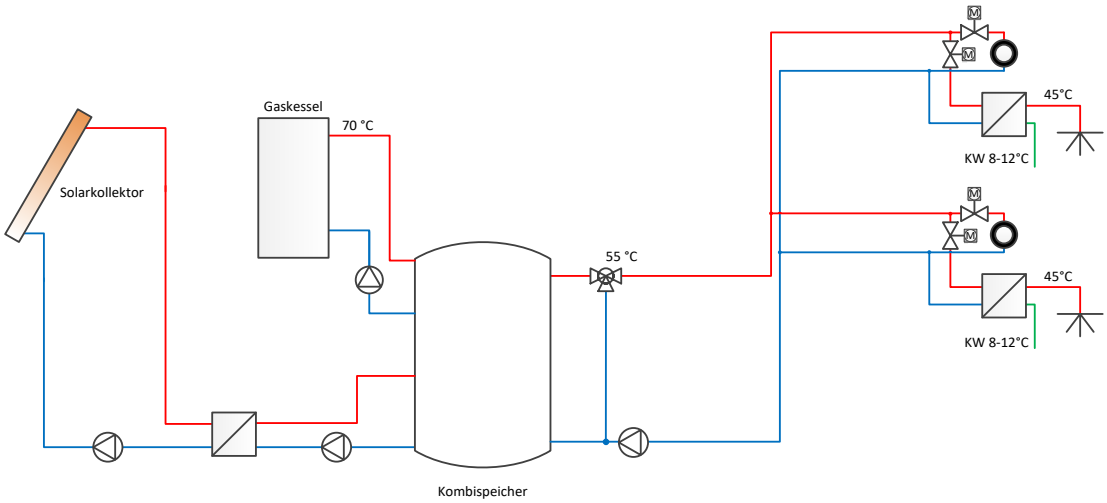


Abbildung 5-6: Systemkonzept der zentralen Erzeugung von Trinkwarmwasser nach dem Durchflussprinzip

Dezentrale Übergabestationen mit 2-Leiter-Technik

Die Trinkwassererwärmung bei dezentralen Trinkwasserstationen erfolgt in den einzelnen Wohnungen über Wärmeübertrager. Da die Temperaturen am Ausgang des Trinkwassererwärmers in diesem Fall wesentlich geringer sein dürfen, kann die Vorlauftemperatur des Ladekreises

niedriger sein. Um einen hohe Nutzung der Solarthermieanlage zu erreichen, wird der Vorlauf des Primärkreises durch die Mischung aus Rücklauf und aus verschiedenen Entnahmehöhen des Speichers auf 55 °C gebracht.

In Abbildung 5-7 ist der vereinfachte Hydraulikplan für das gesamte Gebäude dargestellt.

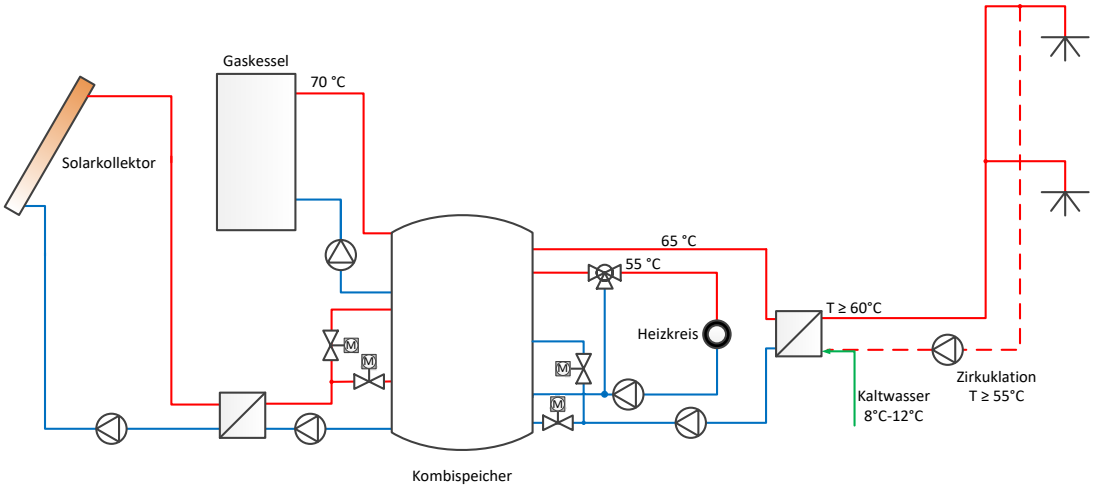


Abbildung 5-7: Systemkonzept der dezentralen Erzeugung von Trinkwarmwasser nach dem Durchflussprinzip

5.2 Methodisches Vorgehen zur Simulation

5.2.1 Warmwasserspeicher

Es wird maßgeblich ein Simulationsmodell erarbeitet, mit dem sich in der Simulationsumgebung Dymola/Modelica die relevanten Charakteristika für einen Warmwasserspeicher abbilden lassen. Das Modell lässt sich im Wesentlichen mit den folgenden Punkten beschreiben:

- Optional zu parametrierende Funktionalität einer „geschichteten Beladung“
- Approximation der Strömungsmechanik von ein- und austretenden Fluidströmen (Be- und Entladung des Speichers)
- Approximation der Strömungsmechanik im Stillstand (ohne ein- und austretende Fluidströme) durch temperaturbedingte Dichteunterschiede im Fluid des Speicherbehälters
- Reduktion der Komplexität über den Detaillierungsgrad (Approximationsniveau des Rechenmodells/Anzahl unabhängiger Variablen) und der erforderlichen Rechenleistung (Modellreduktion)

Das Modell ist als ein eindimensionales Simulationsmodell angelegt. Es besteht damit die Herausforderung, die komplexen dreidimensionalen strömungsmechanischen und thermodynamischen Vorgänge hinreichend genau abbilden zu können. Das Ziel ist, mit einer angemessenen Modellreduktion Jahressimulationen für eine heizungstechnische Anlage auf einem gängigen Simulationsrechner zu realisieren.

Geschichtete Beladung

Das Modell kann mit insgesamt maximal zehn Fluidkreisen gleichzeitig durchströmt werden. Alle diese Fluidkreise können mit den im Nachfolgenden dargestellten Charakteristika in dem Modell abgebildet werden. Die Anzahl an thermischen Knoten *mdot* und die Zuordnung der Anschlüsse zu

einem Knoten ist in dem Modell frei parametrierbar. Mit der Abbildung 5-8 ist das Modell des Speichers in der grafischen Benutzeroberfläche von Modelica/Dymola dargestellt.

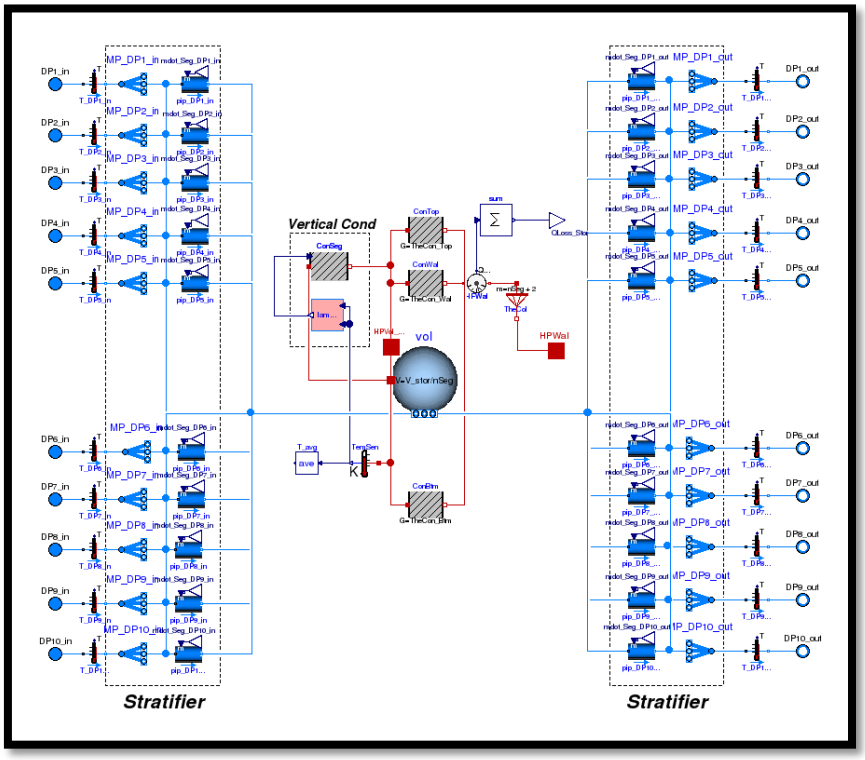


Abbildung 5-8: Darstellung der wesentlichen Modell-Komponenten des Speicherbehälters in der Simulationsumgebung Dymola/Modelica

In der folgenden Abbildung 5-9 wird dargestellt, wie ein eintretender Massenstrom einem Knoten in dem Speichermodell zugeordnet wird. Mit der Funktion „geschichtete Beladung" wird der Massenstrom in den Knoten des Wärmespeichers geführt, welcher den geringsten Temperaturunterschied zum eintretenden Massenstrom aufweist.

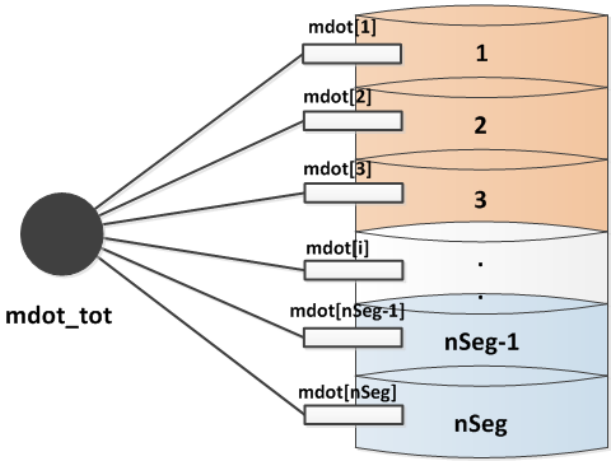


Abbildung 5-9: Zuordnung des eintretenden Massenstromes zu einem Knoten im Modell des Wärmespeichers

Diese Funktion wird mit der in Abbildung 5-10 dargestellten Sequenz validiert. Dabei wird die Eintrittstemperatur erhöht, so dass sich der mit dem Massenstrom beaufschlagte Knoten verändert.

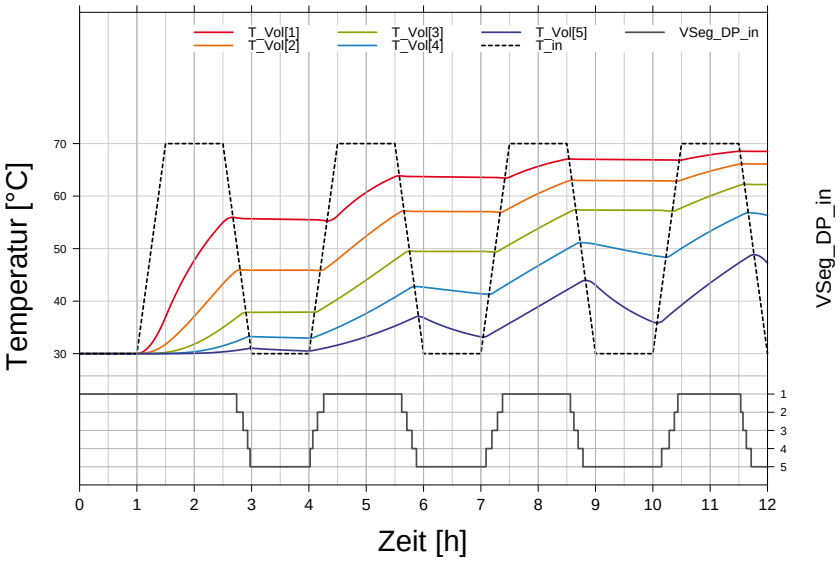


Abbildung 5-10: Validierungssequenz für die Funktion "geschichtete Beladung". Es sind Temperaturen in unterschiedlichen Höhen und mit der gestrichelten Linie die sich über die Zeit variierende Eintrittstemperatur dargestellt. Im unteren Teil wird auf der rechten Achse der mit dem eintretenden Massenstrom beaufschlagte Knoten wiedergegeben.

Die warme Temperaturschicht wandert dabei immer weiter nach unten. Wenn die Eintrittstemperatur geringer ist als die Temperatur des am weitesten unten liegenden Knotens, wird der Speicher dort entsprechend der Darstellung auch abgekühlt. In der Abbildung 5-11 ist die gleiche Validierungssequenz ohne die Funktion „geschichtete Beladung“ dargestellt.

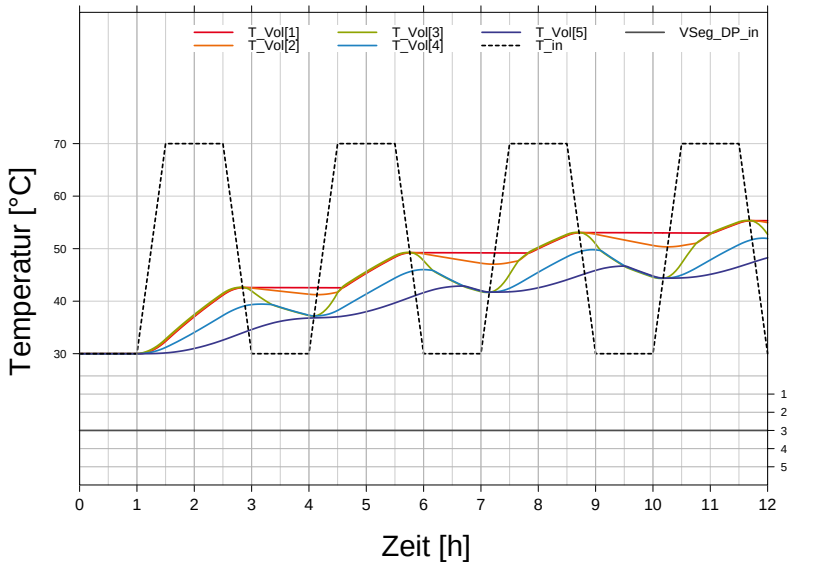


Abbildung 5-11: Validierungssequenz ohne die Funktion "geschichtete Beladung".

Es zeigt sich dabei ein deutlich engeres Temperaturband über die Speicherhöhe, was aus exergetischer Sichtweise insbesondere im systemischen Kontext von Nachteil ist.

Strömungsmechanik im Speicherbehälter

Die sehr komplexen Strömungsvorgänge, welche sich in einem Speicherbehälter ergeben, werden in der Modellierung in zwei Prozesse unterteilt:

- Verwirbelung durch Impulseintrag
- Auftriebswirkung, durch Dichteunterschied ohne Impulseintrag

In Abbildung 5-12 wird schematisch dargestellt, wie ein einströmendes Fluid sich auf Grund des Impulseintrages in dem Speicherbehälter verteilt.

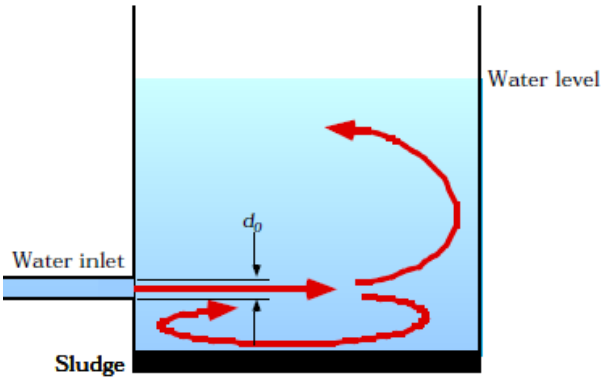


Abbildung 5-12: Schematische Darstellung der sich einstellenden Strömungsmechanik des Fluides, welches in den Speicherbehälter einströmt.

Der Effekt von Verwirbelungen bzw. Turbulenzen wird mit einem empirischen Modellansatz verbunden. Dabei wird um den einströmenden Knoten eine Massenstromverteilung angelegt. In den mit Abbildung 5-13 dargestellten Beispielen werden unterschiedliche Normal-Verteilungen für diesen Massenstrom aufgezeigt. Die Verteilung ist eine empirisch zu bestimmende Größe und von vielen anderen Randbedingungen abhängig.

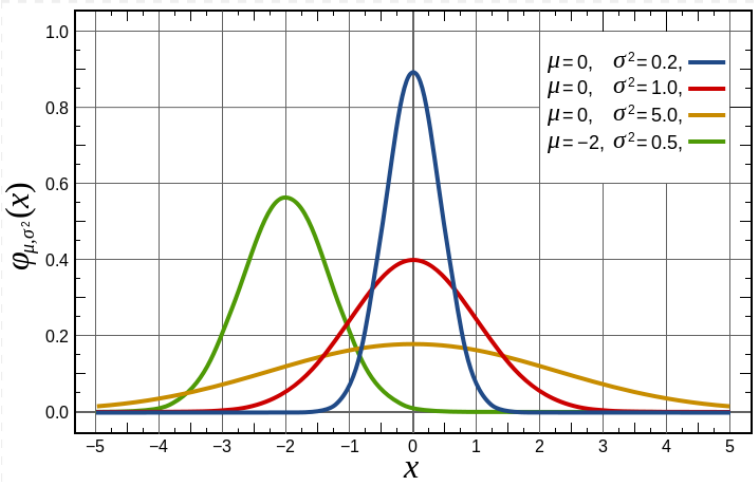


Abbildung 5-13: Beispielhafte Verteilung des Massenstromes um einen Anschlussstutzen.

Wenn eine Normalverteilung vorliegt, dann wird die Durchmischung D im j-ten Volumenelement mit der folgenden Gleichung parametriert:

$$D[j] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot exp\left(-\frac{H\left[V_{Seg,j}\right] - H[VSeg_{DP_{in}}]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

Dabei steht Sigma σ für die gewählte Standardabweichung. $H[V_{Seg,j}]$ ist die absolute Höhe des j-ten Volumenelements und der Höhe $H[VSeg_{DP_{in}}]$, die für die Höhe des Speichereintritts steht.

Mit dem Anteil f des Volumenelements j lässt sich der Massenstrom $\dot{m}$, der in das Volumenelement eintritt, in Abhängigkeit vom in den Speicher eintretenden Gesamtmassenstrom $\dot{m}_{tot}$ berechnen.

$$f[j] = \frac{D[j]}{\sum D[j]} \tag{13}$$

$$\dot{m}[j] = \dot{m}_{tot} \cdot f[j] \tag{14}$$

$$\sum_{i=1}^{nSeg} \dot{m}[j] = \dot{m}_{tot} \tag{15}$$

In der Implementierung im Modell stellt sich dann der mit Abbildung 5-14 dargestellte diskrete Zusammenhang für die Verteilung dar.

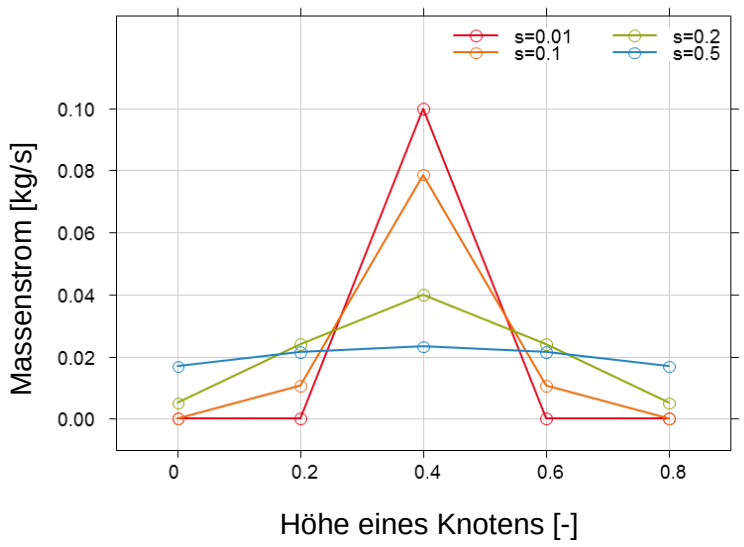


Abbildung 5-14: Beispielhafter diskreter Zusammenhang für eine normal verteilten Eintritt des Massenstromes auf Grund von Verwirbelungen

Die effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} ist eine Größe zum Beschreiben der thermischen Wärmeleitung zwischen den Volumenelementen. Sie setzt sich zusammen aus der thermischen Leitfähigkeit des Wassers λ_{flu} (konstant 0,6 [W/mK]) und der turbulenten thermischen Leitfähigkeit λ_{turb}:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{flu} + \lambda_{turb} \tag{16}$$

Die turbulente thermische Leitfähigkeit λ_{turb} beschreibt temperaturbedingte Dichteunterschiede des Fluides. Diese sind Grundlage für die Auftriebswirkung und damit einhergehende Strömungen im Speicherbehälter. Dabei steigt wärmeres Fluid, welches sich unter einem kälteren Fluid befindet, nach oben. Damit wird der zweite Effekt berücksichtigt bei dem dann eine entsprechende Vermischung der einzelnen Temperaturniveaus über die Höhe des Speichers erfolgt. Mit der folgenden Gleichung wird dieser Effekt, der sich additiv zu der Temperaturleitung einstellt, unter der Berücksichtigung der Eigenschaften von Wasser (ρ, c_p, β) und der Karman-Konstanten κ beschrieben:

$$\lambda_{turb} = \frac{2}{3}\rho c_p \kappa (\delta x)^2 \sqrt{g\beta \left(\frac{\delta T}{\delta x}\right)^+} \tag{17}$$

Die Karman-Konstante κ steht für das logarithmische Geschwindigkeitsprofil einer turbulenten Strömung in der Grenzschicht. Für turbulente Strömungen ist κ konstant bei 0,41.

Die Länge δx steht für die Höhe eines Volumenelements (Speicherhöhe H_{Stor}, Anzahl der Volumenelemente N):

$$\delta x = \frac{H_{Stor}}{N} \tag{18}$$

Die turbulente Leitfähigkeit tritt lediglich bei Temperaturinvasion im Speicher auf.

$$\left(\frac{\delta T}{\delta x}\right)^+ = \begin{cases} if\ \delta T\ \geq 0\ then\ 0 \\ if\ \delta T\ < 0\ then - \dfrac{\delta T}{\delta x} \end{cases} \tag{19}$$

Dabei steht δT für die von oben nach unten berechnete Temperaturdifferenz der Volumenelemente.

$$\delta T = T_j - T_{j+1} \tag{20}$$

In der Energiebilanz für den Speicherbehälter stellt sich dieser Term nach Köcher wie folgend als additiver Teil zur Wärmeleitung zwischen den einzelnen Knoten dar:[132]

$$A_s \Delta x c_p \rho \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \sum_{i=1}^{5} \Delta \dot{Q}_i \tag{21}$$

$$\begin{aligned} &= A_s(\lambda + \lambda_{turb}) \cdot \left[\frac{\partial T(x+\Delta x,t)}{\partial x} - \frac{\partial T(x+t)}{\partial x}\right] + \\ &+ \dot{m}_E - \dot{m}_B) c_p [T(x,t) - T(x+\Delta x,t) - \\ &- k_{Mantel} L_s \Delta x [T(x,t) - T_{Um}(x,t)] + \Delta x H(x,t) \end{aligned} \tag{22}$$

In den beiden folgenden Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 wird diese Charakteristik durch eine Prüfsequenz plausibilisiert.

[132] Köcher (1995), Modellierung und numerische Simulation von Wärmespeichern.

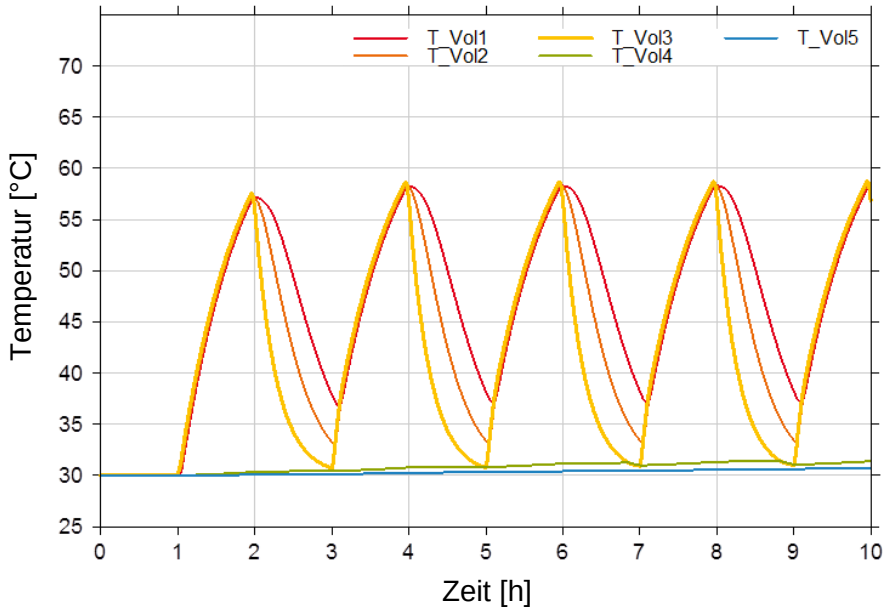


Abbildung 5-15: Beladung des Speicherbehälters mit einem wärmeren Fluid über den mittleren Anschluss und Entladung über den obersten Anschluss. Die sich einstellenden turbulenten Effekte durch die Auftriebswirkung werden berücksichtigt.

Ohne den turbulenten Teil würde nach Abschluss der Beladung ein umgekehrtes Temperaturprofil für eine sehr lange Zeit bestehen bleiben, wie es in Abbildung 5-16 dargestellt ist.

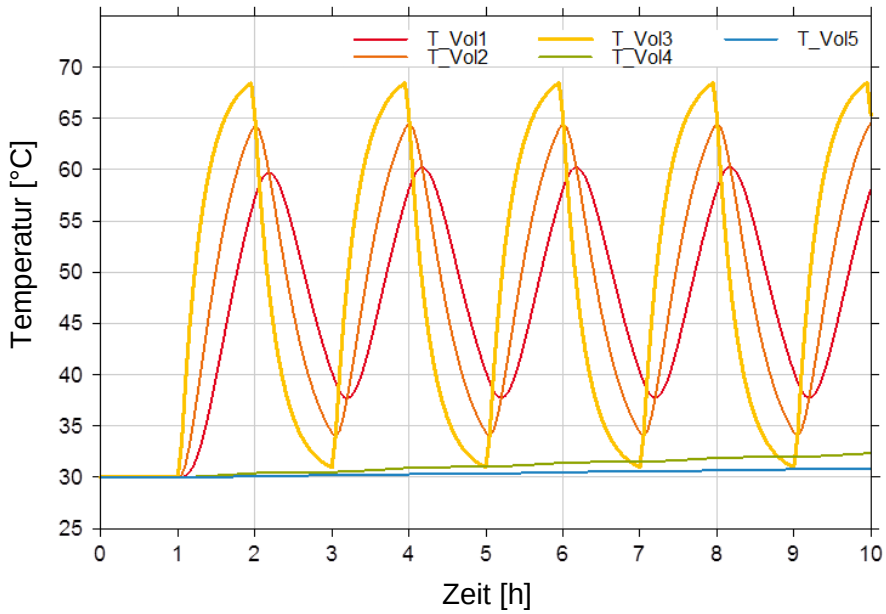


Abbildung 5-16: Beladung des Speicherbehälters mit einem wärmeren Fluid über den mittleren Anschluss und Entladung über den obersten Anschluss. Die sich einstellenden turbulenten Effekte durch die Auftriebswirkung werden nicht berücksichtigt.

Modellreduktion

Das erstellte Modell wird hinsichtlich der Berechnungsdauer für einen typischen Simulationsablauf hin untersucht. Dabei werden die einzelnen Funktionsumfänge der Reihe nach hinzugeschalten und mit anderen Modellen verglichen. Dabei kamen die folgenden Modelle und deren Varianten zum Einsatz:

- M10 Model extended der ISELib
- Multinodes ohne Funktion „geschichtete Beladung" der ISELib
- Multinodes mit Funktion „geschichtete Beladung" der ISELib
- Stratified Enhanced der Modelica Buildings library
- Buffer Storage der ISELib

Die Modelica Buildings library ist eine durch das Lawrence Berkeley National Laboratory entwickelte open-source Bibliothek. Sie wird bei der Simulation von Gebäudeenergiesystemen eingesetzt.[133] Im Rahmen des Projekts werden insbesondere Komponenten aus dem Package *Fluid* genutzt. Dieses enthält bausteine wie Pumpen, Rohrleitungen oder Mischvolumina. Die ISELib ist eine interne, am Fraunhofer ISE entwickelte Modelica Bibliothek.

Bei der Untersuchung zeigte sich, dass die Rechendauer des erstellten Models für einen typischen Ablauf bezüglich den anderen Simulationsmodellen nicht deutlich länger ist. Das Modell ist damit in der erarbeiteten Komplexität für den Einsatz in Jahresertragssimulationen geeignet.

Vermessung realer Warmwasserspeicher

Es werden Prüfsequenzen nach EN 12977-3:2016 am Versuchsstand des Fraunhofer ISE aufgezeichnet. Im nächsten Schritt werden diese mit den bestehenden Simulationsmodellen in TRNSYS verarbeitet, um die entsprechenden Parameter zu identifizieren. Das gleiche Vorgehen wird daraufhin in der Simulationsumgebung Modelica/Dymola umgesetzt. Dabei wird im Wesentlichen die Toolbox mit den erforderlichen Schnittstellen aufgesetzt, die bereits entwickelte Komponente in die erforderliche Umgebung gebracht, so dass nun die Ein- und Ausgangsdaten implementiert werden konnten und der gesamte Vorgang mit einer Optimierungsprozedur zur Parameteridentifikation gekoppelt werden konnte. Am Ende stehen vergleichbare Ergebnisse (Parameter), da die Modelle mit ihrer konkreten Struktur nach Norm nicht definiert sind. Darüber hinaus werden noch weitere nicht normative Prüfsequenzen angewendet, um das Modell auch in seinen Grenzbereichen parametrieren zu können und auch hier einen Vergleich der beiden Modellumgebungen herstellen zu können.

Es werden die Modelle aus der Simulationsumgebung TRNSYS mit dem in Modelica entwickelten Modell in Dymola verglichen. Die im Vergleich betrachteten Warmwasserspeicher sind in Abbildung 5-17 zu sehen.

[133] Lawrence Berkeley National Laboratory, Open source library for building energy and control systems, Verfügbar unter: simulationresearch.lbl.gov/modelica/, Stand 2019

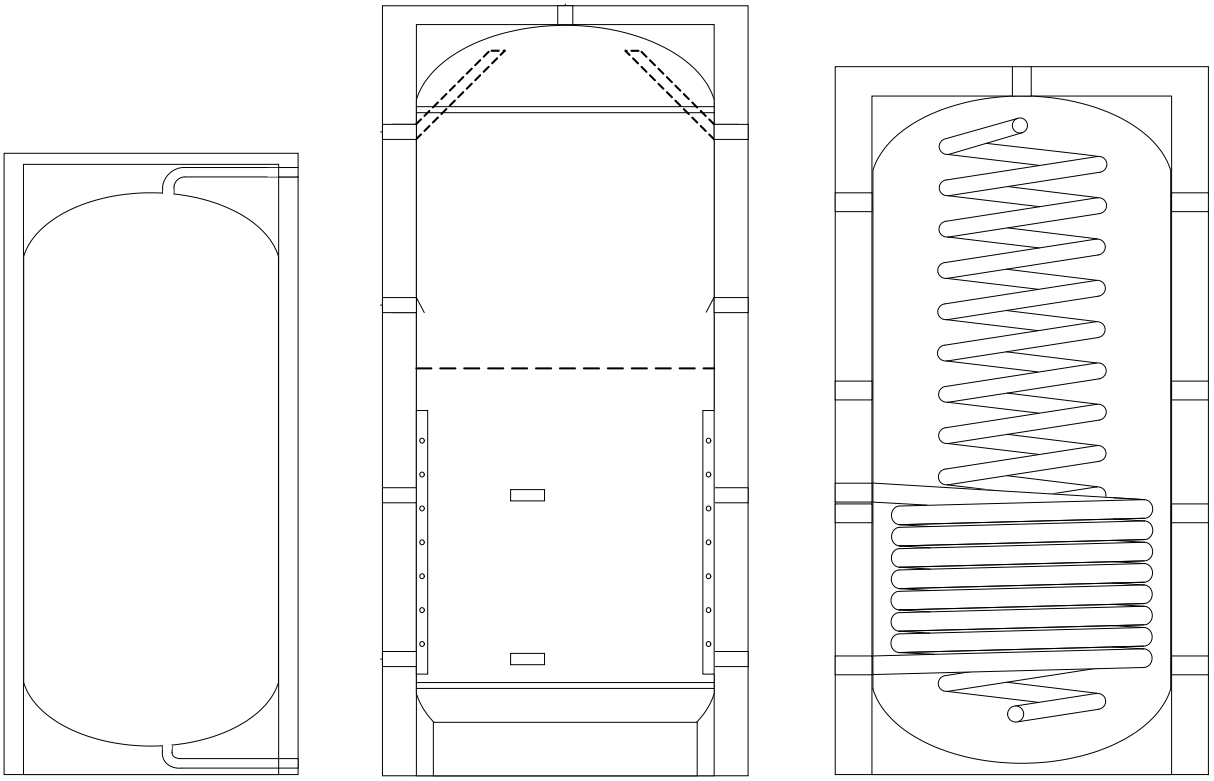


Abbildung 5-17: Schematische Zeichnung der untersuchten Speicher: Von links nach rechts Speicher A, Speicher B, Speicher C

5.2.2 Wohnungsübergabestation

Randbedingungen der messtechnischen Untersuchung der definierten Varianten

Im Rahmen der messtechnischen Untersuchung wird entsprechend der Darstellung in der Abbildung 5-18 ein Lastgang in Anlehnung an reale Zapfvorgänge mit den folgenden Charakteristika aufgesetzt:

- 1) 0,42 m³/h (7 Liter/min)
- 2) 0,18 m³/h (3 Liter/min)
- 3) 0,78 m³/h (13 Liter/min)
- 4) Nennleistung
- Aussetzung in Störstellen über fünf Sekunden bzw. eine Minute

Das Messdatenintervall beträgt für die Datenerfassung zwei Sekunden.

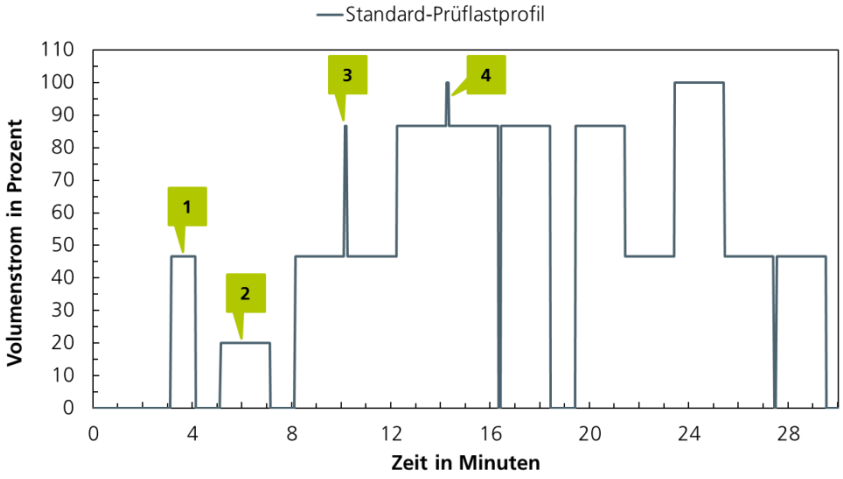


Abbildung 5-18: Aufgesetzter Lastgang zur Charakterisierung der zu untersuchenden Varianten an Wohnungsübergabestationen

Varianten Wohnungsübergabestationen und Auslegungspunkte Temperatur

Es werden drei konstruktive Varianten an Wärmetauschern (WT) eingesetzt. Auch wird einmal mit und einmal ohne Thermostatventil Messungen ausgeführt. Der PM-Regler ist in allen Varianten auf den Betriebspunkt 65-55 eingestellt.

Des Weiteren werden verschiedene Temperaturwerte für den Primär- und Sekundärkreis gefahren. Ziel ist dabei, eine möglichst umfassende Charakterisierung der Stationen über einen großen Betriebsbereich zu generieren, so dass damit die im Simulationsmodell zu untersuchenden Varianten auch die entsprechenden Sensitivitäten aufweisen.

- WT1: $\dot{V}_{TW}$ = 17l/min (1,08 m³/h)
- WT2: $\dot{V}_{TW}$ = 12l/min (0,72 m³/h)
- WT3: $\dot{V}_{TW}$ = 15l/min (0,9 m³/h) / asynchrone Bauweise

Einstellungen Thermostatventil am Beispiel WT 1

Das Thermostatventil soll laut Hersteller bei Nennvolumenstrom so eingestellt werden, dass die Solltemperatur erreicht wird.

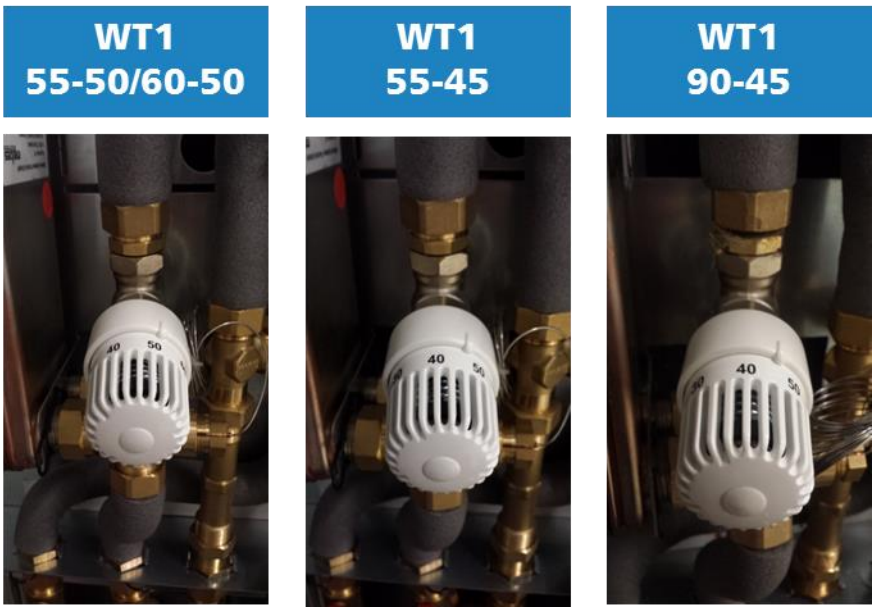


Abbildung 5-19: Einstellung der Thermostatventile bei den angelegten Prüfpunkten

- Wärmetauscher 1 Ventilstellungen:
  - 55/50: knapp über 50°C (s. Bild), eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 0,65m³/h
  - 60/50: knapp über 50°C (s. Bild), eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 0,65m³/h
  - 55/45: zw. 40 und 50°C (s. Bild), eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 0,65m³/h
  - 90/45: zw. 40 und 50°C (s. Bild), eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 17l/min (1,08m³/h)

- Wärmetauscher 2 Ventilstellungen:
  - 55/50: vollständig geöffnet (>65°C), eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 0,65m³/h
  - 60/50: zw. 50 und 60°C, eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 0,65m³/h
  - 55/45: genau 50°C, eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 0,65m³/h
  - 90/45: zw. 40 und 50°C, eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 12l/min (0,72m³/h)

- Wärmetauscher 3 Ventilstellungen:
  - 55/50: vollständig geöffnet (>65°C), eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 15l/min (0,9m³/h)
  - 60/50: zw. 50 und 60°C, eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 15l/min (0,9m³/h)
  - 55/45: knapp über 50°C, eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 15l/min (0,9m³/h)
  - 90/45: fehlende Angabe, eingestellt bei $\dot{V}_{TW}$ = 15l/min (0,9m³/h)

Aufbau Teststand

Der Aufbau der konstruktiven Varianten ist in ihren Grundzügen in der folgenden Abbildung 5-20 dargestellt. Im Teststand werden alle weiteren konstruktiven Varianten entsprechend aufgebaut.

Abbildung 5-20: Aufbau der konstruktiven Varianten im Teststand (ohne Therm: ohne Thermostat, WT 2 und 3 haben gleiche Baulänge)

5.2.3 Geometrie der Rohre

Die Ermittlung der Rohrdurchmesser erfolgt in Anlehnung an die DIN 1988-300 in mehreren Schritten. Dazu müssen die installierten Entnahmestellen berücksichtigt werden. In der DIN 1988-300 werden für verschiedene Entnahmestellen entsprechende Berechnungsdurchflüsse zugrunde gelegt. Die verwendeten Entnahmestellen und die dazugehörigen Berechnungsdurchflüsse sind in Tabelle 5-1 angegeben.

Tabelle 5-1: Berechnungsdurchflüsse nach DIN 1988-300

Art der Entnahmestelle	Berechnungsdurchfluss
Dusche	~ 0,15 L/s
Waschbecken	~ 0,07 L/s
Küchenspüle	~ 0,07 L/s

Aus der Summe der Berechnungsdurchflüsse ergeben sich nun die Summendurchflüsse für die einzelnen Leitungsabschnitte. Für eine Wohneinheit im Referenzgebäude ergibt sich ein Summendurchfluss von 0,29 L/s. Die Summendurchflüsse geben den Volumenstrom für den Fall an, dass alle Entnahmestellen gleichzeitig voll geöffnet sind. Um eine Gleichzeitigkeit der Entnahme zu berücksichtigen, werden wie folgend dargestellt Spitzendurchflüsse $\dot{V}_{Sp}$, in Abhängigkeit der Summendurchflüsse $\dot{V}_{Sum}$, für Wohngebäude berechnet:

$$\dot{V}_{Sp} = 1.48 * \left(\dot{V}_{Sum}\right)^{0,9} - 0{,}94 \tag{23}$$

Die DIN 1988-300 gibt eine maximale Fließgeschwindigkeit von 2 m/s für den Vorlauf an. In dieser Untersuchung wird diese somit auf v = 1,5 m/s festgelegt. Aus den errechneten Spitzendurchflüssen für die einzelnen Abschnitte und der maximalen Fließgeschwindigkeit lassen sich mit der Gleichung (24)

$$\dot{V}_{Sp} = \frac{\pi}{4} * d^2 * v \tag{24}$$

die Rohrdurchmesser d berechnen.

5.2.4 Simulation: Beschreibung des Referenzgebäudes

Das in der Simulation abgebildete Referenzgebäude ist ein Ost-West-orientiertes Gebäude aus dem Bauzeitraum 1978 bis 1994. Es hat drei Vollgeschosse à drei Wohneinheiten, die über ein Treppenhaus erreichbar sind. Im Referenzgebäude leben 13 Personen. Pro Person steht hier eine Wohnfläche von 49,23 m² zur Verfügung.

Das Gebäude hat ein Satteldach. Der Dachboden ist, wie auch der Keller, unbeheizt. Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22 zeigen die Maße des Gesamtgebäudes sowie den Schnitt der Wohnungen exemplarisch für ein Stockwerk. Der Schnitt der Wohnungen ist in jedem der drei Geschosse identisch.

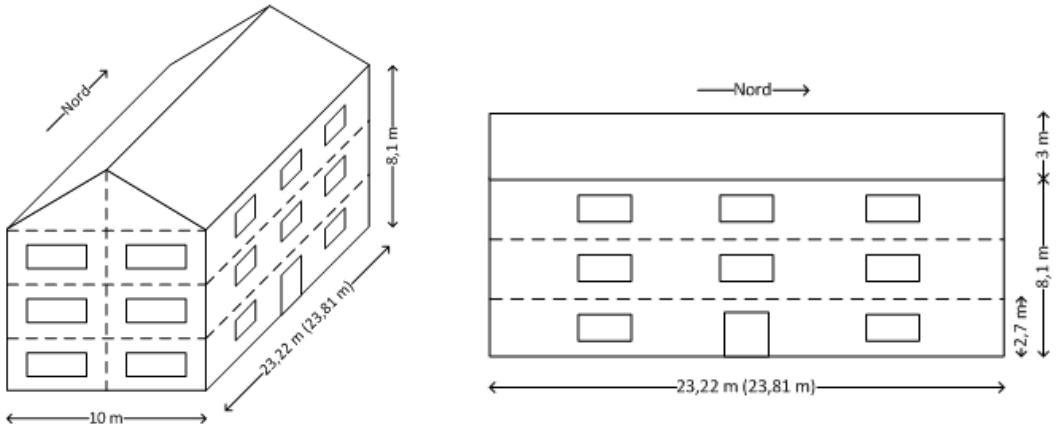


Abbildung 5-21: Außenmaße des Referenzgebäudes

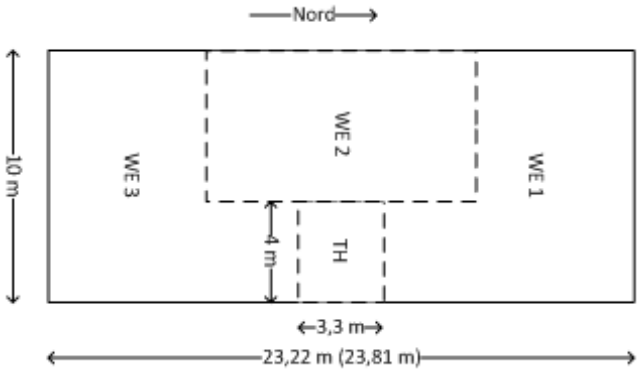


Abbildung 5-22: Schnitt der Wohnungen auf jedem Stockwerk

Im Detail verfügt das Referenzgebäude über die in Tabelle 5-2 aufgeführten Flächen. Diese sind für die Berechnung von Wärmeverlusten und solaren Wärmegewinnen essentiell.

Tabelle 5-2: Flächen des *TEWISol*-Referenzgebäudes

Geschoss	Wohneinheit	Typ	Außenflächen (m²)							Innenflächen (m²)		
			Fenster				Wände	Böden	Dach	Wände	Böden	Decken
			Ost	Süd	West	Nord						
EG	1	A	1,5	-	4,5	6	73	78	-	45	-	78
	2	B	9	-	-	-	35,5	78	-	68	-	78
	3	C	1,5	6	4,5	-	73	78	-	45	-	78
1. OG	4	A	1,5	-	4,5	6	73	-	-	45	78	78

Geschoss	Wohneinheit	Typ	Außenflächen (m²)							Innenflächen (m²)		
			Fenster				Wände	Böden	Dach	Wände	Böden	Decken
			Ost	Süd	West	Nord						
	5	B	9	-	-	-	35,5	-	-	68	78	78
	6	C	1,5	6	4,5	-	73	-	-	45	78	78
2. OG	7	A	1,5	-	4,5	6	73	-	78	45	78	-
	8	B	9	-	-	-	35,5	-	78	68	78	-
	9	C	1,5	6	4,5	-	73	-	78	45	78	-
Gesamtflächen (m²)			36	18	27	18	438	234	234	474	-	-

Es wird eine energetische Betrachtung des Gebäudes in drei Sanierungsstufen angegangen. Die erste Sanierungsstufe beinhaltet den Austausch der Fenster. Alle anderen Bauteile befinden sich in Originalzustand aus der Bauzeit des Gebäudes. Die zweite Sanierungsstufe wird als Standardsanierung in Anlehnung an die EnEV 2014/2016 bezeichnet. Die dritte Sanierungsstufe wird als ambitioniert bezeichnet und beinhaltet die energetisch besten Bauteileigenschaften der drei Varianten. In Tabelle 5-3 sind die den Sanierungsstufen zugeordneten Kennwerte der Bauteile aufgeführt.

Tabelle 5-3: Bauteilkennzahlen *TEWISol*-Referenzgebäude

Aufbau und U-Werte der Bauteile	**Einheit**	**Fenster nicht Originalzustand; alle anderen Bauteile original**	**Standardsanierung an EnEV 2014/2016 orientiert**	**Ambitioniertere Sanierungsstufe**
U-Wert Fenster	[W/(m²K)]	3,25	1,30	0,70
g- Wert Fenster	[-]	0,75	0,75	0,47
U-Wert Außenwand	[W/(m²K)]	1,13	0,23	0,13
U-Wert Innenwand	[W/(m²K)]	1,20	0,80	0,20
U-Wert oberste Geschossdecke	[W/(m²K)]	0,60	0,19	0,13
U-Wert Dach (bei Satteldach)	[W/(m²K)]	0,55	0,19	0,16
U-Wert Bodenplatte / Boden gegen unbeheizt	[W/(m²K)]	1,33	0,30	0,20
Wärmebrückenzuschlag	[W/(m²K)]	0,10	0,10	0,05
Interne Wärmeleistung	[W/m²]	3,00	3,00	3,00
Heizgrenztemperatur	[°C]	12,00	12,00	12,00
Luftwechselrate (hygienischer Luftwechsel)	[1/h]	0,40	0,40	0,40
Infiltrationsrate	[1/h]	0,20	0,10	0,05

Den Sanierungsstufen entsprechend werden typische Dämmmaterialien ausgewählt. Diese und die entsprechenden λ-Werte sind in Tabelle 5-4 aufgeführt.

Tabelle 5-4: Festlegung der Dämmmaterialien mit den entsprechenden λ-Werten für das *TEWISol*-Referenzgebäude

		Sanierungsstufe					
		Original	λ [W/(mK)]	**Standard**	λ [W/(mK)]	**Ambitioniert**	λ [W/(mK)]
Fläche	Außenwand	Mineralwolle	0,05	XPS	0,036	PUR	0,024
	Dach	Mineralwolle	0,05	EPS	0,038	PUR	0,024
	Boden	Mineralwolle	0,05	EPS	0,038	VIP	0,008
	Innenwand	Mineralwolle	0,05	Holzfasern	0,045	EPS	0,04

Die Leitungsführung zur zentralen TWW-Versorgung zeigt Abbildung 5-23. Die Versorgungsstränge zwischen Zentralheizung und den einzelnen Wohnungen verlaufen durch das Treppenhaus. Es ist schematisch eine Zapfstelle je Wohneinheit dargestellt.

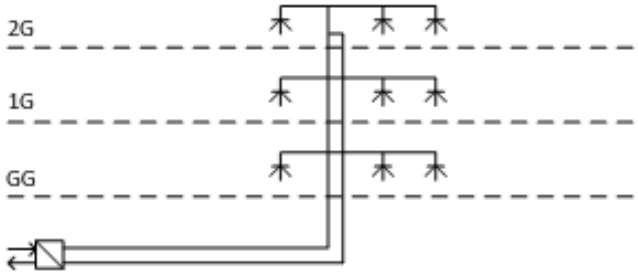


Abbildung 5-23: Zentrales Leitungsschema im Referenzgebäude

5.3 Ergebnisse und Restriktionen

5.3.1 Auswertung Vermessung Warmwasserspeicher

Die Ergebnisse für die Parameteridentifikation für den Speicher B sind beispielhaft für die Umgebung TRNSYS in der folgenden Tabelle 5-5 detailliert dargestellt.

Dabei wir die Benennung der untersuchten Größen entsprechend der nachfolgenden Nomenklatur vorgenommen:

Buchstaben

b_1	Exponent für die Massenstromabhängigkeit	$[-]$
b_2	Exponent für die Temperaturabhängigkeit	$[-]$
ε	Fehler	$[\%]$
h	Relative Höhe	$[-]$
H	Absolute Höhe	$[m]$
κ	Karman-Konstante	$[-]$
K	Konstante zur Beschreibung des Wärmeübertragungsvermögens der Wärmeübertrager	$[W/K]$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$[W/mK]$
δ	Standardabweichung	$[-]$
UA	Wärmeübertragungsvermögen	$[W/K]$

V	Volumen	$[m^3]$

Indizes

$AuxH$	Nachheizung (Auxiliary Heating)
$AuxHB$	Untere Nachheizung (Bottom)
$AuxHT$	Obere Nachheizung (Top)
$Condi$	Konditionierung (Conditioning)
DHW	Trinkwarmwasser (Domestic Hot Water)
eff	Effektiv
hx	Wärmeübertrager (Heat Exchanger)
in	Speichereintritt
out	Speicheraustritt
S	Speicher
Sol	Solar
$SpcH$	Raumheizung (Space Heating)

Tabelle 5-5: Ermittelter Parametersatz Speicher B, TRNSYS-Modell

V_{eff} in m^3	UA_S in W/K	λ_{eff} in W/mK
0,862	4,12	1,72

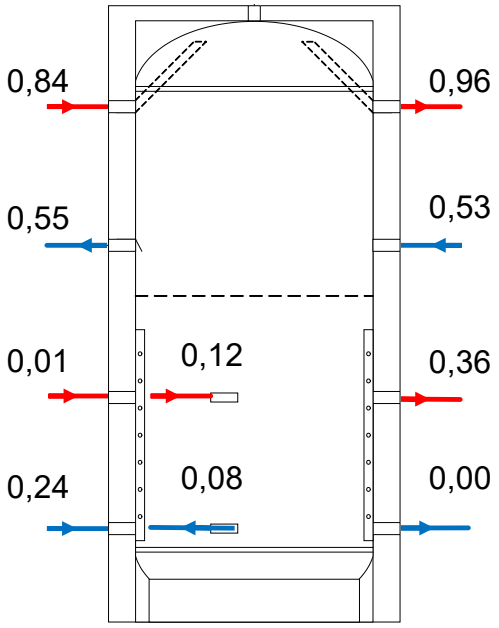
$h_{Sol,in}$	$h_{Sol,out}$
0,12	0,08

$h_{DHW,in}$	$h_{DHW,out}$
0,53	0,96

$h_{AuxHT,in}$	$h_{AuxHT,out}$
0,84	0,55

$h_{AuxHB,in}$	$h_{AuxHB,out}$
0,01	0

$h_{SpcH,in}$	$h_{SpcH,out}$
0,24	0,36



In der folgenden Tabelle 5-6 sind alle Ergebnisse sowie die ggf. nicht vorliegenden Prozeduren zur Parameteridentifikation für die Umgebung TRNSYS zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5-6: Ergebnisübersicht PI TRNSYS-Speicher

<table>
<tr><th></th><th>Speicher A</th><th>Speicher B</th><th>Speicher C</th></tr>
<tr><td>Festgelegte Parameter</td><td>
<table>
<tr><td>h_S</td><td>1521 mm</td></tr>
<tr><td>N</td><td>198</td></tr>
<tr><td>λ_{eff}</td><td>1 W/K</td></tr>
<tr><td>h_{in}</td><td>0</td></tr>
<tr><td>h_{out}</td><td>1</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><td>h_S</td><td>1893 mm</td></tr>
<tr><td>N</td><td>100</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><td>h_S</td><td>1802 mm</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Identifizierte Parameter</td><td>
<table>
<tr><td>V_{eff}</td><td>0,498 m³</td></tr>
<tr><td>UA_S</td><td>1,28 W/K</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><td>V_{eff}</td><td>0,86 m³</td></tr>
<tr><td>UA_S</td><td>4,12 W/K</td></tr>
<tr><td>λ_{eff}</td><td>1,7 W/mK</td></tr>
<tr><td>$h_{Sol,in}$</td><td>0,12</td></tr>
<tr><td>$h_{Sol,out}$</td><td>0,08</td></tr>
<tr><td>$h_{DHW,in}$</td><td>0,53</td></tr>
<tr><td>$h_{DHW,out}$</td><td>0,96</td></tr>
<tr><td>$h_{SpcH,in}$</td><td>0,24</td></tr>
<tr><td>$h_{SpcH,out}$</td><td>0,36</td></tr>
<tr><td>$h_{AuxHT,in}$</td><td>0,84</td></tr>
<tr><td>$h_{AuxHT,out}$</td><td>0,55</td></tr>
<tr><td>$h_{AuxHB,in}$</td><td>0,01</td></tr>
<tr><td>$h_{AuxHB,out}$</td><td>0,00</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><td>V_{eff}</td><td>0,75 m³</td></tr>
<tr><td>UA_S</td><td>3,12 W/K</td></tr>
<tr><td>λ_{eff}</td><td>1,5 W/mK</td></tr>
<tr><td>$h_{SpcH,in}$</td><td>0,4</td></tr>
<tr><td>$h_{SpcH,out}$</td><td>0,6</td></tr>
<tr><td>$h_{AuxH,in}$</td><td>0,9</td></tr>
<tr><td>$h_{AuxH,out}$</td><td>0,58</td></tr>
<tr><td>$h_{Condi,in}$</td><td>0,16</td></tr>
<tr><td>$h_{Condi,out}$</td><td>1</td></tr>
<tr><td>$V_{hx,Sol}$</td><td>0,016 m³</td></tr>
<tr><td>$K_{hx,Sol}$</td><td>360 W/K</td></tr>
<tr><td>$b_{1,Sol}$</td><td>0,28</td></tr>
<tr><td>$b_{3,Sol}$</td><td>0,402</td></tr>
<tr><td>$h_{Sol,in}$</td><td>0,6</td></tr>
<tr><td>$h_{Sol,out}$</td><td>0,18</td></tr>
<tr><td>$V_{hx,DHW}$</td><td>0,028 m³</td></tr>
<tr><td>$K_{hx,DHW}$</td><td>143 W/K</td></tr>
<tr><td>$b_{1,DHW}$</td><td>0,31</td></tr>
<tr><td>$b_{3,DHW}$</td><td>0,879</td></tr>
<tr><td>$h_{DHW,in}$</td><td>0,04</td></tr>
<tr><td>$h_{DHW,out}$</td><td>0,95</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Leistungsdifferenzen aus PI</td><td>
<table>
<tr><td>ε</td><td>3,2%</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><td>ε_{Sol}</td><td>10,2%</td></tr>
<tr><td>ε_{DHW}</td><td>4,5%</td></tr>
<tr><td>ε_{SpcH}</td><td>14,2%</td></tr>
<tr><td>ε_{AuxHT}</td><td>5,1%</td></tr>
<tr><td>ε_{AuxHB}</td><td>2,1%</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><td>ε_{SpcH}</td><td>1,5%</td></tr>
<tr><td>ε_{Aux}</td><td>0,4%</td></tr>
<tr><td>ε_{Condi}</td><td>4,5%</td></tr>
<tr><td>ε_{Sol}</td><td>0,5%</td></tr>
<tr><td>ε_{DHW}</td><td>0,6%</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Leistungsdifferenzen mit Daten aus Verifizierungssequenzen</td><td>
<table>
<tr><td>ε</td><td>3,1%</td></tr>
</table>
</td><td>Nicht durchgeführt</td><td>
<table>
<tr><td>ε_{SpcH}</td><td>1,6%</td></tr>
<tr><td>ε_{Aux}</td><td>4,3%</td></tr>
<tr><td>ε_{Condi}</td><td>3,4%</td></tr>
<tr><td>ε_{Sol}</td><td>0,9%</td></tr>
<tr><td>ε_{DHW}</td><td>2,1%</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

Bei der Parameteridentifikation in der Umgebung Dymola werden verschiedene Fragestellungen bearbeitet. So konnte z.B. die geforderte Leistungsdifferenz als Optimierungskriterium über den gesamten Verlauf aller angewendeten Sequenzen von 5 % nicht immer erreicht werden. In der folgenden Abbildung 5-24 wird deutlich, dass dieses Kriterium nur sehr knapp umgesetzt werden konnte (siehe Abb. Links). Dies gilt für eine sehr hohe Anzahl an Volumenelementen, die jedoch mit einer entsprechend hohen Rechenzeit für den Computer verbunden sind (siehe Abb. Rechts).

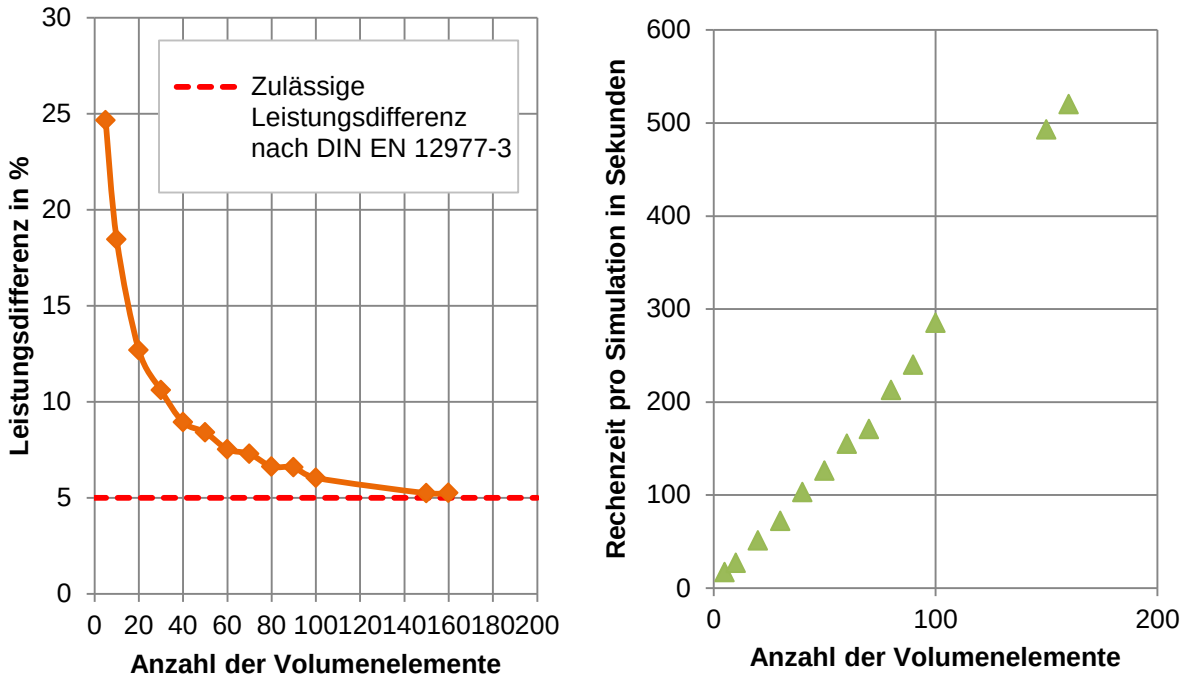


Abbildung 5-24: Leistungsdifferenz (links) und Rechenzeit (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der festgelegten Volumenelemente

Beispielhaft werden die in der Umgebung Dymola ermittelten Parameter wieder für Speicher B in der folgenden Tabelle 5-7 dargestellt.

Tabelle 5-7: Ermittelter Parametersatz Speicher B, Dymola-Modell

V_{eff} in m^3	UA_S in W/K	κ
1,126	2,64	0,001

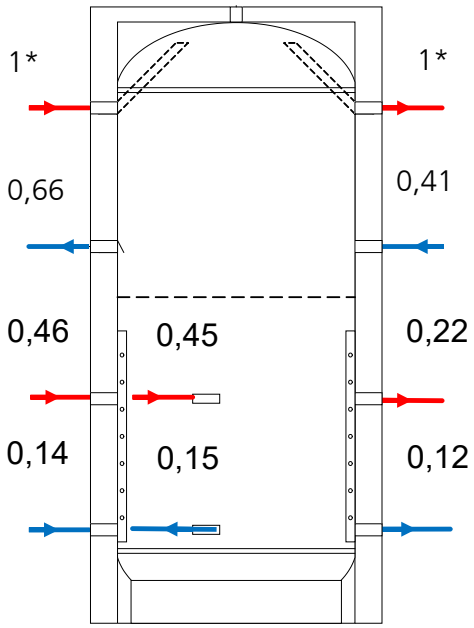
$h_{Sol,in}$	$h_{Sol,out}$	$\sigma_{Sol,in}$	$\sigma_{Sol,out}$
0,45	0,15	0,010*	0,011*

$h_{DHW,in}$	$h_{DHW,out}$	$\sigma_{DHW,in}$	$\sigma_{DHW,out}$
0,41	1*	0,012*	0,009*

$h_{AuxHT,in}$	$h_{AuxHT,out}$	$\sigma_{AuxHT,in}$	$\sigma_{AuxHT,out}$
1*	0,66	0,008*	0,009*

$h_{AuxHB,in}$	$h_{AuxHB,out}$	$\sigma_{AuxHB,in}$	$\sigma_{AuxHB,out}$
0,46	0,12	0,008*	0,008*

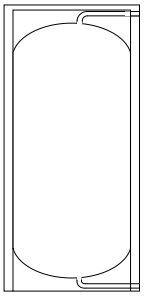
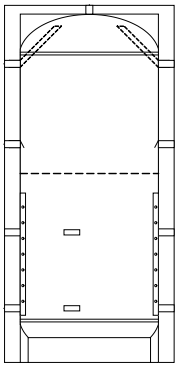
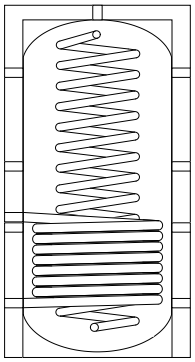
$h_{SpcH,in}$	$h_{SpcH,out}$	$\sigma_{SpcH,in}$	$\sigma_{SpcH,out}$
0,14	0,22	0,009*	0,011*



Mit der folgenden Tabelle 5-8 wird eine Übersicht zu der Entwicklung des Modells in Dymola/Modelica bezüglich dem Modell in TRNSYS als Referenz gegeben.

* Festgelegter Parameter

Tabelle 5-8: Ergebnisübersicht der Parameteridentifikation

	Speichermodell in TRNSYS	Speichermodell in Dymola
Speicher A 	• Parameter identifiziert UA_S, V_{eff} • Modell mit zugehörigem Parametersatz verifiziert (Leistungsdifferenz < 5 %)	• Parameter identifiziert UA_S, V_{eff}, κ, h_{in} • Modell mit zugehörigem Parametersatz verifiziert (Leistungsdifferenz < 5 %)
Speicher B 	• Parameter identifiziert UA_S, V_{eff}, λ_{eff}, $h_{Sol,in}$, $h_{Sol,out}$, $h_{DHW,in}$, $h_{DHW,out}$, $h_{SpcH,in}$, $h_{SpcH,out}$, $h_{AuxHT,in}$, $h_{AuxHT,out}$, $h_{AuxHB,in}$, $h_{AuxHB,out}$ ► Leistungsdifferenzen > 5 % ► Keine Verifizierung	• Parameter identifiziert UA_S, V_{eff}, κ, $h_{Sol,in}$, $h_{Sol,out}$, $h_{DHW,in}$, $h_{DHW,out}$, $h_{SpcH,in}$, $h_{SpcH,out}$, $h_{AuxHT,in}$, $h_{AuxHT,out}$, $h_{AuxHB,in}$, $h_{AuxHB,out}$, $\sigma_{Sol,in}$, $\sigma_{Sol,out}$, $\sigma_{DHW,in}$, $\sigma_{DHW,out}$, $\sigma_{SpcH,in}$, $\sigma_{SpcH,out}$, $\sigma_{AuxHT,in}$, $\sigma_{AuxHT,out}$, $\sigma_{AuxHB,in}$, $\sigma_{AuxHB,out}$ ► Leistungsdifferenzen > 5 % ► Keine Verifizierung
Speicher C 	• Parameter identifiziert UA_S, V_{eff}, λ_{eff}, N, $h_{Condi,in}$, $h_{Condi,out}$, $h_{SpcH,in}$, $h_{SpcH,out}$, $h_{AuxH,in}$, $h_{AuxH,out}$, $h_{Sol,in}$, $h_{Sol,out}$, $h_{DHW,in}$, $h_{DHW,out}$, $K_{hx,Sol}$, $V_{hx,Sol}$, $b_{1,Sol}$, $b_{3,Sol}$, $K_{hx,DHW}$, $V_{hx,DHW}$, $b_{1,DHW}$, $b_{3,DHW}$ • Modell mit zugehörigem Parametersatz verifiziert (Leistungsdifferenzen von < 5 %)	• Nicht durchgeführt

Es wird deutlich, dass das Modell in Dymola/Modelica mit deutlich höheren Rechenzeiten behaftet ist und die geforderten Leistungsdifferenzen über alle Prüfsequenzen hinweg nicht immer eingehalten werden können. Hier lässt sich das Modell in TRNSYS deutlich besser justieren und weist auch eine wesentlich bessere Performance hinsichtlich der erforderlichen Rechenzeit auf.

5.3.2 Auswertung Vermessung Wohnungsübergabestationen

Im Folgenden wird eine Auswahl an Messdaten für die Variante WT 1 aufgezeigt und kurz erläutert.

Dabei wird die nachstehende Nomenklatur genutzt.

dp_prim	Druckverlust Primärkreis	[bar]
dp_sek	Druckverlust Sekundärkreis	[bar]
p_abs_prim	Absolutdruck Primärkreis	[bar]
p_abs_sek	Absolutdruck Sekundärkreis	[bar]
Qdot_sek	Wärmestrom Sekundärkreis	[kW]
T_RL_prim	Rücklauftemperatur Primärkreis	[°C]
T_RL_sek	Rücklauftemperatur Sekundärkreis	[°C]
T_VL_prim	Vorlauftemperatur Primärkreis	[°C]
T_VL_sek	Vorlauftemperatur Sekundärkreis	[°C]
Vdot_prim	Volumenstrom Primärkreis	[m³/h]
Vdot_sek	Volumenstrom Sekundärkreis	[m³/h]

In der Abbildung 5-25 wird ein Standard-Betriebspunkt dargestellt. Dabei wird deutlich, dass sich die beiden Volumenströme proportional verhalten und es zu einer relativ guten Auskühlung im Primärkreislauf kommt. Hervorzuheben ist die Tatsache, dass sich im Teillastbereich die Auslauftemperatur im Sekundärkreis anhebt, so dass die Rücklauftemperatur im Primärkreis nicht weiter gesenkt werden kann. Das Auskühlverhalten der Station ist damit auf den Nennbetriebspunkt hin optimiert, der bei einer realen Nutzung jedoch kaum auftreten sollte.

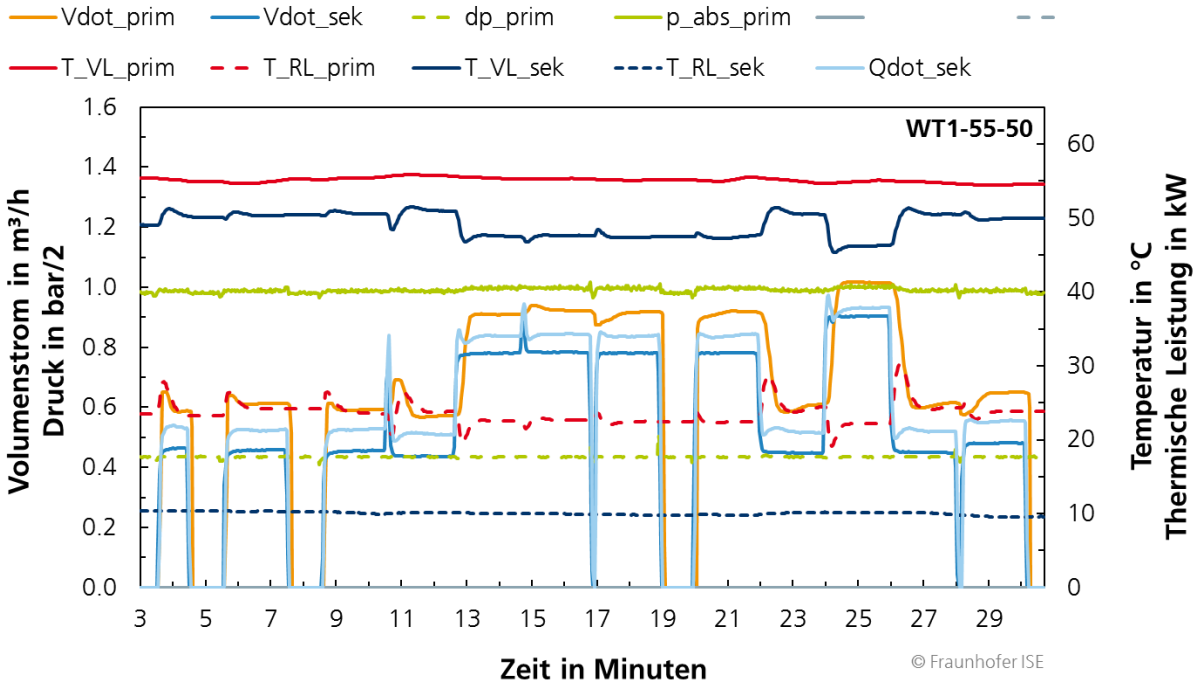


Abbildung 5-25: WT mit Vorlauf Primär 55 °C und Sollwert Sekundär 50 °C

In der folgenden Abbildung wird das Temperaturniveau im Primärkreis um 5 K auf 60 °C angehoben. Das Verhalten entspricht damit im Wesentlichen dem aus dem vorangegangenen Betriebspunkt – jedoch ist die Auskühlung im Primärkreis etwas besser.

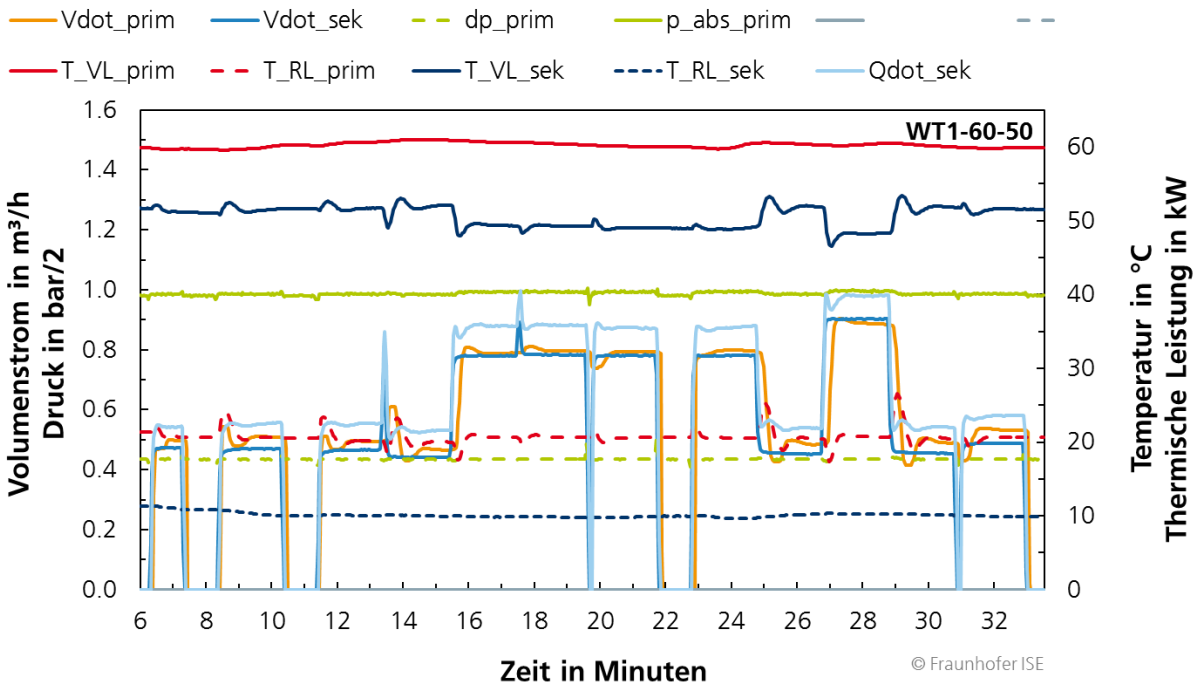


Abbildung 5-26: WT mit Vorlauf Primär 60 °C und Sollwert Sekundär 50 °C

Die folgende Abbildung zeigt auf, was passiert, wenn das Thermostatventil nicht in der Anlage verbaut ist. Die Solltemperatur wird am Auslauf des Sekundärkreises erreicht – jedoch erfolgt eine sehr schlechte Auskühlung des Primärkreislaufes.

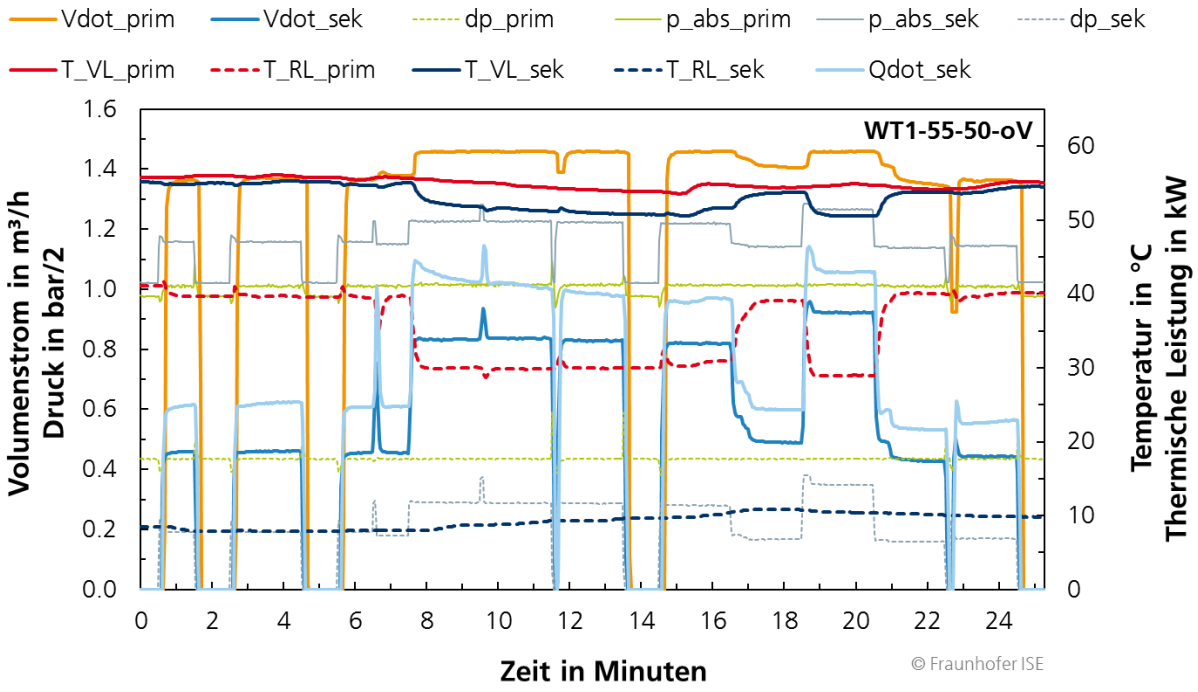


Abbildung 5-27: WT mit Vorlauf Primär 55 °C und Sollwert Sekundär 50 °C - ohne Thermostatventil

Wird die Station mit einem gleitenden Temperaturprofil im Primärkreis gefahren, so ist trotz der Auslegung des PM-Reglers auf den Betriebspunkt 60-50 auch ein Betrieb bei 90 °C im Primärkreis möglich (Bestandsgebäude mit Radiatorheizkörpern). Das Betriebsverhalten weist dann trotzdem eine sehr gute Auskühlung auf.

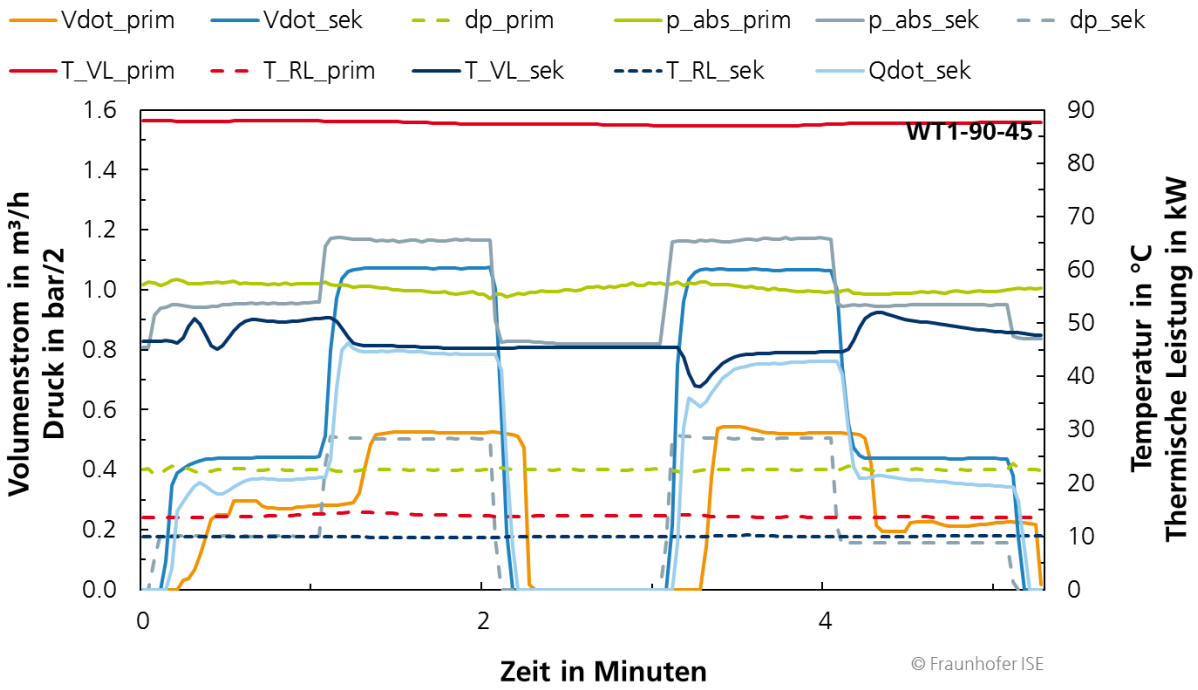


Abbildung 5-28: WT mit Vorlauf Primär 90 °C und Sollwert Sekundär 45 °C

Wird in einem derartigen Aufbau jedoch das Thermostatventil nicht eingesetzt, so stellt sich ein deutlich schlechteres Regelverhalten ein, wie es in der folgenden Abbildung dargestellt ist. Hier ist auch ein Verbrühschutz nicht mehr gewährleistet, es handelt sich um einen Grenz- bzw. nicht mehr zulässigen Bereich für den Betrieb.

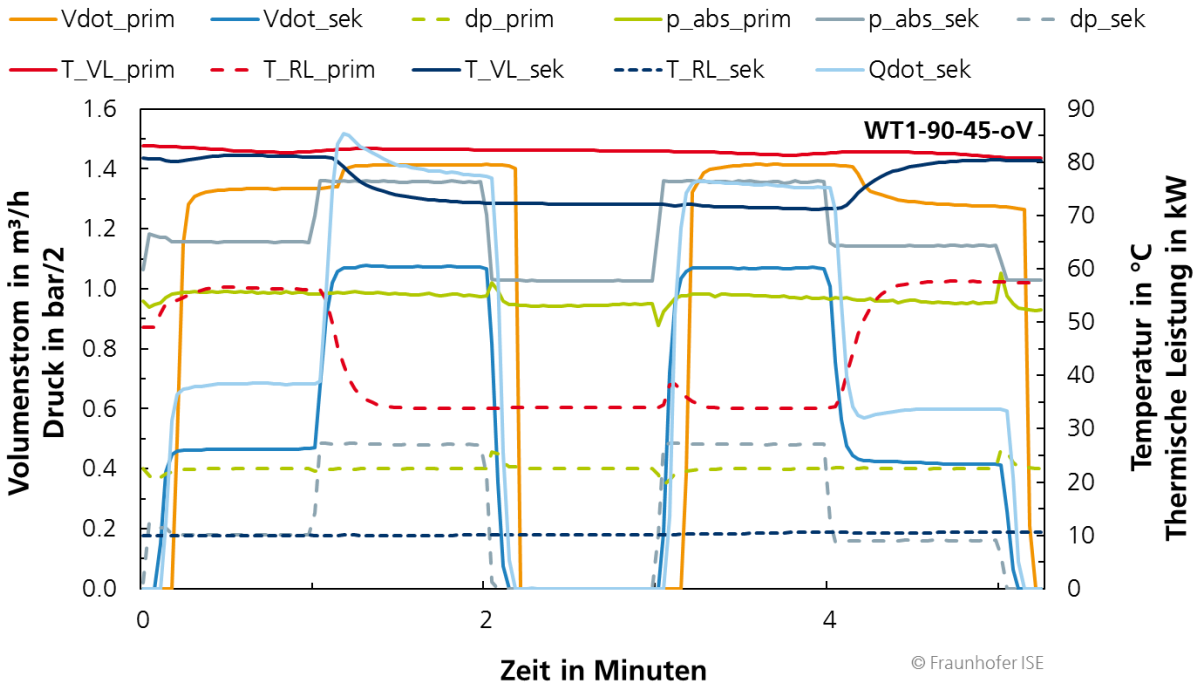


Abbildung 5-29: WT mit Vorlauf Primär 90 °C und Sollwert Sekundär 45 °C – ohne Thermostatventil

5.3.3 Umsetzung in ein Dymola/Modelica-Modell

Das Modell für die Wohnungsübergabestation wird in Modelica/Dymola implementiert. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Abbildung des Proportionalmengenreglers gelegt. Dieser zeigt in den Messdaten ein deutliches Hystereseverhalten und des Weiteren Abhängigkeiten vom angesetzten Differenzdruck und dem Temperaturniveau auf der Primär- und Sekundärseite. Es wird festgelegt, für die Modellierung ein teilphysikalisches Modell umzusetzen, damit die Vorgänge auch weiterhin transparent beschrieben werden können und Änderungen an den Parametern auch mit einer logischen Verknüpfung versehen sind.

Aufbau der Gesamtmodelle

Im Rahmen des Projekts *TEWISol* werden drei Gesamtsimulationsmodelle zur Ermittlung der Energieverbrauchswerte des Referenzgebäudes und der Systemeffizienz erstellt. Die Modelle unterscheiden sich in der Art der TWW-Bereitung.

Schematisch lässt sich das Grundmodell wie folgt darstellen:

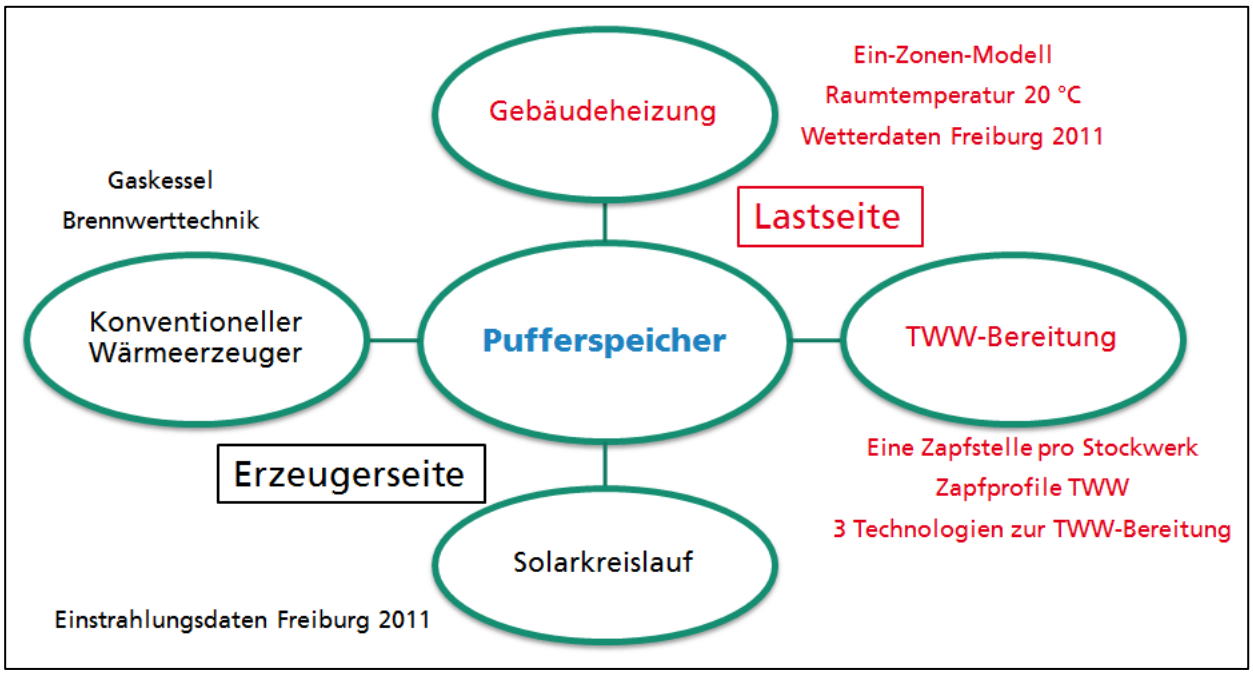


Abbildung 5-30: Konzept der Dymola-Simulationsmodelle im Projekt *TEWISol*

Darstellungen der vollständigen Gesamtmodelle für die drei untersuchten Technologien zur TWW-Bereitung befinden sich im Anhang E bis G.

Alle drei Simulationsmodelle bestehen aus vier hydraulischen Kreisen. Dies sind erzeugerseitig der Solarkreislauf und der Kreis des konventionellen Wärmeerzeugers. Lastseitig sind ein Heizkreis für die Realisierung der Gebäudeheizung und ein Trinkwarmwasserkreislauf angebunden.

Die Schnittstelle der vier hydraulischen Kreise ist in jedem Modell über den Pufferspeicher dargestellt. Dieser Pufferspeicher verfügt über zehn gleiche Volumenelemente (VE). Oben ist VE1 und ganz unten befindet sich der hier verwendeten Nomenklatur nach VE10. Jedes der Volumenelemente hat je einen Anschluss für ein- und einen Anschluss für ausströmendes Wasser. Es kann die Temperatur am Anschluss sowie die mittlere Temperatur für jedes VE gemessen werden.

Erzeugerseitig sind an den Speicher eine Solarthermieanlage und ein Gaskessel angeschlossen. Sowohl der Kesselkreis als auch der Solarthermie-Kreis verfügen über ein Ausgleichsgefäß und Zirkulationspumpen. Das verwendete Kesselmodell berücksichtigt den Brennwerteffekt. Beim Solarther-

mie-Kreis wird zudem aufgrund der unterschiedlichen Wärmeträgermedien (Heizungswasser und Wasser-Glykol-Gemisch) ein Wärmetauscher als Systemtrennung implementiert. Bei den verwendeten Solarkollektoren handelt es sich um Flachkollektoren. Die Solarkollektoren werden über eine externe Textdatei im Datentyp TMY3 mit standortspezifischen Einstrahlungsdaten gespeist.

Lastseitig verfügen die Modelle über einen identischen Kreis für die Heizwärme, sowie einen Kreis für die TWW-Versorgung, der jedoch in jeder der drei Varianten mit unterschiedlicher Technik realisiert wird.

Gebäude

Das zu beheizende Gebäude wird gemäß VDI-Richtlinie 6020 mittels eines Ein-Zonen-Modells abgebildet. Damit wird das Gebäude als eine thermische Zone aufgefasst. Es werden die Außenflächen (Grundfläche, Dach, Wände) sowie die entsprechenden Wärmedurchgangskoeffizienten für Wände, Fenster etc. des Referenzgebäudes übernommen. Wie in Abbildung 5-31 ersichtlich ist, berücksichtigt das Modell passive Energiegewinne durch Sonnenstrahlung sowie interne Wärmegewinne. Außerdem werden Verluste über die Außenflächen sowie Verteilverluste modelliert. Die Beheizung des Gebäudes erfolgt über einen Radiator. Auch die Wirkung des Luftaustausches durch Infiltration und Ventilation wird integriert. Außentemperaturen und sonstige Wetterdaten entstammen einer Textdatei mit den Wetterdaten von Freiburg aus dem Jahr 2011.

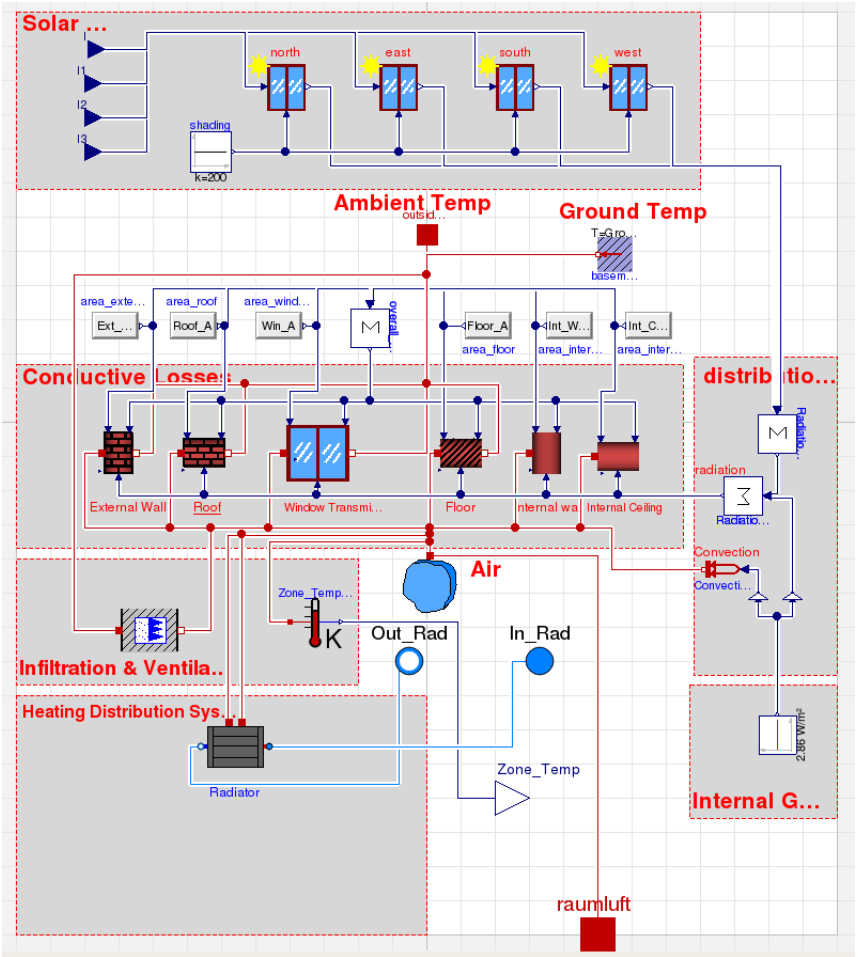


Abbildung 5-31: Komponentenansicht Gebäude im Ein-Zonen-Modell

Die Berechnung der Normheizlast, die für die Auslegung des Wärmeerzeugers sowie des Heizkörpers erforderlich ist, erfolgte nach DIN EN 12831.[134] Dabei werden Transmissionswärmeverluste über die Hüllflächen ebenso berücksichtigt, wie Energiegewinne durch solare Einstrahlung und interne Wärmegewinne. Interne Wärmegewinne entstehen zum Beispiel durch elektronische Geräte oder Personen, die sich im Gebäude aufhalten.

Heizungsverteilung

Der Heizungskreislauf verfügt über eine Rücklaufbeimischung um größere Temperaturschwankungen im System zu vermeiden. Die Heizkreispumpe ist hinter dem genannten Ventil angeordnet.

Die Rohrdurchmesser für TWW-Leitungen werden bereits entsprechend der DIN 1988-300 ausgelegt und im Ausgangsmodell berücksichtigt.[135] Dabei werden für jede Wohneinheit drei unterschiedliche Zapfstellen angenommen. Dies sind eine Dusche, ein Waschbecken und eine Küchenspüle.

Am TWW-Strang werden die Zapfstellen eines Stockwerkes zu einer Zapfstelle aggregiert.

In den zwei Modellen zur zentralen TWW-Bereitung ist eine Zirkulationsleitung vorgesehen. Außerdem ist hierbei eine Systemtrennung zwischen Heizungs- und Trinkwasser vor dem Eintritt in den Gesamtleitungsstrang vorgesehen. Für die Variante Zentrale TWW-Bereitung im Durchflussprinzip ist ein einzelner Wärmetauscher im Modell vorhanden. Dieser wird bei der Variante zur TWW-Bereitung um Speicherladprinzip durch einen Trinkwasserspeicher ergänzt.

Im Modell der Variante mit einer dezentralen TWW-Bereitung mittels Wohnungsübergabestationen sind für jede Wohneinheit separate Wärmeübertrager vorgesehen.

Der Standort des Referenzgebäudes hat durch regional unterschiedliche klimatische Verhältnisse einen erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf. Im Simulationsmodell wird mit den Wetterdaten von Freiburg aus dem Jahr 2011 gerechnet.

Trinkwarmwasser

Es wird ein mittlerer Tagesverbrauch am Trinkwarmwasser für die Körperhygiene, Kochen und das Reinhalten des Gebäudes entsprechend dem allgemeinen Wohnungsbau von 40 Liter pro Person bei 40 °C eingestellt. [136]

Abbildung 5-32 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus einem TWW-Zapfprofil in dem über 24 Stunden die anfallenden Zapfmengen dargestellt werden.

[134] Deutsches Institut für Normung e.V. (2017), DIN EN 12831-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast.

[135] Deutsches Institut für Normung e.V. (2012), DIN 1988-300: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 300: Ermittlung der Rohrdurchmesser; Technische Regel des DVGW.

[136] Laasch und Laasch (2013), Haustechnik.

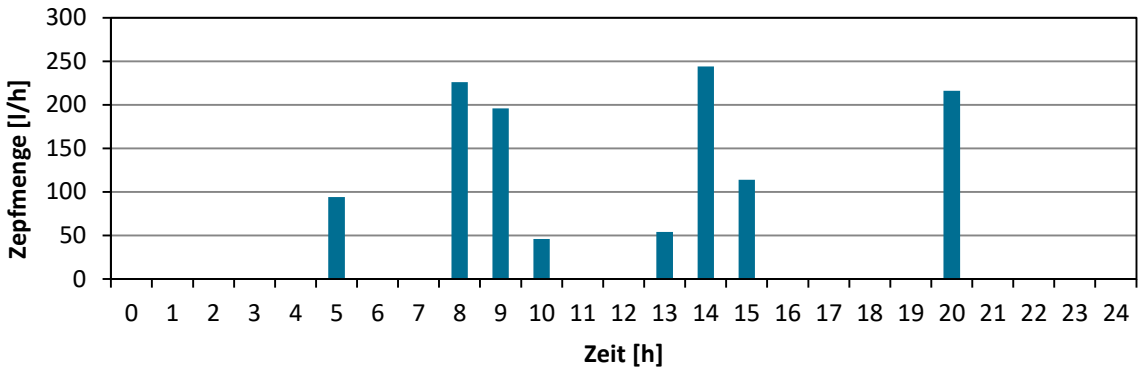


Abbildung 5-32: TWW-Zapfprofil 2 für einen Tag

Die oben stehende Grafik macht deutlich, dass gezapften TWW-Mengen im allergrößten Teil gleich Null sind. Lediglich zu Stoßzeiten fallen TWW-Zapfungen an.

Für das Gebäude werden die Grund-, Dach-, Außen- und Fensterflächen mit den zugehörigen Wärmdurchgangskoeffizienten parametriert. Letztere richten sich nach der angestrebten Sanierungsstufe. Im Projekt LowEx-Bestand Analyse des Fraunhofer ISE werden drei Sanierungsstufen für dieses Gebäude definiert. Das Projekt behandelt Konzepte für bestehende Mehrfamilienhäuser mit möglichst geringer Exergie[137]. Für den Auslegungspunkt der Heizkreise wird mit einer Vorlauftemperatur T_{VL} von 55 °C und einer Rücklauftemperatur T_{RL} von 40 °C simuliert. Die Temperaturspreizung liegt folglich bei 15 K. Die Ziel-Raumtemperatur T_r beträgt 20 °C. Die logarithmische Übertemperatur ΔT_{ln}, also die mittlere logarithmische Temperatur zwischen Heizkörper und Bezugsraum errechnet sich nach DIN 4703-3 wie folgt:

$$\Delta T_{ln} = \frac{T_{VL} - T_{RL}}{ln\frac{T_{VL} - T_r}{T_{RL} - T_r}} \tag{25}$$

zu:

$$\Delta T_{ln} = 35{,}74\ K$$

Solarthermischer Wärmeerzeuger

Die Auslegung der Größe des **Kollektorfeldes** der thermischen Solaranlage erfolgt nach der zu beheizenden Nutzfläche. Pro Quadratmeter zu beheizende Nutzfläche sollen für eine Anwendung zur Erwärmung von Trinkwasser mindestens 0.05 m² Kollektorfläche vorgesehen werden.[138] Die zu beheizende Nutzfläche des Referenzgebäudes beträgt 702 m². Daher werden 35 m² Kollektoraperturfläche im Modell parametriert.

Warmwasserspeicher

Das Volumen des **Pufferspeichers** soll bei solarer Heizungsunterstützung 70 Liter pro m² Kollektorfläche betragen. Das Verhältnis von Speicherhöhe zu Speichervolumen beeinflusst die Effizienz

[137] Fraunhofer ISE: LowEx-Bestand Analyse – LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden, 2019, https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/lowex-bestand-analyse.html [Zugriff am: 23.01.2019].

[138] Viessmann Werke GmbH & Co. KG (2008), Planungshandbuch Solarthermie, S. 106 ff.

einer thermischen Solaranlage stark. Zum einen hat es Auswirkungen auf das Schichtungsverhalten des Speichers und zum anderen bestimmt es die Speicheroberfläche, welche stark verlustbehaftet ist.[139] Heimrath ermittelt, basierend auf 240 realen Speichern, eine Näherungskurve für das Verhältnis von Speicherhöhe zu Speichervolumen.[140] Auf diesen Ergebnissen basieren die Berechnungsvorgaben des IEA-SHC TASK 32 für Pufferspeicher bis zu einem Volumen von 14 m³.[141] Nach diesen Vorgaben wird die Höhe des Pufferspeichers für die Simulation H_S ermittelt. Diese ist das Minimum aus den zuvor berechneten Höhen des Speichers für große und kleine Volumina H_{S1} und H_{S2} in m.

$$H_{S1} = 0{,}32 * V_s + 1{,}65 \tag{26}$$

$$H_{S2} = 0{,}093202 * V_s + 4{,}698 \tag{27}$$

$$H_S = MIN(H_{S1}, H_{S2}) \tag{28}$$

Es ergibt sich:

$$H_S = 3{,}25\ m$$

Es wird ein U_A-Wert von 7,393 für die Dämmung des Speichers eingesetzt. Dieser entspricht der Energieeffizienzklasse D im Sinne der sogenannten Ökodesign-Richtlinie[142] und wird einer Aufstellung des Fraunhofer ISE entnommen.

Zur Ermittlung der durch den Heizkessel erzeugten Nutzwärme wird in jedes Simulationsmodell ein Integrator eingefügt. Dieser summiert über die simulierte Zeit in jedem Zeitschritt das Ergebnis der folgenden Berechnung, also die Änderung der Wärmeenergie $\Delta\dot{Q}$ auf:

$$\Delta\dot{Q} = \dot{m} * c_p * \Delta T \tag{29}$$

Die Temperaturdifferenz ΔT wird aus den Ein- und Austrittstemperaturen des Kessels ermittelt. Der eingesetzte Massenstrom $\dot{m}$ ist der durch die Pumpe im Kessel bereitgestellte Massenstrom. Für die spezifische Wärmekapazität c_p wird der Wert für Wasser eingesetzt: $c_{pw} = 4{,}184\ \frac{J}{kg*K}$

Analog erfolgt über die Multiplikation der Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperaturen des Solarkollektors, des Massenstromes der Solarkreis-Pumpe und der spezifischen Wärmekapazität von Glykol $c_{pg} = 3{,}720 \frac{J}{kg*K}$ und anschließende Aufsummierung der Ergebnisse in jedem Zeitschritt die Ermittlung der solar erzeugten Wärme.

[139] Heimrath (2004), Simulation, Optimierung und Vergleich solarthermischer Anlagen zur Raumwärmeversorgung für Mehrfamilienhäuser, S. 114 ff.

[140] Heimrath (2004), Simulation, Optimierung und Vergleich solarthermischer Anlagen zur Raumwärmeversorgung für Mehrfamilienhäuser, S. 114 ff.

[141] Heimrath und Haller (2007), The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32, S. 19 ff.

[142] Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union (2009), Richtlinie 2009/125/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte.

6
Vorgehensmodell zur Optimierung

Die in Kapitel 4 und Kapitel 5 beschriebenen wirtschaftlichen und technischen Methoden werden im *TEWISol*-Optimierungskreislauf mit seinen vier Modulen zusammengeführt. Jede Methode stellt dabei ein Modul dar. **Modul 1** ist die Funktionskostenanalyse (s. 4.1 Identifikation werthaltiger Anlagenkomponenten), **Modul 2** ist die Prozesskostenanalyse (s. 4.2 Prozesskostenanalyse zur Identifikation von Kostentreibern), **Modul 3** ist die energetische Bewertung der betrachteten Anlage (s. 5.3.3 Umsetzung in ein Dymola/Modelica-Modell) und **Modul 4** ist die abschließende wirtschaftliche Bewertung des zu beurteilenden Solarthermischen Kombisystems mittels der Kennzahl *LCoH* (s. Kapitel 4.4 Berechnung der Wärmegestehungskosten).

Im ersten Schritt wird für das betrachtete Gesamtsystem eine Funktionskostenanalyse durchgeführt. Aus dieser ergeben sich Funktionen und Komponenten deren Anteil am finanziellen Wert der Anlage über oder unter dem von den Kunden geforderten Nutzen liegt. Mit dem Ziel ein Gleichgewicht aus Wertanteil und Nutzenanteil zu erreichen, müssen Vorschläge für konstruktive Änderungen erarbeitet und umgesetzt werden. Die Änderungen sollen zu einer Erhöhung des Wertanteils führen, wenn der IST-Wertanteil unter dem Nutzenanteil liegt. Eine Senkung des Wertanteils z.B. durch die Verwendung preiswerterer Rohstoffe oder einer einfacheren Herstellung ist anzustreben, wenn der Nutzenanteil unter dem IST-Wertanteil liegt. An dieser Stelle kann das Ergebnis der Prozesskostenanalyse Einfluss finden. Die Prozesskostenanalyse ist für jede Komponente separat durch zu führen und gibt Aufschluss darüber, welche direkten und indirekten Mehrkosten durch eine Variantenvielfalt entstehen. Im Umkehrschluss werden Einsparpotentiale aufgedeckt, die durch Änderungen der Produktpalette entstehen.

Die Module 1 und 2 können folglich in einem iterativen Prozess beliebig oft wiederholt werden, bis ein System entstanden ist, das dem Nutzenanspruch der Kunden zum besten Preis gerecht wird.

Dieses System ist energetisch zu bewerten. Dafür müssen die Komponenten sowie das Referenzgebäude realitätsnah in einer numerischen Simulation abgebildet und Jahreswerte für den Energiebedarf des betrachteten Systems im Referenzgebäude ermittelt werden. Weiterhin ergeben sich aus der numerischen Simulation Werte zur solar bzw. konventionell erzeugten Energiemenge. Mit diesen Jahreswerten für Energiebedarf und Energieerzeugung, sowie den in der Funktionskostenanalyse ermittelten SOLL-Anschaffungskosten für das betrachtete solarthermische Kombisystem lassen sich die Wärmegestehungskosten berechnen.

Zum Vergleichen unterschiedlicher Anlagenkonfigurationen oder verwendeter technischer Lösungen, sind die Wärmegestehungskosten separat nach demselben Schema zu berechnen, sodass letztlich ein Vergleich aller betrachteten und an die Nutzeranforderungen angepassten Systemvarianten hinsichtlich deren Wirtschaftlichkeit möglich ist. Die beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 6-1 dargestellt.

Weitere Kriterien wie zum Beispiel minimaler CO_2-Ausstoß bei Produktion der Bauteile, bei Betrieb der Anlage oder deren Abbau und Recycling finden bei der aufgezeigten Herangehensweise aktuell keine Berücksichtigung.

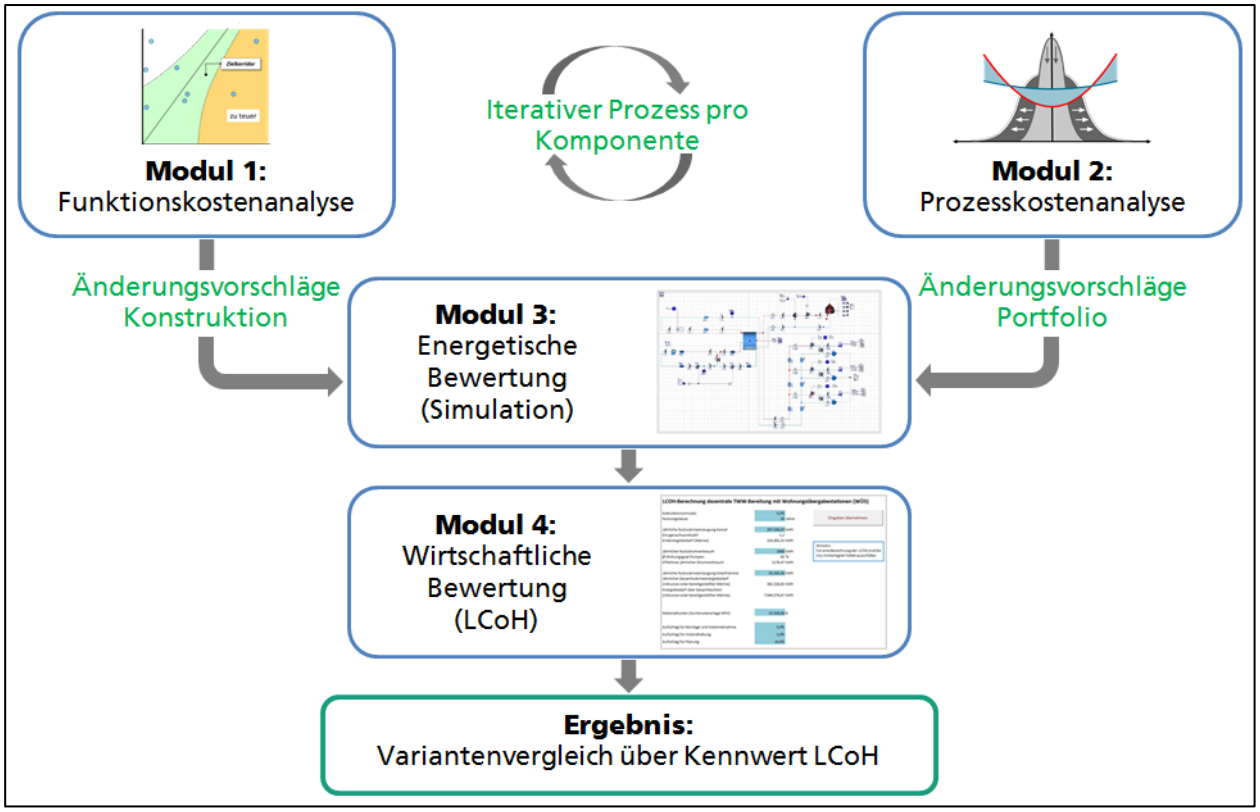


Abbildung 6-1: Der *TEWISol*-Optimierungskreislauf

Die Module greifen folglich nicht direkt ineinander und es sind insbesondere im Bereich der Module 1 und 2 individuelle Entscheidungen zu treffen und Lösungen zu finden, die sich nicht maschinell vorwegnehmen und abbilden lassen. Daher sind zwischen den Modulen „menschliche" Schnittstellen vorgesehen, die beispielsweise Ideen für konstruktive Änderungen entwickeln und umsetzen oder sich überlegen ob eine Reduzierung der Variantenvielfalt vom Kundenstamm getragen wird oder dazu führt, dass das Unternehmen wichtige Kunden verliert.

Für die Module 1, 2 und 4 werden Experten-Tools in der Microsoft Tabellenkalkulationssoftware Excel entwickelt, welche von Fachleuten branchenweit angewandt werden können. Dafür ist eine dem Anwendungsfall entsprechende Datenerfassung und Parametrierung notwendig. Im Rahmen des Moduls 3 ist für jedes Referenzgebäude und die betrachteten technischen Lösungen bestehende numerische Simulationen oder eine entsprechende Berechnung zu parametrieren und auszuführen. Für den Fall, dass andere im Rahmen dieses Projektes betrachtete Technologien untersucht werden sollen, sind die Modelle an entsprechender Stelle zu erweitern um auf diese Weise technische Feinheiten möglichst präzise darzustellen und ihren Einfluss auf die Energiekennwerte zu ermitteln. Aufgrund der vielen möglichen technischen Konfigurationen der solaren Kombianlagen, hierbei insbesondere der Realisierung der TWW-Bereitung, und diverser unterschiedlicher Charakteristika realer Gebäude, ist auch an dieser Stelle im *TEWISol*-Optimierungskreislauf keine Implementierung in ein durchgängiges Software-Tool möglich.

7
Überprüfung der Gesamtmethodik mit beispielhafter Ergebnisermittlung

Aus der Funktionskostenanalyse gehen zunächst die IST-Kosten für die einzelnen Komponenten einer solarthermischen Kombianalage hervor. Diese zeigt exemplarisch Abbildung 7-1 in Form der relativen Anteile der jeweiligen Baugruppen an den Investitionskosten. Diese unterscheiden sich nicht signifikant über die drei betrachteten technologischen Varianten.

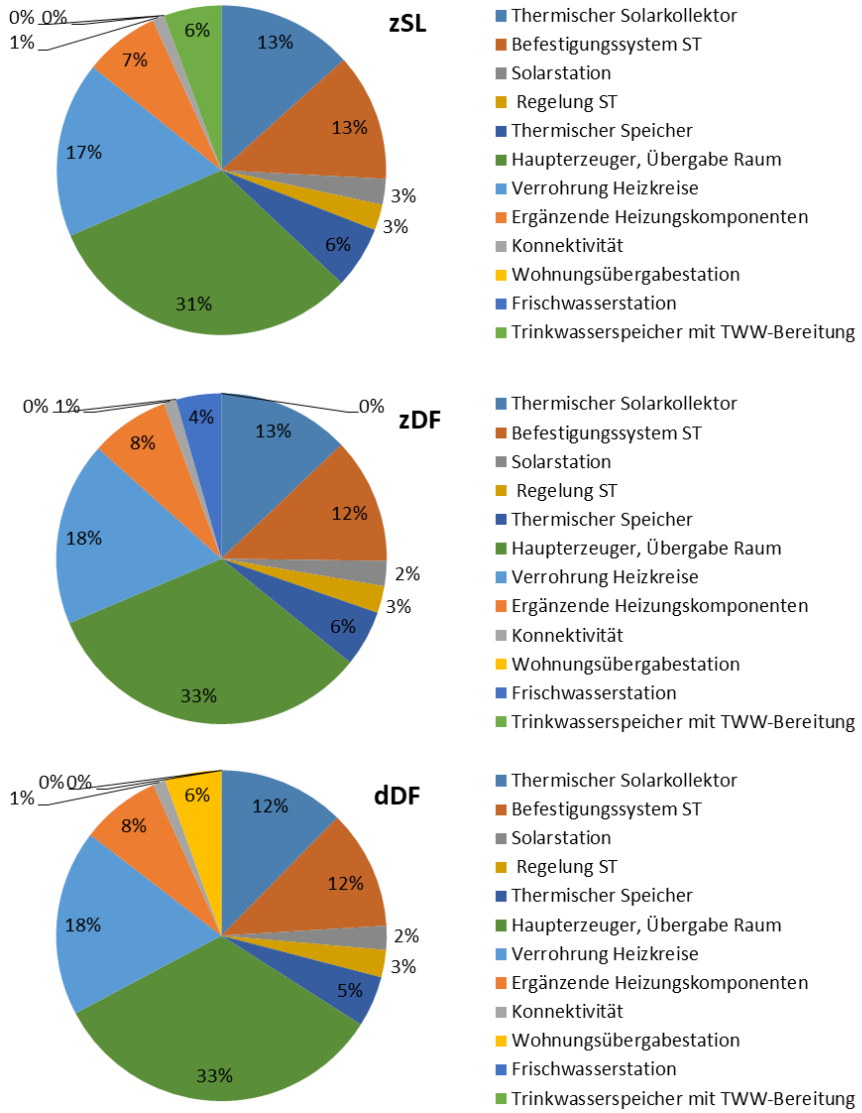


Abbildung 7-1: Investitionskostenverteilung auf die Komponenten (IST) als Ergebnis der Funktionskostenanalyse für das System Speicherlade (zSL), Frischwasserstation (zDF) und Wohnungsübergabestation (dDF)

Die als Baugruppe aufgenommene Thematik der *Konnektivität* wird im Rahmen des Projektes im Excel-Tool separat aufgesetzt, da diese auf Grund der zunehmenden Digitalisierung auch in der Heizungstechnik immer relevanter ist. In der folgenden Abbildung 7-2 werden die gesamten Kosten für die einzelnen Varianten aufgeführt

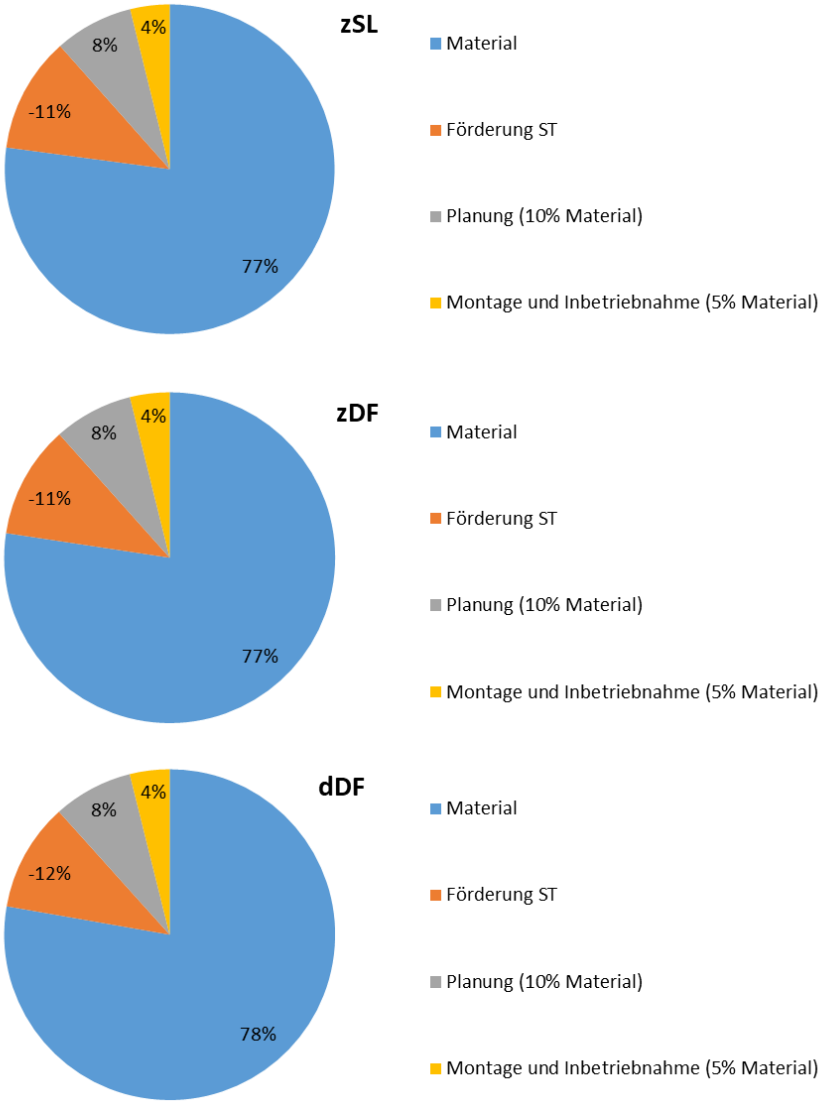


Abbildung 7-2: Gesamtkostenverteilung auf die Komponenten (IST) als Ergebnis der Funktionskostenanalyse für das System Speicherlade (zSL), Frischwasserstation (zDF) und Wohnungsübergabestation (dDF)

Es zeigt sich auch hier, dass keine signifikanten Unterschiede in der Kostenstruktur über die betrachteten Varianten vorliegen.

Die Zuordnung von Funktionen zu Komponenten und umgekehrt erfolgt durch Experten und bleibt in den weiteren Analyseschritten unverändert. Im Folgenden werden die Kostenanteile mit den im Anhang I dargestellten Fragebogen bezüglich den Nutzenanteilen verglichen. Diese können auch für unterschiedliche Stakeholder separat ausgewertet werden. Zusammen mit einer Zielkostenvorgabe werden die Idealpreise für Funktionen und Komponenten ermittelt.

Ein für die Hersteller attraktives Mittel zur Abbildung entstehender bzw. laufender Kosten durch, aus der Funktionskostenanalyse folgenden, Anpassungen ihres Produktportfolios ist die Prozesskostenanalyse. Abbildung 7-3 veranschaulicht die Verteilung der initialen und laufenden Komplexitätskosten für eine beispielhafte neue kleine Produktserie bestehend aus zwei Produkten auf die unterschiedlichen Unternehmensbereiche für einen Hersteller.

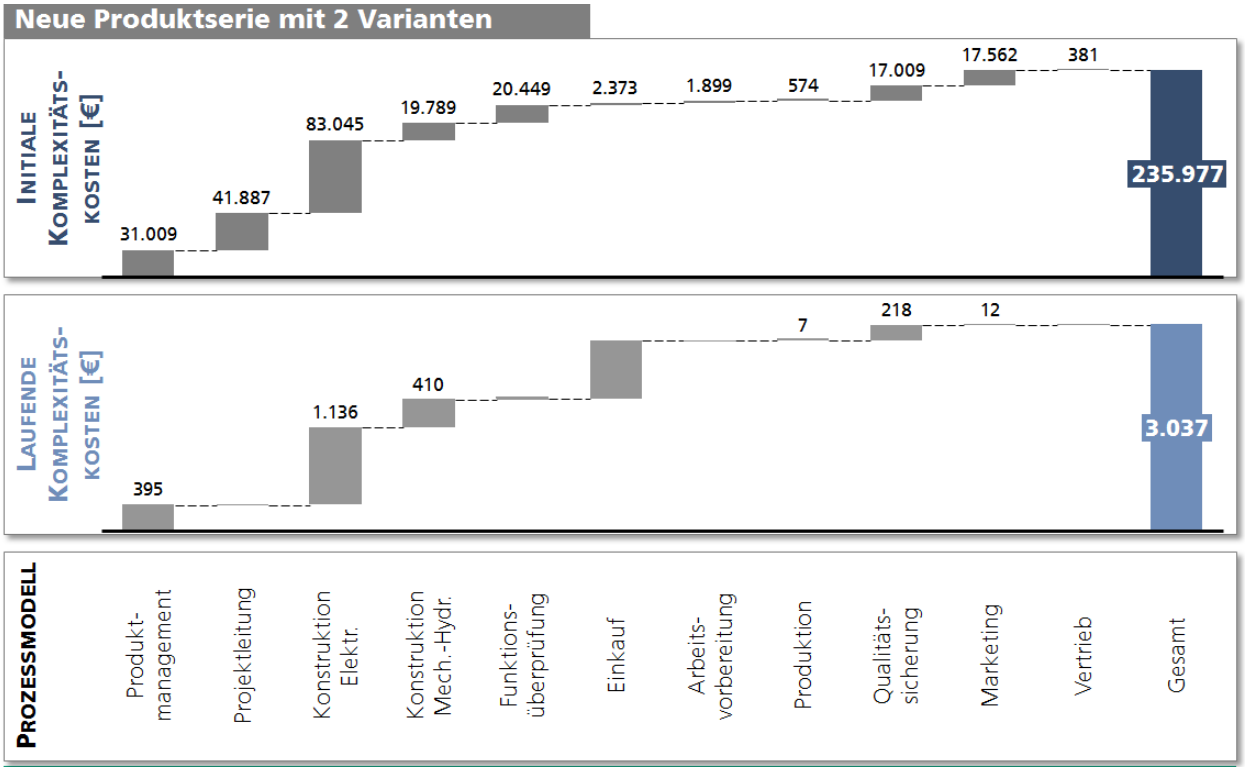


Abbildung 7-3: Aufschlüsselung von initialen und laufenden Komplexitätskosten für eine neue Produktserie mit zwei Varianten auf die beteiligten Abteilungen

Die Darstellung zeigt beispielhaft auf, welche Kosten bei der Entwicklung einer neuen Produktserie zu erwarten sind. Damit wird dem Unternehmer ermöglicht, fundierte Entscheidungen in der Produktentwicklung und Preisegestaltung zu treffen. Mögliche Entscheidung für ggfs. notwendige Quersubventionierung von Produkten können bewusst basierend auf klaren Kosteninformationen getroffen werden. Darüber hinaus erlaubt diese Darstellung auch die Optimierung der beteiligten Prozesse, wenn Benchmarkdaten vorliegen.

Desweitern hilft die Stakeholderbefragungen der Kunden zum Nutzen der einzelnen Produktfunktionen Produktoptimierung zu betreiben. Die vom Markt erwarteten Funktionalitäten und deren Kundenrelevanz können quantitativ erfasst werden und erlauben marktgerechte Produkte, die in Preis und Funktionalität den Kundenerwartungen entsprechen. Damit können Kostensenkungsansätze für einzelne Firmen aber auch für die gesamte Branche optimiert werden und z.B. Solartechnologie konkurrenzfähiger gemacht werden.

Im Projekt *TEWISol* wird eine Methodik zum energetischen Vergleich und der monetären Bewertung unterschiedlicher technologischer Lösungen im Bereich TWW-Bereitung entwickelt. Die drei betrachteten Technologien sind die zentrale TWW-Bereitung im Speicherladeprinzip (SpL), zweitens die ebenfalls zentrale TWW-Bereitung im Durchflussprinzip (FWS) und drittens die dezentrale TWW-Bereitung im Durchflussprinzip mittels Wohnungsübergabestationen (dezWS). Die energetische Bewertung wird basierend auf einer numerischen Simulation mit den in Kapitel 5 aufgeführten Randbedingen realisiert. Im Folgenden werden die ermittelten Kennzahlen tabellarisch dargestellt.

Tabelle 7-1: Energiebedarfswerte Referenzgebäude *TEWISol*

Jährlicher Energiebedarf Referenzgebäude [kWh/a]	27 220		
TWW-Bereitung	Zentral, Speicherladeprinzip (zSL)	Zentral, Durchflussprinzip (zDF)	Dezentral, Durchflussprinzip (dDF)
Jährlicher Erdgasbedarf [kWh/a]	73 779	72 579	71 826

Letztlich soll ein Vergleich über die Kennzahl der Wärmegestehungskosten (LCoH) gezogen werden. Für deren Berechnung sind neben den Energieverbrauchswerten auch die drei Kostenpositionen kapitalgebundene, verbrauchsgebundene und betriebsgebundene Kosten erforderlich. Detaillierte Hintergrundinformationen dazu enthält Kapitel 4.4 Berechnung der Wärmegestehungskosten.

Tabelle 7-2: Kostenübersicht Gesamtsystem-Varianten *TEWISol*

TWW-Bereitung	Zentral, Speicherladeprinzip (zSL)	Zentral, Durchflussprinzip (zDF)	Dezentral, Durchflussprinzip (dDF)
Kapitalgebundene Kosten [€]	3 600	3 451	3 429
Verbrauchsgebundene Kosten [€/a]	5 333	5 249	5 196
Betriebsgebundene Kosten [€/a]	1 032	993	988

Mit den aufgeführten Werten ergeben sich die in der folgenden Abbildung 7-4 dargestellten Werte für die Wärmegestehungskosten. Dabei werden die eingangs aufgeführten Kostengruppen separat dargestellt.

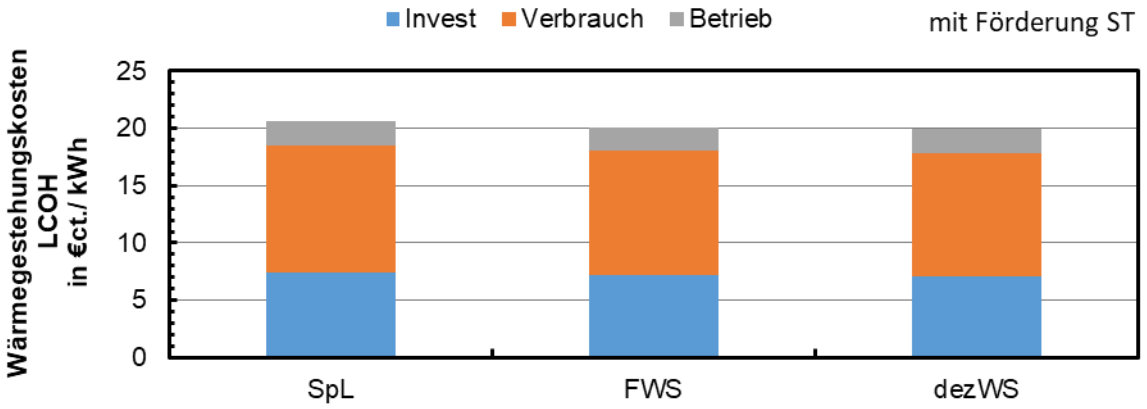


Abbildung 7-4: Übersicht der *LCOH* über die drei untersuchten Varianten zur Trinkwarmwassererzeugung

Es zeigt sich dabei, dass:

- Sich für den hier durchgeführten Untersuchungsrahmen keine signifikanten Unterschiede in den betrachteten System einstellen
- Die verbrauchsgebundenen Kosten den größten Anteil einnehmen

In der Betrachtung werden u.a. bedingt durch die eingesetzten Methoden z.B. hygienische und versicherungstechnische Aspekte nicht abgebildet, da diese sich schwierig monetär messen lassen, beziehungsweise nur einen nutzergerechten Einfluss auf die Preisgestaltung haben, wenn alle Funk-

tionen und Komponenten in der Zielkostenzone liegen (erfolgreiche Optimierung durch FKA). Dies trifft insbesondere auf den Einsatz von Wohnungsübergabestationen zu.

Mit der folgenden Abbildung 7-5 wird die Abhängigkeit der aufgeführten Kosten von der angesetzten Preissteigerungsrate aufgezeigt.

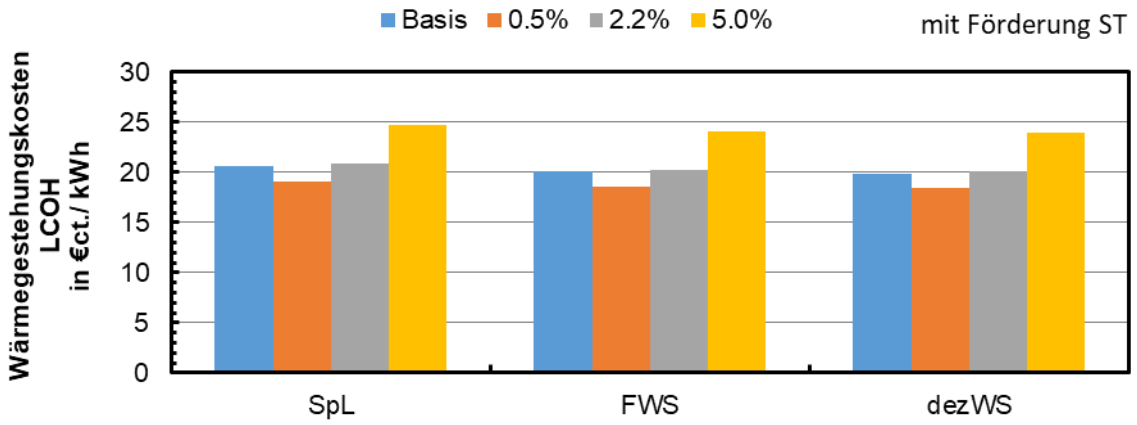


Abbildung 7-5: Abhängigkeit der LCOH von der angesetzten Preissteigerungsrate über die drei untersuchten Varianten zur Trinkwarmwassererzeugung

Wie in Abbildung 7-4 dargestellt, weisen die verbrauchsgebundenen Kosten einen in etwa gleich hohen Anteil über die untersuchten Varianten zur Trinkwarmwassererzeugung auf. Die Preissteigerungsrate beeinflusst hierüber die Ergebnisse sehr deutlich. Es wird damit auch ersichtlich, dass sich innerhalb der drei untersuchten Varianten zur Trinkwarmwassererzeugung keine wesentlichen Unterschiede einstellen.

Eine gleiche Charakteristik stellt sich mit der in Abbildung 7-6 aufgezeigten Variation des Zinssatzes ein. Wie in Abbildung 7-4 dargestellt, rufen alle untersuchten Varianten einen ähnlich hohen Investitionsanteil auf, so dass die Sensitivität auf diesen Parameter ebenfalls sehr ähnlich ist.

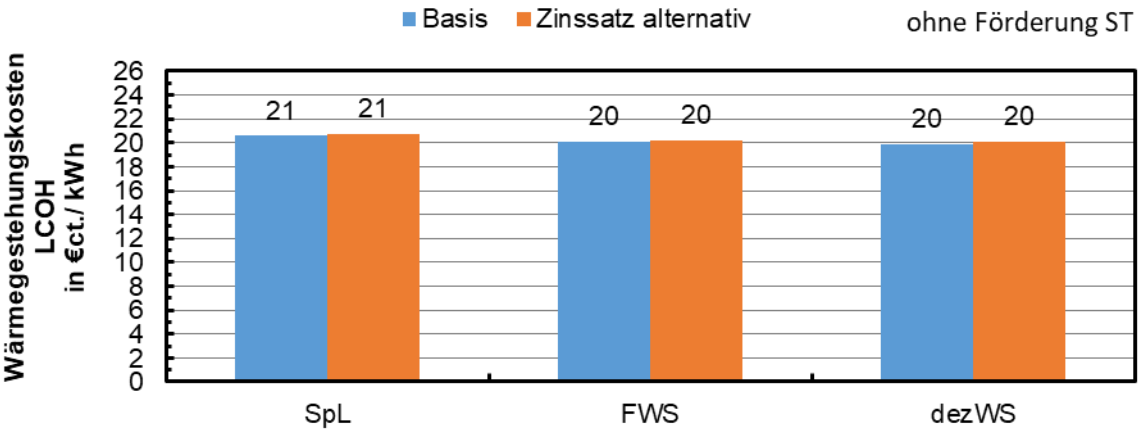


Abbildung 7-6: Abhängigkeit der LCOH von dem angesetzten Zinssatz über die drei untersuchten Varianten zur Trinkwarmwassererzeugung

Die im Rahmen des Projektes analysierten Technologien zur Trinkwarmwassererzeugung und die in ihrer Konstruktion unterschiedlich ausgeführten Komponenten in den einzelnen Varianten haben damit mit den hier durchgeführten Analysen keinen Einfluss auf die Kennzahl der Wärmegestehungskosten (LCoH). Vergleichbare Ergebnisse lassen sich z.B. aus einer Studie des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. aus dem Jahr 2016 entnehmen[143]. Hier werden für die jährlichen Gesamtkosten von solarthermisch unterstützen Anlagen zur Wärmeversorgung Mehrkosten von 6 % bei dem Einsatz von Wohnungsstationen gegenüber einer zentralen Variante berechnet.

[143] BDEW-Projektgruppe Heizkostenvergleich (2016), BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2016.

8
Öffentlichkeitsarbeit

8.1 IEA SHC Task 54 "Price Reduction of Solar Thermal Systems"

8.1.1 Einleitung

Vor dem Hintergrund eines anhaltenden Rückgangs der Verkaufszahlen[144] in der Solarthermie-Branche bei nahezu gleichbleibenden Anlagenkosten hat die Task 54 des Solar Heating & Cooling Programme der International Energy Agency zum Ziel die Anschaffungskosten für installierte Solarthermieanlagen für Endkunden signifikant zu senken. Zu diesem Zweck werden neuartige Werkzeuge zur Kostensenkung entwickelt und bewertet. Es werden dabei produktions- oder installationsbezogene Kostensenkungspotentiale für Werkstoffe, Komponenten, Baugruppen und Gesamtsysteme aufgedeckt. Ein besonderes Augenmerk lag auf der Ermittlung und Senkung von der Produktion nachgelagerten Kostenpositionen, wie etwa dem Vertrieb mit seinen unterschiedlichen Vertriebswegen oder dem Betrieb und der Instandhaltung. Folglich wird die gesamte Wertschöpfungskette untersucht, wie Abbildung 8-1 verdeutlicht.

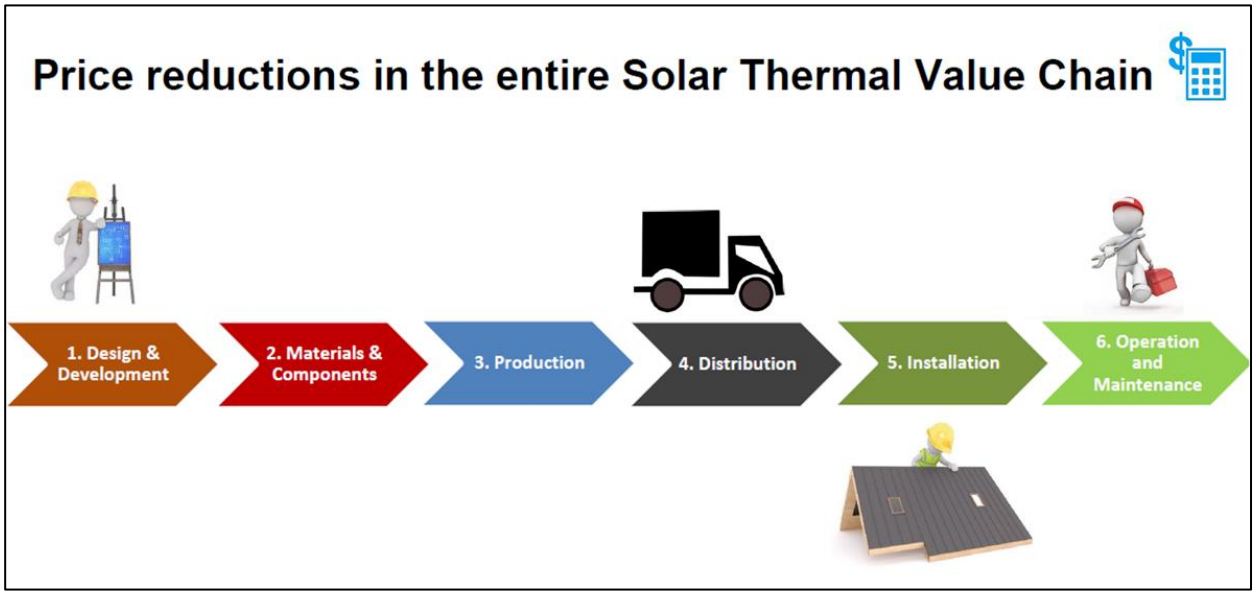


Abbildung 8-1: Idee des IEA SHC Task 54[145]

Es werden Marktanalysen durchgeführt, die Kostenstrukturen offenlegen und zur Definition von Referenzsystemen dienen. Zusätzlich dazu werden die sozio-politischen Rahmenbedingungen der Preisgestaltung für Solarthermieanlagen in ausgewählten Gegenden analysiert. Diese Erkenntnisse aus den aufgezählten Untersuchungen bilden die Grundlage für die Bewertung der IST-Kosten und zum Beziffern von Einsparpotentialen.

Die konkrete Zielstellung des IEA SHC Task 54 ist die Senkung der Investitionskosten für ausgewählte Solarthermiesysteme um bis zu 40 %.

[144] Siehe dazu Abbildung 2-1.
[145] Köhl und Mugnier (2018), Introduction to IEA SHC Task 54.

Die Forschungen werden aufgrund unterschiedlicher Gegebenheiten auf den Märkten länderspezifisch durchgeführt und letztlich weitestgehend verallgemeinert. Dazu werden vereinfachte Systementwürfe erstellt. Des Weiteren werden Ansätze entwickelt, mit denen der Materialeinsatz reduziert und die verwendeten Materialien möglichst innovativ und kostengünstig integriert werden konnten. Auch der Standardisierung von ganzen Anlagenteilen und Unterbaugruppen wird ein hohes Einsparpotential beigemessen. Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Vereinheitlichung der Anschlussmöglichkeiten und deren Vereinfachung im Sinne einer Installation nach dem Plug and Play Prinzip. Somit tragen die aufgeführten Maßnahmen Reduktion der Herstellkosten und auch der Installation und der Instandhaltung bei. Auf diesem Wege können für jeden Markt wirtschaftliche Solarthermische Systeme entwickelt und angeboten werden. [146]

8.1.2 Leitung des IEA SHC Task 54

Im Rahmen von *TEWISol* stellte das Fraunhofer ISE den Operating Agent für den IEA SHC Task 54. Damit fielen unter anderem die Organisation von Expertentreffen und Workshops, der Aufbau und die Pflege des Internetauftritts sowie die Vorstellung der Arbeiten des IEA SHC Task 54 bei Treffen des Exekutiv Komitees oder den Solar Heating and Cooling Conferences in den Verantwortungsbereich von Dr. Michael Köhl des Fraunhofer ISE.

Der IEA SHC Tasks 54 unterteilt sich in folgenden vier Subtasks:

- Subtask A: Market success factors and cost analysis
- Subtask B: System design, installation, operation and maintenance
- Subtask C: Cost-efficient materials, production processes and components
- Subtask D: Information, dissemination and stakeholder involvement

Eine Übersicht über die im Task 54 erstellten Unterlagen liefert Anhang A (Zusammenfassung Ergebnisse

8.1.3 Beiträge des Projektes *TEWISol* zum IEA SHC Task 54

Das Projekt *TEWISol* stellte eine Methodenentwicklung für eine Kostenoptimierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette her. Während die Funktionskostenanalyse Möglichkeiten zur Verbesserung des Preis-Leistungsverhältnisses und einer Maximierung der Akzeptanz des Produktes "Solarthermische Kombianlage" auf konstruktiver Ebene liefert, ergeben sich aus der Prozesskostenanalyse Inputs für eine Verschlankung des Produktportfolios und somit einem wichtigen Schritt in Richtung Standardisierung und der damit verbundenen Kostensenkung.

In der Berechnung der *LCoH* nach den Richtlinien aus Info Sheet A01 wird die Wirtschaftlichkeit des im *TEWISol*-Optimierungskreislauf entwickelten Solarthermischen Systems berechnet, so dass der Kunde die Technologie mit Alternativen vergleichen und deren Wirtschaftlichkeit bewerten kann.

Die Forschungsergebnisse aus dem Projekt *TEWISol* werden im Rahmen des IEA SHC Task 54 bei Workshops und einem Webinar vorgestellt und mit Experten diskutiert. Des Weiteren wird im IEA SHC Task 54 Newsletter 2016 über *TEWISol* berichtet.

[146] IEA SHC, 2015-2019, Project (Task) Description, http://task54.iea-shc.org/description

8.2 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projektes werden auf dem Symposium Solarthermie[147] (ab 2019 mit dem Zusatz innovative Wärmesysteme) 2017 und 2019 Vorträge über *TEWISol* abgehalten. Zusätzlich wird das Projekt mit seinen Ergebnissen in einem dem Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2019 vorgeschalteten Industrieworkshop präsentiert.

[147] www.solarthermie-symposium.de

9 Zusammenfassung

Im Rahmen von *TEWISol* wird methodisch einer zur Analyse der Wärmegestehungskosten in der Heizungsbranche aus insgesamt vier Modulen aufgebauter Optimierungskreislauf entwickelt. Dabei werden auf der einen Seite die auflaufenden Kosten der beteiligten Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette mittels wirtschaftswissenschaftlicher Methoden insbesondere hinsichtlich den nicht produktbehafteten, indirekten Kosten modelliert und in das Verhältnis zur energetischen Performance der gesamten Anlage zur Wärmeversorgung gesetzt. Mit dem Vorgehen werden insbesondere für einen Industriebetrieb etablierte Methoden zur Funktions- und Prozesskostenanalyse auf den in der Heizungstechnik typischen Anwendungsfall mit mehreren Stakeholdern einer Wertschöpfungskette hin adaptiert und mit den im Projekt beteiligten Stakeholdern an einem Referenzfall beispielhaft umgesetzt.

Im **Modul 1** wird dabei die Methode der **Wertanalyse** entsprechend erweitert, auf die einzelnen Stakeholder der Heizungsbranche adaptiert und eine **Funktionskostenanalyse** aufgesetzt. Hierfür werden insgesamt die vier spezifischen Methodenschritte

- Aufbau einer Funktionsstruktur
- Aufbau einer generischen Produktstruktur
- Zuordnung von Komponenten zu Funktionen
- Bewertung des Zielwertes von einzelnen Komponenten

aufgezeigt und hinsichtlich einer **funktionsorientierten sowie komponentenorientierten Auswertung** umgesetzt. Die funktionsorientierte Betrachtung dient dazu technologisch unterschiedliche Funktionsrealisierungen vergleichen und bewerten zu können. Es lassen sich damit also aus der Funktionskostenanalyse konstruktive Merkmale für Komponenten und deren Nutzen für den Kunden ableiten, die über oder unter dem Wert der Komponente liegen. Die komponentenorientierte Bewertung dient dazu, Soll-Kosten für Komponenten abzuleiten und darauf aufbauend die Optimierungspotenziale der Herstellkosten einzelner Module und Komponenten aufzuzeigen. Es zeigt sich dabei, dass der zentrale Schritt der Methode und damit auch des Forschungsprojekts die Bewertung der Funktionen aus der **Perspektive unterschiedlicher Stakeholder** ist. Ein Zusammenführen der einzelnen „Sichtweisen-Modelle" der Stakeholder zu einer eindeutigen, finalen Betrachtung ist nicht möglich, da eine Betrachtung immer aus der jeweiligen Perspektive des entsprechenden Stakeholders erfolgen muss.

Grundsätzlich wird der paarweise Vergleich zur Nutzenbewertung auf Basis einer in Microsoft Excel-basierten Matrix vorgenommen. Es zeigt sich dabei, dass diese Art der Bewertung verhältnismäßig zeitaufwendig ist, da für eine Bewertung von 28 Funktionen 378 Entscheidungen getroffen werden müssen. Zwar unterstützt die Matrixdarstellung die Fortschrittsanzeige, jedoch werden für die Bearbeitung einer in ihrer Aussage bereits reduzierten drei-stufigen Entscheidungsskala zwischen „wichtiger", „unwichtiger" oder „gleich bedeutend" ungefähr 60 Minuten für die vollständige Bewertung aufgewendet, so dass die erforderliche zielgerichtete und konzentrierte Bearbeitung mit dieser Methode zu hinterfragen ist. Die Funktionsbewertung aus der Perspektive des **Handwerksbetriebs** wird mit dem am Projekt beteiligten Handwerksbetrieb durchgeführt. Auf Grund dieser Erfahrungen wird für die Kundenbefragung der aufgeführte und im Anhang abgebildete Fragebogen entworfen. Dieser erleichtert die Befragung sowohl seitens des Verständnisses als auch hinsichtlich des zeitlichen Aufwands merklich. Dabei ist anzumerken, dass die Ergebnisse der fragebogenbasierten Funktionsbewertung weniger präzise sind, da nicht alle Funktionen miteinander verglichen werden. Stattdessen werden die detaillierten Vergleiche anschließend berechnet. Beim Umsetzen der Nutzenanalyse ist damit der Detaillierungsgrad für die Modellierung der Eingabe sowie der dahinterliegenden Berechnungsmethoden entsprechend dem angesprochenen Zielpersonenkreis miteinander abzustimmen um eine größtmögliche Genauigkeit erreichen zu können. Es werden damit mit diesen Arbeiten im Rahmen des Projektes soziologische mit wirtschaftswissenschaftlichen Methoden verschnitten.

Aus Sicht des Stakeholders **Kunde** zeigt sich, dass für den Nutzen- und Wertanteil einer solarthermischen Kombianlage bereits viele der abgefragten Funktionen in der definierten Zielkostenzone liegen. Allerdings zeigt die Darstellung z.B. auch, dass die Funktion „Wärmeenergie an Fluid binden" mit einem Wertanteil von 18,08 % und einem Nutzenanteil von 5,70 % in ihrer aktuellen Realisierung deutlich zu kostenintensiv ist bzw. der Kunde andere Funktionen deutlich stärker wertschätzt. Diese Erkenntnis lässt sich als Indikator dafür werten, dass eine weitere Steigerung des Wirkungsgrads von solarthermischen Kombianalagen nicht mit höheren Preisen am Markt honoriert wird. Stattdessen sollten andere Funktionen der Anlage weiter ausgebaut werden. Ein Hinweis für weitere Entwicklungstrends lässt sich hier ebenfalls bereits erkennen. So wird die Funktion „Legionellenprävention" oder „Sicherheitsregelungen des Systems" von dem Stakeholder Kunde z.B. relativ als sehr wichtig erachtet.

Wird der Nutzen- und Funktionsanteil von zehn ausgewählten Funktionen einer solarthermischen Kombianlage aus der Perspektive der Stakeholder **Kunde** wie auch der Sicht des **Handwerks verglichen**, so zeigt sich, dass dabei die kostenseitige Bewertung der Funktionen unberührt bleibt. Die Bewertung der solarthermischen Kombianlage wirkt sich dabei ausschließlich auf die Nutzenwerte aus. So lässt sich zeigen, dass Funktionen aus unterschiedlichen Perspektiven bewertet auch einen nahezu identischen Nutzenwert aufweisen können. Ein Beispiel hierfür ist die Funktion „Abdichtung gegenüber Staub/ Schmutz". Aus Sicht des Forschungsprojekts sind jedoch die unterschiedlichen Bewertungen interessanter. Beispielsweise liegen deutliche Unterschiede in der Bewertung der Funktionen „Temperaturschichtung sicherstellen" oder „Strahlungskonversion" durch Handwerk und Kunde vor. Für den ersten Fall lässt sich diese eventuell damit erklären, dass einem durchschnittlichen Kunden das detaillierte technische Verständnis für die Auswirkungen der Temperaturschichtung im Wärmespeicher der solarthermischen Kombianlage fehlt und somit die Funktion unterbewertet wird. Umgekehrt verhält es sich mit der Funktion „Strahlungskonversion". Dort ist es denkbar, dass der Kunde diese Funktion in seiner Wichtigkeit überbewertet, da er die Gesamtfunktionalität des Systems in diese Funktion projiziert. Im umgekehrten Fall ist jedoch auch ebenfalls denkbar, dass Funktionen, welche die Effizienz des Gesamtsystems beschreiben im Handwerk niedriger bewertet werden, als Funktionen, welche auf die Montier- oder Wartbarkeit des Systems abzielen. Diese Funktionen betreffen den montierenden Handwerksbetrieb stärker als die konkrete Leistungsfähigkeit der solarthermischen Anlage.

Als Ergebnis des Forschungsprojekts kann so eindrucksvoll gezeigt werden, dass eine einseitige Bewertung von solarthermischen Kombianlagen ausschließlich aus einer Stakeholder-Perspektive zu einem verzerrten Bild bezüglich der Entwicklungspotenziale führt. Erst durch das Gesamtbild aller beteiligten Anspruchsgruppen an die Anlage ergeben sich sinnvolle Optimierungspotenziale. Dabei wird auch deutlich, dass zukünftig vor allem auch das Handwerk stärker eingebunden werden sollte, da dort ein detailliertes Wissen verborgen ist.

In **Modul 2** wird mit der **Prozesskostenanalyse** ein vollständig entwickeltes und für den beteiligten industriellen Projektpartner auch anhand von Referenzfällen beispielhaft validiertes Komplexitätskostenmodell eines Unternehmens aus der Heizungsbranche aufgebaut. Auch hier werden für die weiteren Stakeholder separate Komplexitätskostenmodelle für den Systemhersteller sowie einen Handwerksbetrieb erstellt. Wie bei den Funktionskosten ist es auch an dieser Stelle nicht möglich, die Komplexitätstreiber der verschiedenen Wertschöpfungsstufen inhaltlich über einheitliche Komplexitätskostentreiber für die gesamte Wertschöpfungskette so in Bezug zu setzen, dass eine durchgängige vollautomatisierte Konfiguration der gesamten Wertschöpfungskette ermöglicht wird. Beispielhaft wird mittels eines Referenzfalles aufgezeigt, wie eine Produktneuentwicklung des Zulieferers eine Produktadaption des Systemherstellers auslöst. Für den Handwerksbetrieb bedeutet diese Adaption eine weitere Installationsvariante.

Es wird methodisch in den folgenden Schritten vorgegangen:

- Aufbau eines Prozessmodells
- Erfassung der Komplexitätstreiber
- Ableitung Gesamtmodell für Komplexitätstreiber
- Bewertung von Referenzfällen

Bei der Durchführung des Methodenschritts zur Erfassung der Komplexitätstreiber mit den am Forschungsprojekt beteiligten Unternehmen zeigt sich sowohl industrieseitig als auch im Handwerk, dass die größte Herausforderung in der Bestimmung des Aufwands je Treiber und Prozessschritt liegt. Eine gesamtheitliche Betrachtung der Wertschöpfungskette und eine Vergleichbarkeit zwischen den Akteuren wird erreicht, in dem die Komplexitätstreiber der jeweiligen Prozesskostenmodelle von Zulieferer, Hersteller und Handwerk möglichst aggregiert und standardisiert werden. Das bedeutet, dass Kostentreiber funktionsübergreifend betrachtet und bei inhaltlicher Ähnlichkeit zusammengefasst werden können. Exemplarisch wird hier eine durchgängige Betrachtung für die Prozessschritte zur konstruktiven Änderungen einer Komponente einer solarthermischen Kombianlage aufgezeigt. Es wird deutlich, dass diese verhältnismäßig geringe Kostenänderung beim Zulieferer vor allem beim Systemhersteller um ca. 400 % höhere Kosten hervorruft. Der Stakeholder Handwerk ist dagegen für dieses Beispiel bedingt durch seine Arbeitsweise immanent in der Lage, flexibel zu reagieren und von dieser Adaption kostenseitig kaum betroffen. Dieses Ergebnis zeigt eindrucksvoll die Notwendigkeit, die vollständige Wertschöpfungskette bei der Bewertung von Produktoptimierungen zu betrachten.

Im Rahmen von **Modul 3** werden auf der einen Seite drei Warmwasserspeicher mit jeweils unterschiedlichen Konstruktionsmerkmalen und auf der anderen Seite eine Wohnungsstation mit unterschiedlichen Ausprägungen zur Wärmeübertragung messtechnisch analysiert und zur Modellierung von mit den Messdaten abgestimmten Systemen zur solarthermisch unterstützten Wärmeversorgung eines Mehrfamilienwohngebäudes herangezogen. Mittels den auf der Prüfsequenz EN 12977-3:2016 für Warmwasserspeicher basierenden Messdaten werden mehrere Ansätze für Modelle in der Simulationsumgebung Dymola/Modelica validiert und zu einem konsistenten Modell zusammengeführt. Damit können insbesondere die untersuchten Varianten zur Trinkwarmwassererzeugung als temperatursensitiven Prozesse, die mit der Temperaturschichtung der Warmwasserspeicher in Wechselwirkung stehen, effektiv in der Simulationsumgebung Dymola/Modelica implementiert und final simulationstechnisch abgebildet werden.

Die Zusammenführung der wirtschaftlichen und energetischen Methoden wird mit dem **Modul 4** erreicht, in dem die Funktionskosten über die Annuitätenmethode mit den energetischen Werten der simulierten Anlagenvarianten zusammengebracht werden. Es kann damit exemplarisch gezeigt werden, dass sich die Wärmegestehungskosten für die untersuchten und am Markt verfügbaren Technologien zur Trinkwarmwassererzeugung nicht signifikant voneinander unterscheiden. Hier sind andere in erster Linie monetär nur schwer erfassbare Kriterien, wie die mit der Trinkwasserhygiene einhergehenden Risiken oder die mit der Organisation der Zugänglichkeit und Wartung von kleinteilig ausgeführten dezentralisierten Anlagen einhergehenden Aufwände zu bewerten.

Beispielhaft wird eine Standardisierung von Komponenten in der Heizungstechnik aufgezeigt, der eine konstruktionsbedingte Variantenänderung beim Zulieferer zu Grunde liegt. Mit einer Betrachtung der relevanten Kostenpositionen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg liegen die wesentlichen Kosten in den mit einer Adaption bedingten, indirekten Kostengruppen auf Seiten der Hersteller/Systemanbieter.

Literaturverzeichnis

Anderl, R.; Eigner, M.; Sendler, U.; Stark, R., Smart Engineering,, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2012.

BDEW-Projektgruppe Heizkostenvergleich, BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2016,, 2. Aufl., 2016.

BMWi, EnEff: Wärme - Verbundvorhaben Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasser-Installation im Kontext: DHC Annex TS1 "Low Temperature District Heating for Future Energy Systems" : Akronym: EE+HYG@TWI : koordinierter Schlussbericht zu 03ET1234 A bis D, .

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Die Energie der Zukunft - Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende - Berichtsjahr 2016, Berlin, Juni 2018.

*Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (*BMWi), Energieeffizienzstrategie Gebäude - Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand, Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.), November 2015.

*Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (*BMWi), Zweiter Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - Die Entwicklung des Wärme- und Kältemarktes in Deutschland, Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.), November 2015.

Bundeszentrale für politische Bildung, Auszug aus dem Datenreport 2016 - Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland - Kapitel 9 Wohnen, 2016.

Büschken, J.; Thaden, C. von, Produktvariation, -differenzierung und -diversifikation, In: Albers, S.; Herrmann, A. (Hrsg.): Handbuch Produktmanagement, Wiesbaden: Gabler Verlag, 2007, S. 595-616.

Coenenberg, A. G.; Fischer, T. M.; Günther, T., Kostenrechnung und Kostenanalyse,, 7., überarb. und erw. Aufl., Stuttgart, Schäffer-Poeschel, 2009.

Cooper, R.; Slagmulder, R., Target costing and value engineering,, [Nachdr.], Portland, Or., Productivity Press, 1998.

Deisenhofer, T., Marktorientierte Kostenplanung auf Basis von Erkenntnissen der Marktforschung bei der AUDI AG, In: Horváth, P. (Hrsg.): Target costing - Marktorientierte Zielkosten in der deutschen Praxis, Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993, S. 93-118.

Deutsches Institut für Normung e.V.DIN EN 12973 2002

Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 1988-300: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 300: Ermittlung der Rohrdurchmesser; Technische Regel des DVGW, Berlin, Mai 2012.

Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 12831-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Berlin, September 2017.

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M., Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren,, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2014.

Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union, Richtlinie 2009/125/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte, 31.10.2009.

Fair Renewable Heating and Cooling Options and Trade (FROnT) project, Technical Report on the Elaboration of a Cost Estimation MethodologyFair Renewable Heating and Cooling Options and Trade (FROnT) project (Hrsg.), 2015.

Finanzchef (2016) Anstieg des Gemeinkostenblocks in den letzten 50 Jahren, Anstieg des Gemeinkostenblocks in den letzten 50 Jahren. URL: www.finanzchef.de [Zuletzt geprüft: 21.10.2016].

Fischer, J. O., Kostenbewusstes Konstruieren,, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2008.

Friedl, B., Wertanalyse nach DIN EN 12973 als Instrument des produktorientierten Kostenmanagements, 2007.

Heimrath, R., Simulation, Optimierung und Vergleich solarthermischer Anlagen zur Raumwärmeversorgung für Mehrfamilienhäuser, Dissertation, Technische Universität Graz, November 2004.

*Heimrath, R./Haller, M. (*2007) The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32, The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32. URL: http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/task32-Reference_Heating_System.pdf [Zuletzt geprüft: 29.10.2018].

Horsch, J., Kostenrechnung,, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.

Horváth, P.; Mayer, R., Was ist aus der Prozesskostenrechnung geworden?, In: Controlling & Management, Nr. S255. Jg., 2011, S. 5-10.

Joos-Sachse, T., Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement - Grundlagen - Anwendungen - Instrumente,, 5. Aufl., Wiesbaden, Springer Gabler, 2014.

Kim, I.-w.; Berry, E., Target Costing, In: Abdel-Kader, M. G. (Hrsg.): Review of Management Accounting Research, 1st ed. 2011; London: Palgrave Macmillan UK, 2014, S. 275-294.

Köcher, R., Modellierung und numerische Simulation von Wärmespeichern, Diplomarbeit, TU Berlin, 1995.

*Köhl, M./Mugnier, D. (*2018) Introduction to IEA SHC Task 54, Introduction to IEA SHC Task 54 - Price Reduction of Solar Thermal Systems. URL: http://task54.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/ISEC-2018-Presentation-Task54-Mugnier_vf.pdf [Zuletzt geprüft: 11.06.2019].

Kremin-Buch, B., Strategisches Kostenmanagement,, 4. Aufl., s.l., Gabler Verlag, 2007.

Kristin Paetzold, Ansätze für eine funktionale Repräsentation multidisziplinärer ProdukteDFX 2006: Proceedings of the 17th Symposium on Design for X,, 2006, S. 61-68.

Laasch, T.; Laasch, E., Haustechnik - Grundlagen Planung Ausführung,, 13. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2013.

*Louvet, Y. et al. (*2017) Task 54 Info Sheet, Task 54 Info Sheet - LCOH for Solar Thermal Applications. URL: task54.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/A01-Info-Sheet--LCOH-for-Solar-Thermal-Applications.pdf [Zuletzt geprüft: 05.12.2018].

Mayer, R., Target Costing und Prozesskostenrechnung, In: Horváth, P. (Hrsg.): Target costing - Marktorientierte Zielkosten in der deutschen Praxis, Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993, S. 75-92.

Mengen, A.; Urmersbach, K., Prozesskostenrechnung im Industrieunternehmen, In: Controlling & Management, Nr. 450. Jg., 2006, S. 218-226.

Meyer, J. W., Produktinnovationserfolg und Target Costing,, Gabler Edition Wissenschaft, Wiesbaden, Deutscher Universitätsverlag, 2003.

Mohnkopf, H.; Hartmann, M.; Metze, G.; Schmeisser, W., Innovationserfolgsrechnung,, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2008.

ÖkoTest, Schön warm hier - Thermische Solaranlagen mit Heizungsunterstützung, In: ÖKO-TEST Verlag GmbHHeft 10, 2010.

Olbrich, R.; Battenfeld, D., Komplexität aus Sicht des Marketing und der Kostenrechnung, Berichte aus dem Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre insb. Marketing, For-schungsbericht Nr. 3, 2000.

Olbrich, R.; Battenfeld, D., Variantenvielfalt und Komplexität — kostenorientierte vs. marktorientierte Sicht, In: der markt, Nr. 3-444. Jg., 2005, S. 161-173.

Posluschny, P., Kostenrechnen leicht gemacht - Eine praktische Anleitung - von der Deckungsbeitrags- bis zur Prozesskostenrechnung,, 1. Aufl., München, Redline, 2009.

Reich, G.; Reppich, M., Regenerative Energietechnik - Überblick über ausgewählte Technologien zur nachhaltigen Energieversorgung,, 2. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2018.

Schawel, C.; Billing, F., Zielkostenmanagement/Target Costing, In: Schawel, C.; Billing, F. (Hrsg.): Top 100 Management Tools, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 377-379.

Schuh, G., Lean Innovation,, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2013.

Schuh, G.; Bender, D., Grundlagen des Innovationsmanagements, In: Schuh, G. (Hrsg.): Innovationsmanagement - Handbuch Produktion und Management 3, 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl.; Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, S. 1-16.

Schuh, G.; Lenders, M.; Nussbaum, C., Maximaler Wirkungsgrad von Produktkomplexität, In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 5105. Jg., 2010, S. 473-477.

Schuh, G.; Riesener, M., Produktkomplexität managen - Strategien - Methoden - Tools,, 3., vollständig überarbeitete Auflage, München, Hanser, 2017.

Sonne Wind und Wärme, Marktübersicht Flachkollektoren, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 10, Bielefeld, 2013.

Sonne Wind und Wärme, Marktübersicht Frischwasserstationen, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 10, Bielefeld, 2014.

Sonne Wind und Wärme, Marktübersicht Wärmespeicher, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 12, Bielefeld, 2014.

Sonne Wind und Wärme, Marktübersicht Solarstationen, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 05, Bielefeld, 2015.

Sonne Wind und Wärme, Marktübersicht Solarregler, BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 03, Bielefeld, 2016.

Stiftung Warentest, Sonne statt Öl und Gas - Vergleichstest von 13 Kombi-SolaranlagenHeft 2, 2009.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI-Richtlinie 2067-1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Grundlagen und Kostenberechnung, Berlin, 2012.

Verein Deutscher Ingenieure e.V.VDI 2803 2019

Viessmann Werke GmbH & Co. KG, Planungshandbuch Solarthermie,, Allendorf (Eder), 2008.

Wesselak, V.; Schabbach, Thomas, Link, Thomas; *Fischer, J.*, Handbuch Regenerative Energietechnik,, 3. Auflage, Berlin, Springer Vieweg, 2017.

Wiest, R., Der Wertanalyse-ArbeitsplanWertanalyse - das Tool im Value Management, 6., neu bearb. und erw. Aufl., [korrigierter Nachdr.]; Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 39-52.

Anhang

A Funktionsstruktur einer solarthermischen Kombianlage

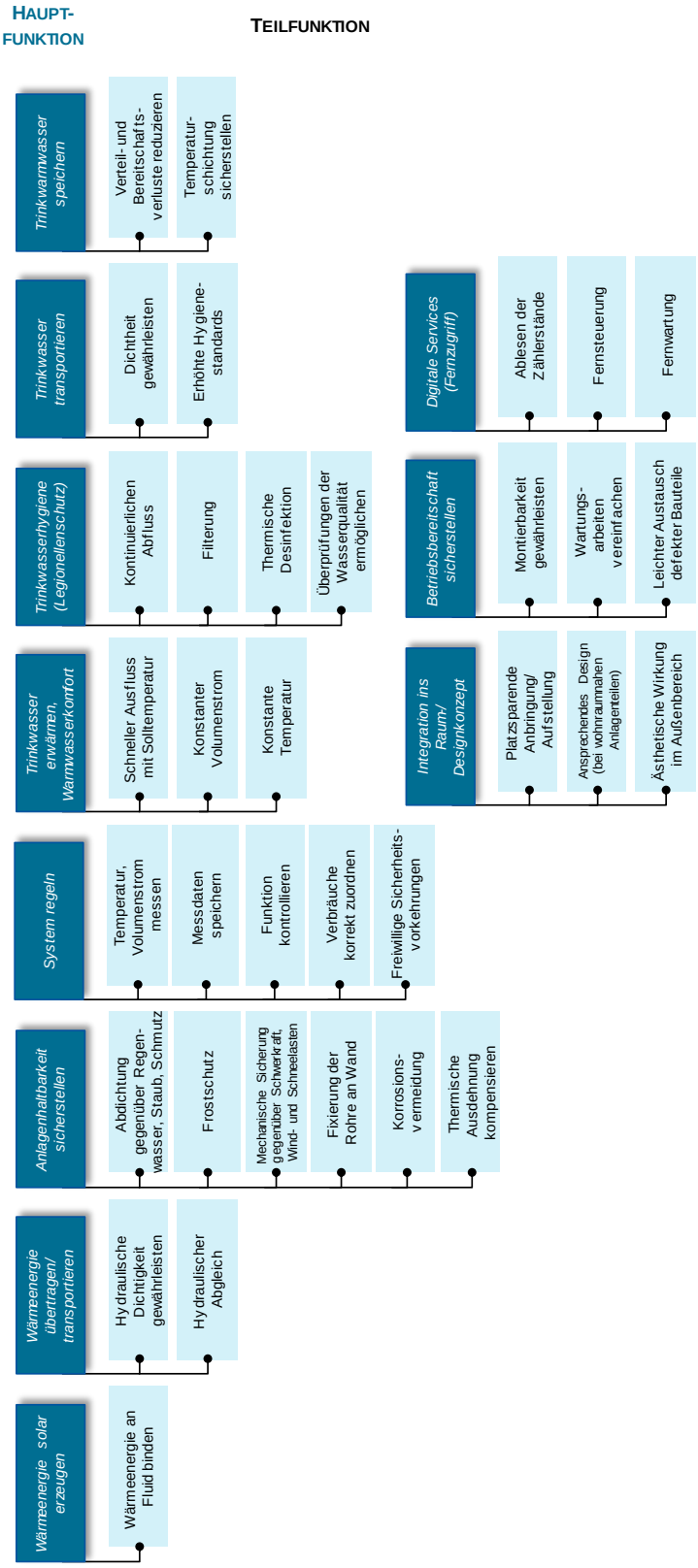


Abbildung A.1: Funktionsstruktur einer solarthermischen Kombianlage

B Produktstruktur einer solarthermischen Kombianlage für Wohnungsübergabestation

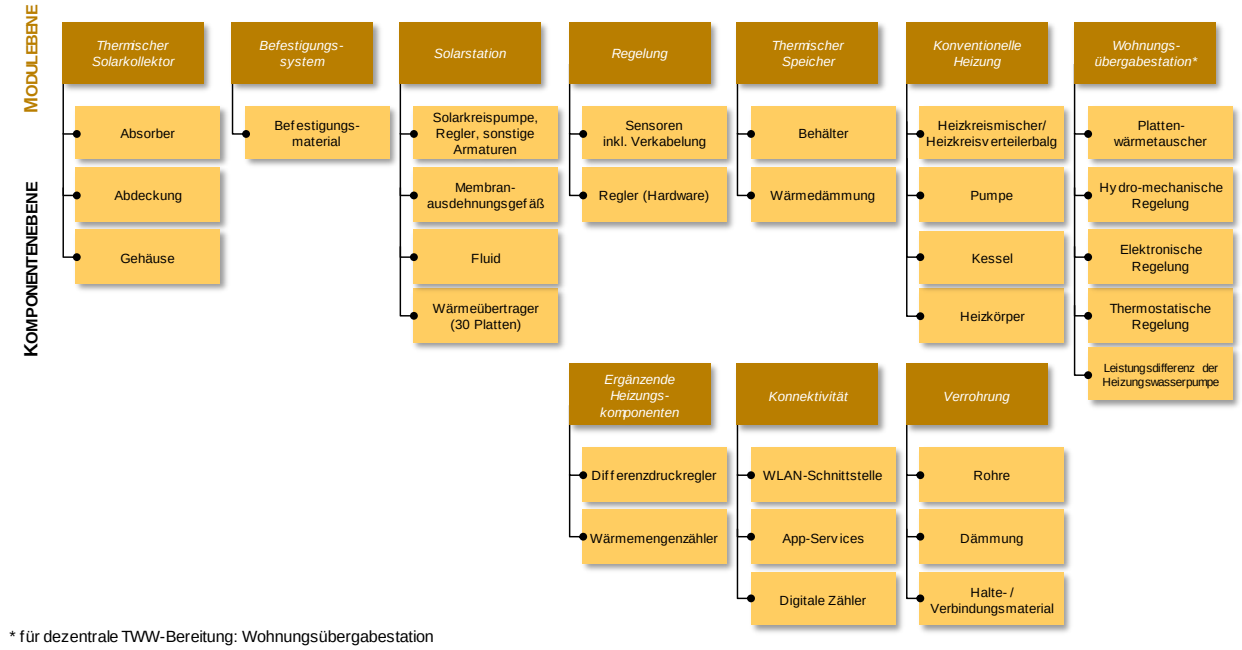


Abbildung B.1: Produktstruktur einer solarthermischen Kombianlage für Wohnungsübergabestation

C Produktstruktur einer solarthermischen Kombianlage für Frischwasserstation

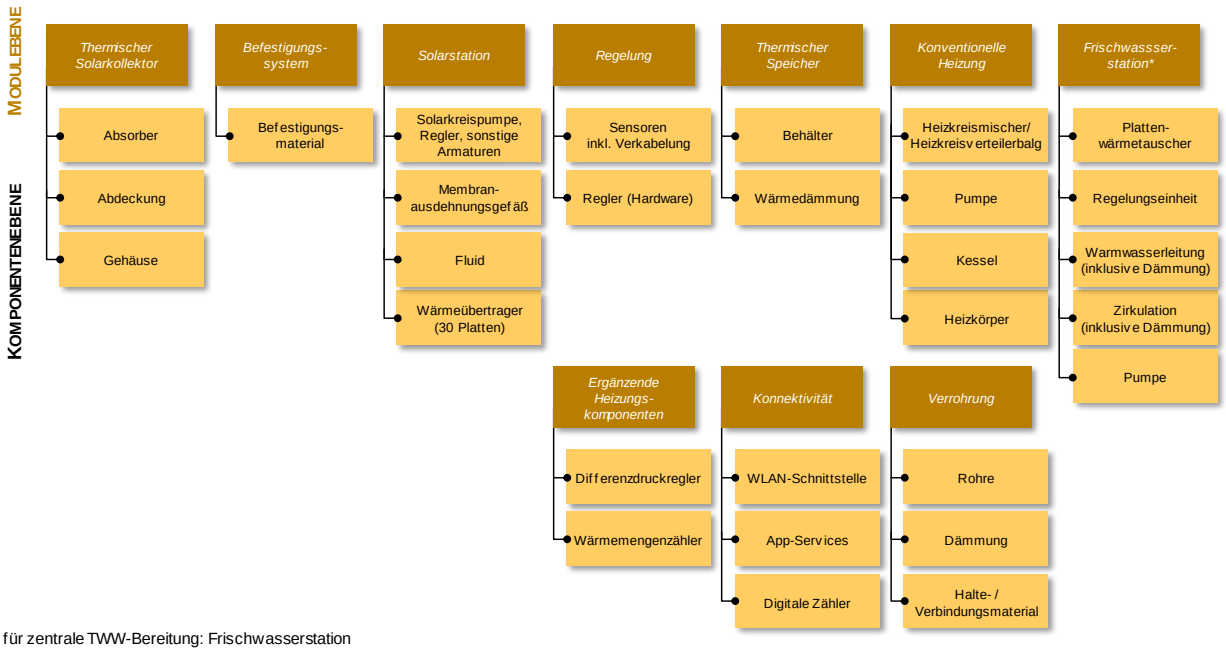


Abbildung C. 1: Produktstruktur einer solarthermischen Kombianlage für Frischwasserstation

D Produktstruktur einer solarthermischen Kombianlage für Erwärmung im Trinkwasserspeicher

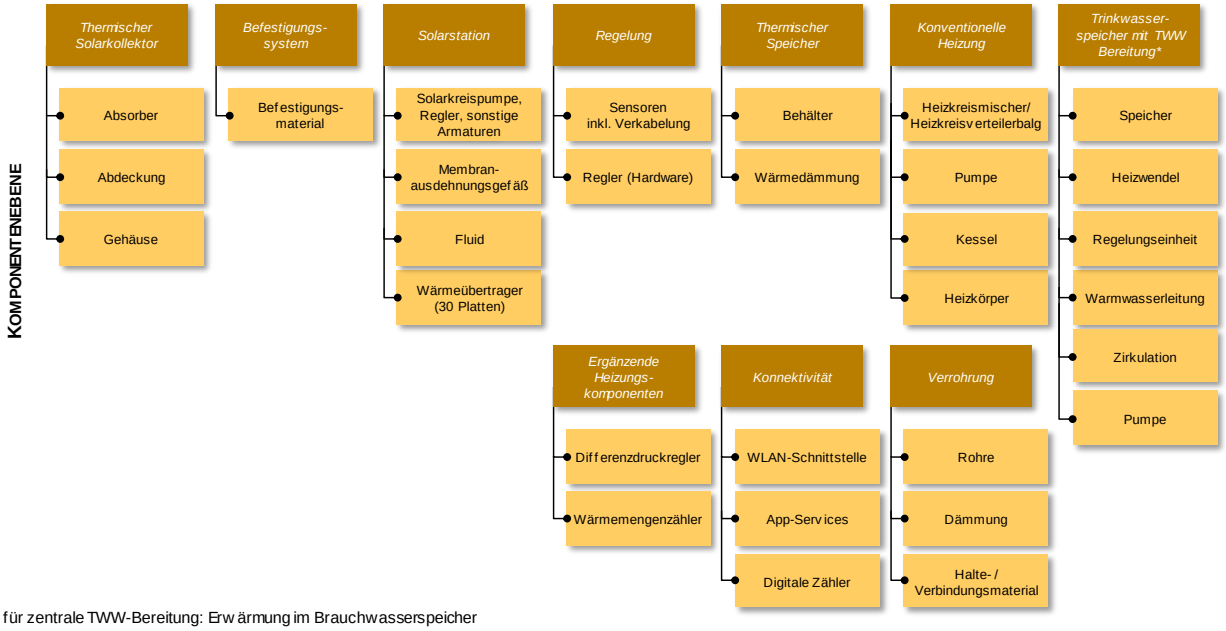
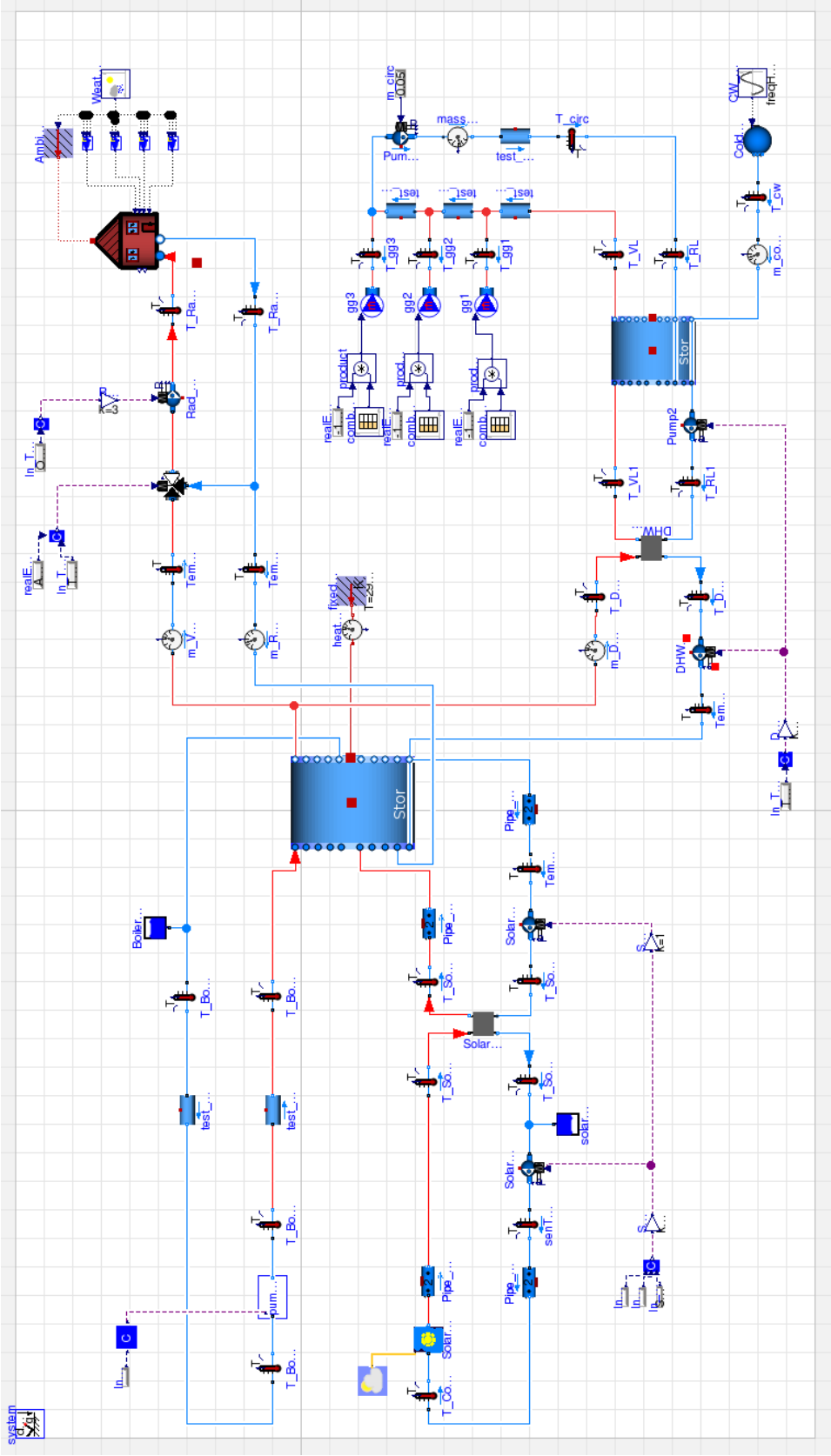
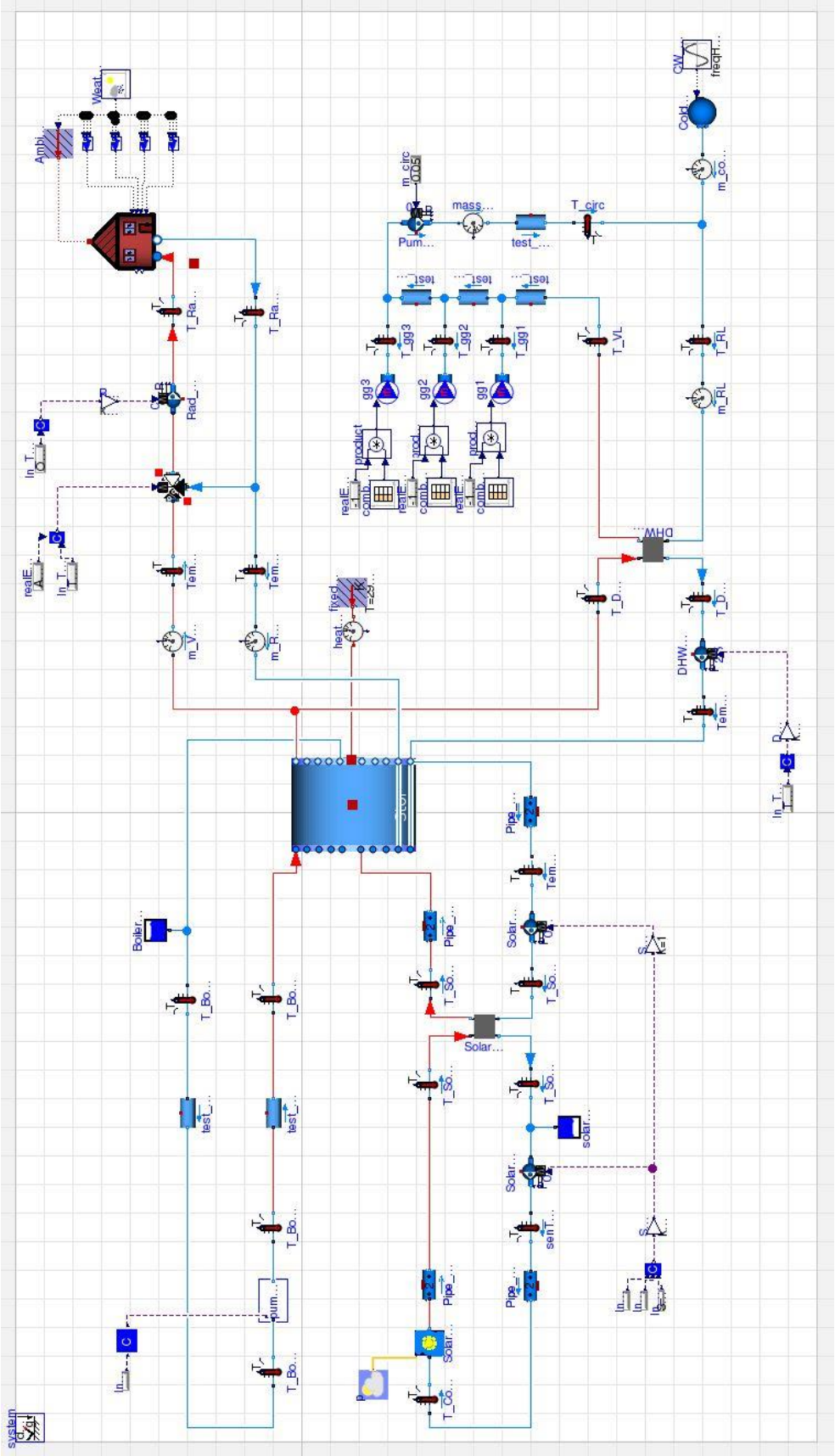


Abbildung D 1: Produktstruktur einer solarthermischen Kombianlage für Erwärmung im Trinkwasserspeicher

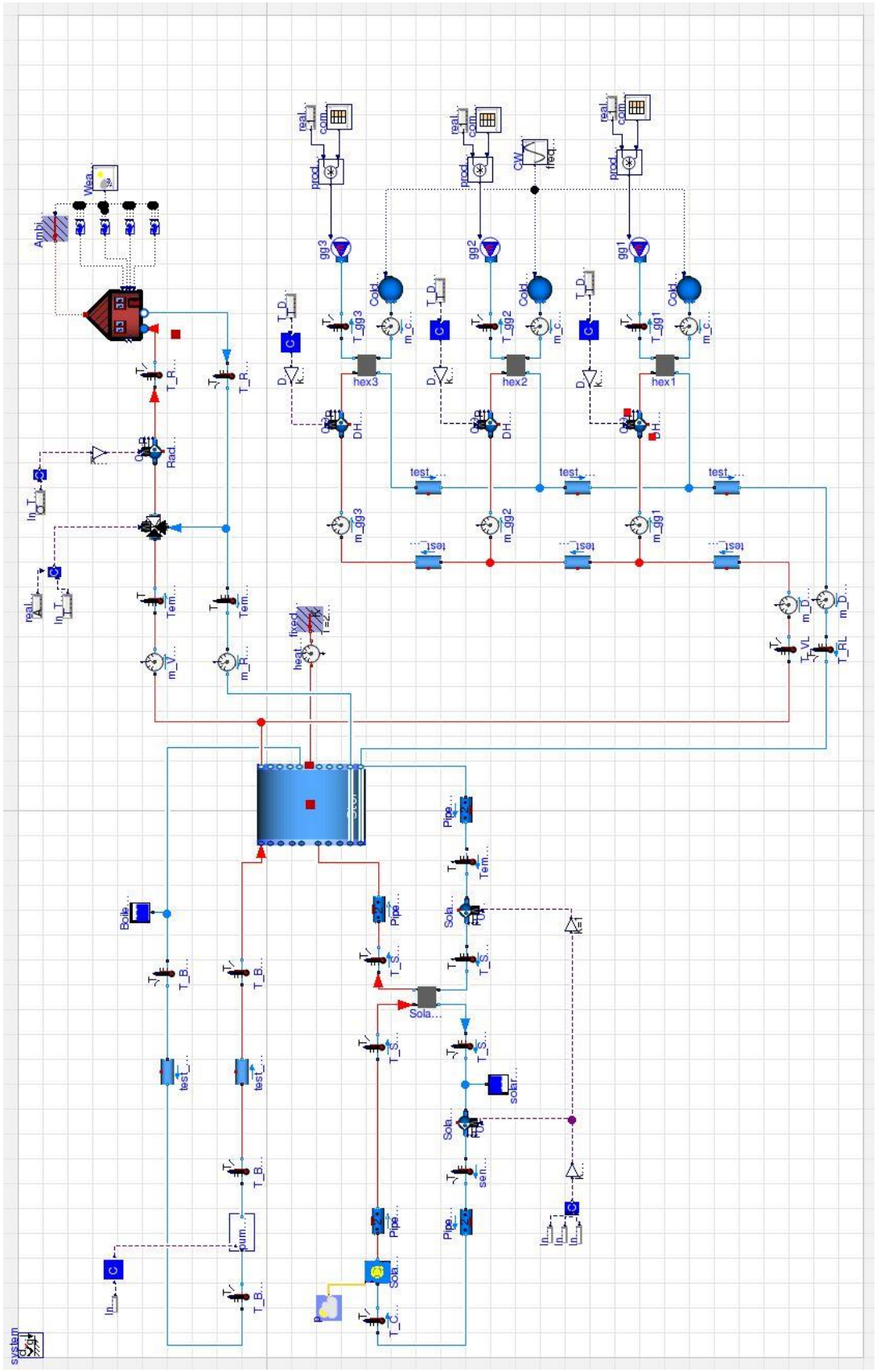
E Dymola Gesamtmodell Zentrale TWW-Bereitung um Speicherladeprinzip (mit TWW-Speicher)



F Dymola Gesamtmodell zentrale TWW-Bereitung im Durchflussprinzip (mittels Frischwasserstation)



G Dymola Gesamtmodell dezentrale TWW-Bereitung im Durchflussprinzip (mittels Wohnungsübergabestationen)



H IEA SHC Task 54 Veröffentlichungen

I. Webinars

IEA SHC Webinar: Cost reduction potential above 30 % - Full Video
March 2018 - Posted: 2018-07-09
By: S. Fischer, M. Köhl, Y. Louvet, M. Meir, A. Oliva, S. Saile, B. Schiebler, F. Veynandt

Having the image of being too expensive to buy, too complex to install, too costly to maintain, solar thermal often loses the race against other offerings in today's heating sector. How this trend can be reversed is one of the key questions of the SHC's Task 54 "Price reduction of solar thermal systems". This webinar will give information on the solar thermal value chain and highlight parts with the highest cost reduction potential.

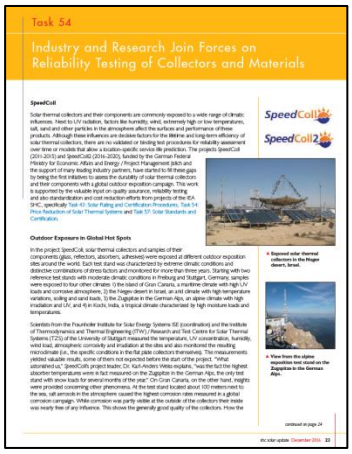
II. General Task Publications

IEA SHC Webinar: Cost reduction potential above 30 %
April 2018 - Posted: 2018-04-09
By: Riccardo Battisti
Publisher: Solarthermalworld.org

The key takeaway from an IEA SHC Solar Academy webinar held on 14 March 2018: There is still much room for cost cuts along the entire solar thermal value chain. The webinar was organised jointly by the IEA Solar Heating & Cooling Programme's Task 54 and the International Solar Energy Society. The online seminar, titled Price Reduction of Solar Thermal Systems, was moderated by Sandrin Saile, Project Manager at Fraunhofer ISE, based in Germany. Its aim was to present the various ways in which the cost of solar thermal plants could be lowered to stop the bleeding on the market and give the technology a competitive edge over other thermal energy sources, such as biomass and heat pumps.

IEA SHC Task 54: Solar Thermal Cost Reductions
November 2017 - Posted: 2017-11-29
By: Eva Augsten
Publisher: Solarthermalworld.org

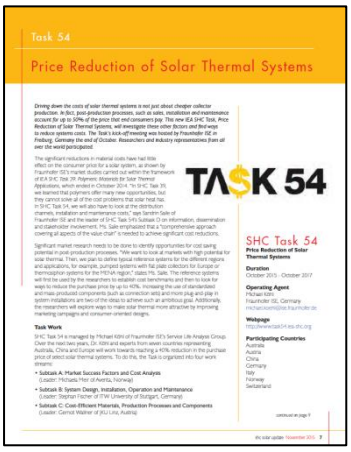
The objective of IEA SHC Task 54 is to reduce the purchase price of solar thermal systems by up to 40% across the entire value chain. To achieve this, the project partners have been evaluating technical and non-technical cost-saving potential, with low-cost materials, such as polymers, and production technologies bound to play an important role. At an early October workshop in Linz, Austria, about 50 project partners and guests discussed cost reductions made possible by new distribution channels, digital solutions and systems thinking approaches.



Industry and Research Join Forces on Reliability Testing of Collectors and Materials

December 2016 - PDF 0.13MB - Posted: 2016-12-08
Editor: Pamela Murphy
Publisher: IEA SHC

Solar thermal collectors and their components are commonly exposed to a wide range of climatic influences. Next to UV radiation, factors like humidity, wind, extremely high or low temperatures, salt, sand and other particles in the atmosphere affect the surfaces and performance of these products. Although these influences are decisive factors for the lifetime and long-term efficiency of solar thermal collectors, there are no validated or binding test procedures for reliability assessment over time or models that allow a location-specific service life prediction.



Task 54: Price Reduction of Solar Thermal Systems

November 2015 - PDF 0.11MB - Posted: 2015-11-17
By: Michael Köhl, ISE Fraunhofer
Publisher: IEA SHC

Driving down the costs of solar thermal systems is not just about cheaper collector production. In fact, post-production processes, such as sales, installation and maintenance account for up to 50% of the price that end consumers pay. This new IEA SHC Task, Price Reduction of Solar Thermal Systems, will investigate these other factors and find ways to reduce systems costs. The Task's kick-off meeting was hosted by Fraunhofer ISE in Freiburg, Germany the end of October. Researchers and industry representatives from all over the world participated.

IEA SHC Task 54 Investigating Cost Factors Along the Value Chain

May 2017- Posted: 2017-07-14
By: Baerbel Epp
Publisher: Solarthermalworld.org

Researchers have worked intensively for one-and-a-half years across national borders to find ways of reducing the costs of solar thermal systems and making them more attractive to end users. The members of Task 54 of the IEA Solar Heating and Cooling Programme, Price Reduction of Solar Thermal Systems, have discussed the effects of standardised product designs or changes in product offerings on cost structures. They have also analysed the entire value chain from component manufacture to system assembly and installation to help identify cost-cutting potential. This is the first time that methods of Process Cost Analysis are being adapted for the solar thermal business.

III. Highlights

Task 54 Highlights 2015

April 2016 - PDF 0.72MB - Posted: 2016-04-08

One of the greatest challenges of the 21st century is to secure a sustainable energy supply and to considerably reduce CO2 emissions and the potential serious consequences of climate change. The challenging goals with regard to the contributions of renewable energy cannot be obtained without considerable growth of the solar thermal markets worldwide. Therefore, cost-competitive, efficient and reliable solar thermal systems are required. The first of these attributes is particularly hard to achieve as the prices for the production of solar thermal systems are still far from being equalled by the prices end-users have to pay. A great number of complex, costly and oftentimes non-transparent work steps are needed in order to bring solar thermal from the factory to the actual users. Task 54 is looking for ways to optimize each of these steps and is also looking into the social political contexts in which solar thermal installations are embedded. The ultimate goal is to strengthen the solar thermal industry by finding solutions for the cost-efficient production and installation of solar thermal systems and their marketing at a competitive price.

Task 54 Highlights 2016

April 2017 - PDF 0.73MB - Posted: 2017-04-17

SHC Task 54 aims to reduce the purchase price for end-users of installed solar thermal systems by evaluating and developing sustainable means to reduce the production and/or installation costs of materials, sub-components and system components. Special emphasis is being placed on the identification and reduction of post-production cost drivers (e.g., channels of distribution). An extensive market research, the definition of reference systems, cost analyses and the study of socio-political boundary conditions for solar thermal prices in selected regions will provide the basis for the evaluation of cost structures and cost reduction potential. Additionally, ways to make solar thermal more attractive by improving marketing and consumer-oriented designs are being explored.

Task 54 Highlights 2017

February 2018 - PDF 0.42MB - Posted: 2018-02-12

One of the greatest challenges of the 21st century is to secure a sustainable energy supply and to considerably reduce CO2 emissions and the serious consequence of climate change. The challenging goals with regard to the contributions of renewable energy cannot be reached without considerable growth of solar thermal markets worldwide. Therefore, cost-competitive, efficient and reliable solar thermal systems are required. Cost-competitiveness is particularly hard to achieve as the price of solar thermal systems is still not equaled by the price end-users have to pay for conventional heat supply.

Task 54 Highlights 2018

February 2019 - PDF 0.22MB - Posted: 2019-02-05

One of the greatest challenges of the 21st century is to secure a sustainable energy supply and to considerably reduce CO_2 emissions and the serious consequence of climate change. The challenging goals with regard to the contributions of renewable energy cannot be reached without considerable growth of solar thermal markets worldwide. Therefore, cost-competitive, efficient and reliable solar thermal systems are required. Cost-competitiveness is particularly hard to achieve as the price of solar thermal systems is still not equaled by the price end-users have to pay for conventional heat supply. A great number of complex, costly and oftentimes non-transparent steps are needed to bring solar thermal from the factory to the actual users. SHC Task 54 is looking for ways to optimize each of these steps as well as looking into the social-political context in which solar thermal installations are embedded. The ultimate goal is to strengthen the solar thermal industry by finding solutions for more cost-efficient production and installation of solar thermal systems and for marketing them at an even more competitive price.

IV.Other

Es werden insgesamt 28 Info Sheets zu den vier Subtasks erstellt und publiziert. Eine Auflistung der Publikationen enthält Tabelle E. 1..

Tabelle E. 1: Info Sheets des Task 54

Nr.	Titel	Zu finden unter:
Subtask A: Market success factors and cost analysis		
A01	*LCoH* for Solar Thermal Applications - Guideline for levelized cost of heat (LCOH) calculations for solar thermal applications	**INFO Sheet A01: LCOH for Solar Thermal Applications - Guideline for levelized cost of heat (LCOH) calculations for solar thermal applications**
A02	Reference System, Austria Conventional heating system for single-family house	**INFO Sheet A02: Reference System, Austria Conventional heating system for single-family house**
A03	Reference System, Austria Conventional heating system for multi-family house	**INFO Sheet A03: Reference System, Austria Conventional heating system for multi-family house**
A04	Reference System, Austria Solar domestic hot water system for single-family house	**INFO Sheet A04: Reference System, Austria Solar domestic hot water system for single-family house**
A05	Reference System, Austria Solar Combisystem for single-family house	**INFO Sheet A05: Reference System, Austria Solar Combisystem for single-family house**
A06	Reference System, Austria Solar domestic hot water system for multi-family house	**INFO Sheet A06: Reference System, Austria Solar domestic hot water system for multi-family house**
A07	Reference System, Germany Conventional heating system for single-family house	**INFO Sheet A07: Reference System, Germany Conventional heating system for single-family house**
A08	Reference System, Germany Solar domestic hot water system for single family house	**INFO Sheet A08: Reference System, Germany Solar domestic hot water system for single family house**

A09	Reference System, Germany Solar Combisystem for single-family house	**INFO Sheet A09: Reference System, Germany Solar Combisystem for single-family house**
A10	Reference System, Germany Solar Combisystem for Multi-Family House - NEW	**INFO Sheet A10: Reference System, Germany Solar Combisystem for Multi-Family House - NEW**
A11	Reference System, Switzerland Solar domestic hot water system for multi-family house	**INFO Sheet A11: Reference System, Switzerland Solar domestic hot water system for multi-family house**
A12	Reference System, Denmark Solar domestic hot water system for single-family house	**INFO Sheet A12: Reference System, Denmark Solar domestic hot water system for single-family house**
A13	*LCoH* calculation method: comparison between Task 54 and Solar Heat WorldWide	**INFO Sheet A13: LCoH calculation method: comparison between Task 54 and Solar Heat WorldWide**
A14	Heat Changers	**INFO Sheet A14: Heat Changers**
A15	Reference multi-family solar domestic hot water system. France - NEW	**INFO Sheet A15: Reference multi-family solar domestic hot water system. France - NEW**
A16	Reference System, France Drain-back multi-family solar domestic hot water system - NEW	**INFO Sheet A16: Reference System, France Drain-back multi-family solar domestic hot water system - NEW**
A17	Reference single family solar domestic hot water system for France	**INFO Sheet A17: Reference single family solar domestic hot water system for France - NEW**
Subtask B: System design, installation, operation and maintenance		
B01	Optimized Systems, Denmark - SDHW System with Heat Storage and Polymer Inlet Stratifier	**INFO Sheet B01: Optimized Systems, Denmark - SDHW System with Heat Storage and Polymer Inlet Stratifier**
B02	Effects of Technological Measures on Costs	**INFO Sheet B02: Effects of Technological Measures on Costs**
B03	Reduction of Maintenance Costs by Preventing Overheating	**INFO Sheet B03: Reduction of Maintenance Costs by Preventing Overheating**
B04	Manufacturing Costs – NEW *Cost reduction during production by product standardisation and reduction of product variety in China*	**INFO Sheet B04: Manufacturing Costs - NEW**
B05	Levelized Cost of Heat for Solar Thermal Systems with Overheating Prevention	**INFO Sheet B05: Levelized Cost of Heat for Solar Thermal Systems with Overheating Prevention**
Subtask C: Cost-efficient materials, production processes and components		
C01	Cost Drivers and Saving Potentials (1): Material substitution	**INFO Sheet C01: Cost Drivers and Saving Potentials (1): Material substitution**
C02	Cost Drivers and Saving Potentials (2): Production, installation, design	**INFO Sheet C02: Cost Drivers and Saving Potentials (2): Production, installation, design**
C03	One-World-Solar-System	**INFO Sheet C03: One-World-Solar-System**
Subtask D: Information, dissemination and stakeholder involvement		
D01	Review of Installation Costs	**INFO Sheet D01: Review of Installation Costs**
D02	Obstacles in Installation and Recommendations	**INFO Sheet D02: Obstacles in Installation and Recommendations**
D04	End-Users Decision Making Factors for H&C Systems	**INFO Sheet D04: End-Users Decision Making Factors for H&C Systems**

Des Weiteren sind in den Jahren 2016 bis 2018 jährlich Newsletter mit den neuesten Erkenntnissen im Task 54 erschienen.

IEA SHC Task 54 Newsletter 2016

IEA SHC Task 54 Newsletter 2017

IEA SHC Task 54 Newsletter 2018

Weitere Veröffentlichungen, wie Fachartikel, Präsentationen und ein Excel-Tool zur Berechnung der Wärmegestehungskosten, sind unter http://task54.iea-shc.org/publications zu finden.

I Fragebogen zum paarweisen Vergleich

Fraunhofer ISE

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Fragebogennr.: _____

Projekt TEWISol –
Technisch-wirtschaftliche Optimierung von solarthermischen Kombianlagen

Fragebogen zur Einschätzung der Wichtigkeit der Eigenschaften eines solarthermischen Kombisystems

Informationen zum Fragebogen

Der vorliegende Fragebogen wurde am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE erstellt. Er ist Teil der Forschungsprojekts „TeWiSol – Technisch-wirtschaftliche Optimierung von solarthermischen Kombianlagen", welches in Kooperation mit dem Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen sowie der Meibes System-Technik GmbH und der SWB Sonnen- und Windenergieanlagenbau GmbH durchgeführt wird.

Ziel des Projekts ist es den Nutzenanteil der Systemfunktionen mit ihrem Anteil an den Kosten für die Herstellung und Installation des Solarthermischen Kombisystems zu vergleichen. Dadurch sollen Einsparpotentiale ermittelt werden.

Die Projektpartner möchten mit Ihrer Hilfe in Erfahrung bringen, welche Funktionen eines Solarthermischen Kombisystems zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung Ihnen als Anwender am wichtigsten erscheinen. Treffen Sie Ihre Urteile lieber spontan als sich lange mit einzelnen Fragen aufzuhalten. Dann nimmt das Ausfüllen des Fragebogens nicht mehr als 15 Minuten Ihrer Zeit in Anspruch. Damit Ihre Antwort verwertbar ist, muss im Fragenteil in jeder Zeile ein Kreuz gesetzt werden. Ihre Angaben werden selbstverständlich absolut anonym behandelt.

Bei Rückfragen stehen Axel Oliva (axel.oliva@ise.fraunhofer.de) und Julia Schneweis (julia.schneweis@ise.fraunhofer.de) zur Verfügung. Weitere Informationen zum Projekt finden Sie unter: www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/tewisol.html

Ihre Funktion

Sie sind:

(1) Hersteller *	(3) Handwerker *	(4) Kunde *
☐	☐	☐

*** Bitte spezifizieren Sie Ihre Funktion:**

Auswahl Hersteller:		Auswahl Handwerker:		Auswahl Kunden:	
Hersteller Solarkollektoren und Systemanbieter	☐	Hydrauliker	☐	(Kommunales) Wohnungsunternehmen	☐
Hersteller konventioneller Wärmeerzeuger	☐	Elektriker	☐	Bauträger	☐
Hersteller Rohre, Fittinge, Armaturen	☐			Privatkunde	☐
Hersteller Regelung / Elektrik	☐				

☐ Sonstiges: _____

Seite 1 von 3

Bitte geben Sie uns in Ihrer oben genannten Funktion eine Einschätzung der Wichtigkeit der genannten Eigenschaften eines Solarthermischen Kombisystems.
Die Bewertungsskala reicht von **(1) = unwichtig** bis **(6) = sehr wichtig**

	Unwichtig					Sehr wichtig
Wärmeenergie solar erzeugen	(1) ☐	(2) ☐	(3) ☐	(4) ☐	(5) ☐	(6) ☐
Wärmeenergie übertragen / transportieren	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hydraulische Dichtigkeit gewährleisten	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Hydraulischer Abgleich	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wärmeenergie speichern	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Wärmeverluste reduzieren	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Temperaturschichtung sicherstellen	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Anlagenhaltbarkeit sicherstellen	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Abdichtung gegenüber Regenwasser, Staub, Schmutz	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Frostschutz	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Mechanische Sicherung gegenüber Schwerkraft, Wind- und Schneelasten	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fixierung der Rohre an der Wand	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Korrosionsvermeidung	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Thermische Ausdehnung kompensieren	☐	☐	☐	☐	☐	☐
System regeln	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Temperatur, Volumenstrom messen	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Messdaten speichern	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Funktion kontrollieren	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Verbräuche korrekt zuordnen	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Freiwillige Sicherheitsvorkehrungen (über gesetzliche Vorschriften hinaus)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Trinkwasser erwärmen, Warmwasserkomfort	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Schneller Ausfluss mit Solltemperatur	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Konstanter Volumenstrom	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Konstante Temperatur	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	Unwichtig					Sehr wichtig
Trinkwasserhygiene (Legionellenschutz)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Legionellenprävention durch 1. Kontinuierlichen Abfluss	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Legionellenprävention durch 2. Filterung	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Legionellenprävention durch 3. Thermische Desinfektion	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Überprüfungen der Wasserqualität ermöglichen (Probeentnahmestellen)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Trinkwasser transportieren	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Dichtheit gewährleisten	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Erhöhte Hygienestandards (über gesetzliche Vorgaben hinaus)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Trinkwarmwasser speichern	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Verteil- und Bereitschaftsverluste reduzieren	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Temperaturschichtung sicherstellen	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Integration ins Raum-/ Designkonzept	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Platzsparende Anbringung / Aufstellung	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ansprechendes Design (bei wohnraumnahmen Anlagenteilen)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ästhetische Wirkung im Außenbereich	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Betriebsbereitschaft sicherstellen	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Montierbarkeit gewährleisten	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wartungsarbeiten vereinfachen	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Leichter Austausch defekter Bauteile	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Digitale Services (Fernzugriff)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Ablesen der Zählerstände	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fernsteuerung	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fernwartung	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Möchten Sie uns etwas mitteilen?

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Seite 3 von 3

J Praxisleitfaden

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE
WERKZEUGMASCHINENLABOR WZL DER RWTH AACHEN

Praxisleitfaden zur ganzheitlichen Optimierung von heizungstechnischen Anlagen

Im Rahmen des Projektes

TEWISol

Technisch-wirtschaftliche Optimierung von solarthermischen Kombianlagen

TEWISol

Technisch-wirtschaftliche Optimierung von solarthermischen Kombianlagen
-Gesamtvorhaben-

Akronym: TEWISol

An den Projektträger Jülich
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
BMWi / PTJ Aktenzeichen FKZ: 0325855A

Projektlaufzeit:
01.01.2016 – 30.06.2019

Projektpartner:
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Koordination Verbundprojekt)
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Koordinator und Ansprechpartner:
Dipl.-Ing. Axel Oliva
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2
D-79110 Freiburg
Tel: +49 (0)761-4588-5698
E-Mail: axel.oliva@ise.fraunhofer.de

Bearbeitung
Axel Oliva | Fraunhofer ISE (Projektleitung ISE)
Julia Schneeweis | Fraunhofer ISE
Wolfgang Kramer | Fraunhofer ISE
Christian Tönnes | Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Christian Dölle | Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Günther Schuh | Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Freiburg, den 19. Dezember 2019

stellvertretend für die Projektpartner

Axel Oliva
Koordination Verbundprojekt

Danksagung

Das Forschungsprojekt *TEWISol* wurde durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 0325855A betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wofür wir uns herzlich bedanken.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Danksagung **3**

Ansprechpartner **5**

Abkürzungsverzeichnis **6**

1 Einleitung **7**

2 Aufbau des Leitfadens **9**

3 Charakterisierung von Solarthermieanlagen **11**

4 Grundlagen **13**
4.1 Funktionskostenanalyse 13
4.2 Prozesskostenanalyse 14
4.3 Energetische Analyse 16
4.4 Wirtschaftliche Analyse 17

5 Der *TEWISol* Optimierungskreislauf **20**
5.1 Modul 1 - Funktionskostenanalyse 20
5.2 Modul 2 - Prozesskostenanalyse 23
5.3 Modul 3 - Energetische Analyse 26
5.4 Modul 4 – Wirtschaftliche Bewertung 28

6 Ergebnisse der Fallstudien **33**
6.1 Funktionskostenanalyse 33
6.2 Komplexitätskostenanalyse 35
6.3 Energetische Analyse 37
6.4 Wirtschaftliche Analyse 39
6.5 Zusammenfassung der Gesamtbetrachtung 40

7 Zusammenfassung und Ausblick **41**

Literaturverzeichnis **43**

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Axel Oliva

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2
D-79110 Freiburg
Tel.: +49 (0)761 / 4588-5698
E-Mail: axel.oliva@ise.fraunhofer.de

Christian Tönnes M.Sc. RWTH

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Lehrstuhl für Produktionssystematik
Cluster Produktionstechnik
Campus-Boulevard 30
D-52074 Aachen
Tel.: +49 (0)241 / 80-20617
E-Mail: c.toennes@wzl.rwth-aachen.de

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
dDF	Dezentrales System zur Erzeugung von TWW im Durchflussprinzip mittels einer Wohnungsübergabestation
IEA	Internationale Energieagentur
IEA SHC	IEA Solar Heating and Cooling Programme
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
ITW	Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
EnEV	Energieeinsparverordnung
ESTIF	European Solar Thermal Industry Federation
FTE	Full Time Equivalent - Vollzeitäquivalent (Ein FTE entspricht der Arbeitszeit eines Vollzeitangestellten)
LCoH	Levelized Cost of Heat (Wärmegestehungskosten)
LCoHC	Energiegestehungskosten für Heizung und Kühlung
MFH	Mehrfamlienhäuser
PI	Parameteridentifikation
PM-Regler	Proportionalmengenregler
PU	Polyurethan
TEWISol	Technisch-wirtschaftliche Optimierung von solarthermischen Kombianlagen, Akronym
TWW	Trinkwarmwasser
VBA	Visual Basic for Applications
WT	Wärmetauscher
WÜS	Wohnungsübergabestation
WÜT	Wärmeübertrager
WZL	Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen
zDF	Zentrales System zur Erzeugung von TWW im Durchflussprinzip mittels einer Frischwasserstation
zSL	Zentrales System zur Erzeugung von TWW im Durchflussprinzip mittels eines Speicherladesystems

1 Einleitung

Studien des Fraunhofer ISE haben weiterhin gezeigt, dass heute trotz einer sehr großen System- und Preisvielfalt beispielsweise bei solarthermischen Kombisystemen relativ geringe Unterschiede im Ertrag des solarthermischen Wärmeerzeugers existieren. Komplexitätsreduzierung von Produkt und Portfolio beinhalten folglich ein Kostensenkungspotenzial ohne wesentliche Ertragseinbußen. Mit dem im Folgenden aufgezeigten Vorgehen wird damit eine integrale Produktkostenoptimierung im Bereich der Heizungstechnologie aufgezeigt.

Es wird hierbei die Zielstellung verfolgt, mittels einer branchenweiten gemeinsamen Aktivität von Industrie, Handwerk und Forschung eine beispielhafte Kostenreduzierung in der Solarthermie zu erwirken. Letztlich dient die Gesamtmethodik dazu das Verhältnis von Energieertrag pro Kosteneinheit zu verbessern. Eine solche Verbesserung kann entweder durch die Steigerung der Systemeffizienz (auch über den solarthermischen Wärmeerzeugers hinaus) oder eine Kostensenkung für das Gesamtsystem über seine Wertschöpfungskette von der Entwicklung bis zur Installation erzielt werden. Es werden daher alle an dieser Wertschöpfungskette beteiligten Akteure betrachtet.

Der Herangehensweise nutzt sowohl Methoden der betriebswirtschaftlichen als auch der technischen Optimierung. Die Optimierungsmethodik umfasst folgende Teilmethoden:

- Komplexitäts- und Variantenanalyse
- Prozesskostenanalyse
- Wertanalyse
- Simulationsbasierte energetische Analyse
- Systemertragsermittlung

Diese Methoden sind bereits bekannt und wurden auf die branchen- und unternehmensspezifischen Anforderungen angepasst und entsprechend weiterentwickelt. Ein wesentlicher Aspekt war auch die Zusammenführung und Harmonisierung der wirtschaftswissenschaftlichen und der technologischen Herangehensweise im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette von der Produktentwicklung bis zur Installation beim Endkunden. Dadurch entsteht ein neuartiger Methodenansatz zum Erreichen der genannten Zielstellung.

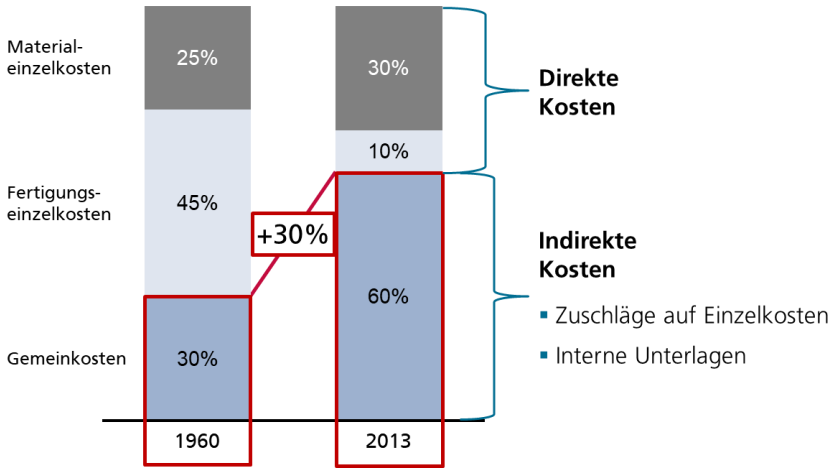


Abbildung 1-1: Exemplarischer Vergleich der direkten und indirekten Kosten von 1960 und heute. Durch höhere Variantenvielfalt und komplexere Produkte ist der Gemeinkostenblock in den letzten 50 Jahren stark gestiegen.

Neben den direkten Kosten werden in dem Vorgehen insbesondere auch die indirekten Kosten adressiert, welche wie in Abbildung 1-1 dargestellt, heute bei vielen Firmen mehr als 50 % der Gesamtkosten ausmachen. Problematisch ist bei dieser Größenordnung die häufig genutzte Methode, gemittelte Kostenaufschläge zur Preisbestimmung heranzuziehen. Die Nutzung eines Prozesskostenmodells erlaubt dabei die Beschreibung der Auswirkung der Komplexität von Produkten und der Vielfalt im Produktportfolio. Dieser Ansatz ermöglicht die verursachungsgerechte Kostenverteilung für jeden Stakeholder - auch über die gesamte Branche hinweg zu ermitteln und schafft dadurch die Gelegenheit, Kostensenkung durch Optimierung von Produkt- und Portfoliooptimierung zu generieren.

Erfolgreiche signifikante Kostensenkungen in der Heizungsbranche gelingen nur bei Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette. Dabei wird nur eine gemeinsame Herangehensweise aller Glieder der Kette (Komponentenlieferant, Systemlieferant, Handel, Handwerk) unterstützt durch neuen Methoden aus der Wissenschaft einen Erfolg bringen.

Abbildung 1-2 verdeutlicht schematisch die gesamte Vorgehensweise zur Zielerreichung. Die Ausgestaltung solarthermischer Kombianlagen kann auf diversen Ebenen beeinflusst werden. Als die drei Hauptebenen wurden das Produktportfolio, die Systemkonzeption und die Konstruktion von Komponenten identifiziert. Als Schlüsselkennzahl für die Bewertung solarthermischer Kombianalagen wurden die Wärmegestehungskosten gewählt. Diese geben an wie hoch die Kosten sind, die die während der Lebensdauer durch die betrachtete Anlage gelieferte Energiemenge erzeugt. Entsprechend bilden die Wärmegestehungskosten das Verhältnis aus Kosten pro Leistung ab. Kostenseitig werden die Methoden der Funktionskostenanalyse und der Prozesskostenanalyse genutzt um die Wärmegestehungskosten zu reduzieren. Leistungsseitig werden eine simulationsbasierte energetische Analyse sowie die Ermittlung des Systemertrages durchgeführt. Alle vorgenommenen Aktivitäten beziehen sich auf die gesamte Wertschöpfungskette.

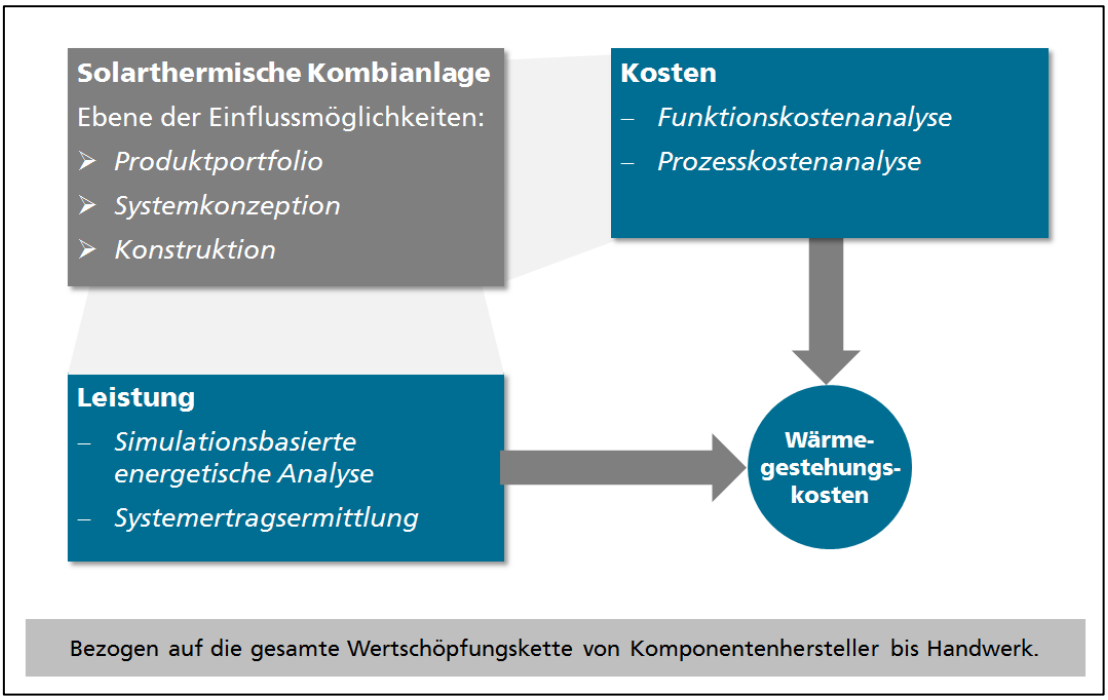


Abbildung 1-2: Methodik zur vollkostenbasierten Betrachtung von Versorgungstechnik

2 Aufbau des Leitfadens

Bevor auf die theoretischen Grundlagen des Leitfadens eingegangen wird, soll zunächst ein Überblick über den Aufbau des Leitfadens geschaffen werden. Dieser ist in folgende Kapitel unterteilt:

In **Kapitel 3** wird eine Charakterisierung von Solarthermieanlagen anhand von Kundenunterscheidungsmerkmalen vorgenommen. Mithilfe des so entwickelten generischen Beschreibungsrahmens kann die Vielfalt der am Markt angebotenen Solarthermieanlagen sämtlicher Hersteller beschrieben, eindeutig charakterisiert sowie unterunterschiedliche Systeme zueinander in Beziehung gesetzt und eingeordnet werden.

In **Kapitel 4** wird ein grundlegendes Verständnis für die relevanten Begrifflichkeiten im Rahmen dieses Leitfadens geschaffen. Es werden die Methoden der Funktions-kostenanalyse sowie der Prozesskostenanalyse eingeführt und die Vorteile, Nachteile sowie die Restriktionen erläutert. Weiterhin werden Grundlagen zur energischen und wirtschaftlichen Bewertung vorgestellt, um in den nachfolgenden Abschnitten diese auf konkrete Anwendungsfälle der Solarthermiebranche anzuwenden.

Ausgehend von dem geschaffenen wissenschaftlichen sowie praktischen Grundla-genwissen werden in **Kapitel 5** der *TEWISol* Optimierungskreislauf, bestehend aus den Modulen der Funktionskostenanalyse und Prozesskostenanalyse, sowie der energetischen und wirtschaftlichen Bewertung, vorgestellt. Die Durchführung der Module werden im Kontext von solarthermischen Kombianlagen beschrieben, um eine Anwenderfreundlichkeit für unternehmensspezifische Implementierung zu garantieren.

Auf Basis der vorangegangenen Erkenntnisse werden in **Kapitel 6** die einzelnen Module des *TEWISol* Optimierungskreislaufs beispielhaft anhand von Fallstudien vorgestellt. Es werden die Ergebnisse der einzelnen Module sowie die Gesamtbetrachtung als ganzheitlicher Ansatz zur Optimierung des Preis-/Leistungsverhältnisses beschrieben.

Abschließend werden in Kapitel 7 die zentralen Ergebnisse der entwickelten Methodik zentral zusammengetragen und ein Ausblick darüber gegeben, wie die entwickelte Methodik im Zeitverlauf weiterhin ergänzt und validiert werden kann.

Die Struktur des Leitfadens wird in Abbildung 2.1 zusammenfassend dargestellt.

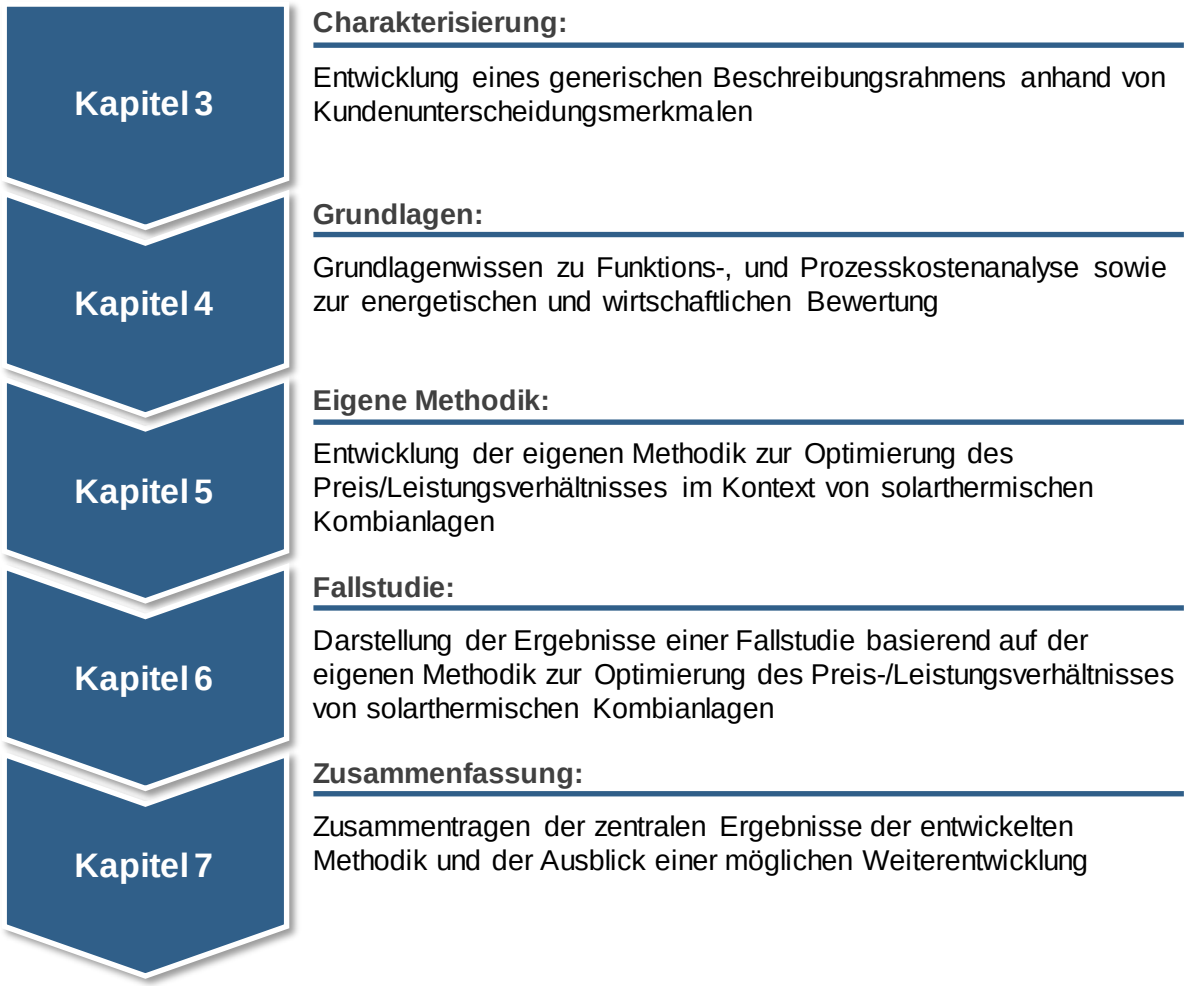


Abbildung 2-1: Aufbau des Leitfadens

3 Charakterisierung von Solarthermieanlagen

Für die Abgrenzung des Betrachtungsbereichs dieses Leitfadens soll zunächst eine Charakterisierung von Solarthermieanlagen vorgenommen werden. Dazu wird eine Beschreibung des derzeitigen Marktes für Anlagen aus der Perspektive von Kunden vorgenommen. Die Vorgehensweise stellt sicher, dass die Marktbeschreibung nicht auf dem Level von detaillierten technischen Lösungen einzelner Anlagenvarianten erfolgt, sondern auf einem allgemeinverständlichen abstrakten Level erfolgt.

Für die Komplexitäts- und Variantenanalyse wurde in diesem Zusammenhang in einem ersten Schritt zunächst die Produktvielfalt aus Marktsicht analysiert. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei solarthermischen Kombianlagen um komplexe, vielteilige Systemlösungen handelt, existieren in der Solarthermiebranche zum aktuellen Zeitpunkt verschiedenste Anbieter mit den unterschiedlichsten Produktlösungen. Auf Basis von ausgewählten Kundenunterscheidungsmerkmalen und deren Ausprägungen wurde systematisch eine Beschreibungs-logik für Solarthermieanlagen entwickelt. Dabei werden die folgenden sieben Merkmale eingesetzt:

- Kollektorart
- Kollektorfläche
- Speichergröße
- Speicherart
- Solarstation
- TWW-Erzeugungsprinzip
- TWW-Layout

Mithilfe des so erarbeiteten generischen Beschreibungsrahmens kann die Vielfalt der am Markt angebotenen Solarthermieanlagen sämtlicher Hersteller beschrieben, eindeutig charakterisiert sowie unterschiedliche Systeme zueinander in Beziehung gesetzt und eingeordnet werden.

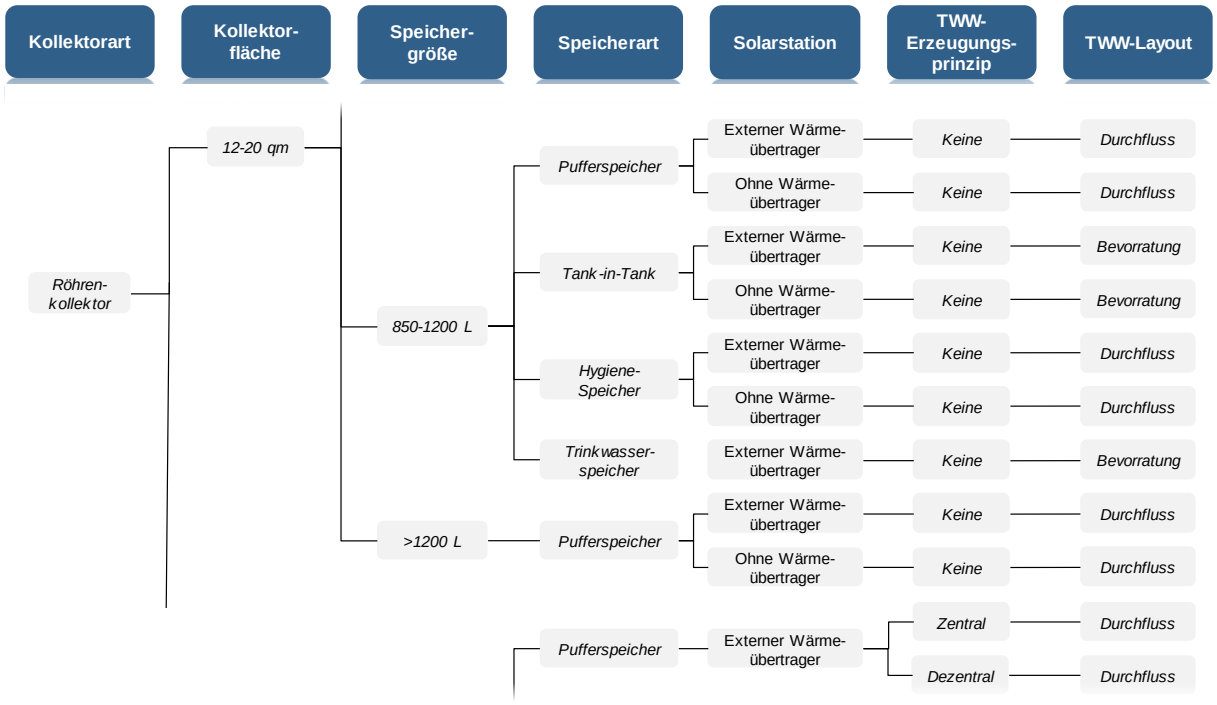


Abbildung 3-1: Ausschnitt der Marktvielfalt für Solarthermieanlagen

Grundlage der Darstellung ist, neben der Definition von Merkmalen und Ausprägungen, die Logik der Konfigurationsmatrix. Diese beschreibt, welche Ausprägungen eines Merkmals mit den Ausprägungen eines anderen Merkmals kombinierbar sind. So werden Solarthermieanlagen mit einem Speicher von 250-350 Litern nicht mit einer Kollektorfläche „>6m²“ am Markt angeboten. Dieser Logik folgend ergibt sich ein sogenannter Merkmalbau. In dieser Darstellung ergibt jeder Ast eine am Markt angebotene Variante für eine solarthermische Kombianlage. In der Gesamtmethodik für die technisch-wirtschaftliche Optimierung von Solarthermieanlagen dient dieser Rahmen als erster Schritt zur Identifizierung der eingesetzten Komponenten von solarthermischen Anlagen des Methodenanwenders der Methodik.

In der Gesamtmethodik für die technisch-wirtschaftliche Optimierung von Solarthermieanlagen dient diese Klassifizierung als erster Schritt zur Identifizierung der eingesetzten Komponenten von solarthermischen Anlagen des Methodenanwenders der Methodik. In Abhängigkeit der technischen Realisierung der Kombianlage tragen verschiedene Ausprägungen dieser Merkmale in unterschiedlichem Anteil zu den Kosten des Gesamtsystems bei. Um dennoch eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen technischen Lösungen zu ermöglichen, werden im Folgenden in der entwickelten Methodik die Kosten der einzelnen Komponenten der identifizierten Merkmale und ihrer Ausprägungen auf die Funktion der Anlage zurückgeführt.

4 Grundlagen

4.1 Funktionskostenanalyse

Der Ausgangspunkt für ein erfolgreiches Bestehen am Markt stellt für Unternehmen die Positionierung von Produkten innerhalb des produktspezifischen Zieldreiecks bestehend aus den Dimensionen Preis, Funktion und Qualität dar. Die Ausprägungsintervalle dieser drei Dimensionen, in welchen das Produkt zu positionieren ist, werden insbesondere durch konkurrenzähnliche Produkte für den gleichen Kundenmarkt eingegrenzt.[1] In der japanischen Industrie der 60iger bis 80iger Jahre wurden dazu sowohl die Grundlagen der Kostenmanagementinstrumente des Zielkostenmanagements (engl.: Target Costing) als auch der Wertanalyse (engl.: Value Engineering) gelegt, welche im Rahmen des Forschungsprojektes weiterentwickelt und auf die Solarthermiebranche adaptiert werden.[2]

Das Zielkostenmanagement ist ein Prozess, der sich laut SCHUH ET AL. aus den drei aufeinanderfolgenden Phasen der Zielkostenermittlung, Zielkostenspaltung sowie der Zielkostenerreichung zusammensetzt und im Folgenden detailliert erläutert wird.[3]

Im Zentrum der Zielkostenermittlung steht die Bestimmung des Einflusses einzelner Produktfunktionen auf den Gesamtnutzen aus Kundensicht.[4] Zur Bestimmung des Kundennutzen sowie der gewünschten Produkteigenschaften und der Zahlungsbereitschaft eignen sich neben Marktumfragen und direkten Kundengesprächen auch die Methode des Conjoint Measurement, bei denen verschiedene Merkmalskombinationen vom Kunden beurteilt werden.[5] Des Weiteren wird in dieser ersten Phase der Absatzmarkt analysiert und Zielkosten mithilfe der Größen Zielpreis, Zielrendite sowie der Overheadkosten als unternehmerische Fixkosten bestimmt.[6]

Für gewöhnlich ist ein Produkt aus mehreren Einzelteilen und Komponenten aufgebaut, auf die es die Zielkosten zu dekomponieren gilt.[7] Die Produktarchitektur kann dabei weiterhin von der Wahl des Produktstrukturtyps nach Baukästen, Modulen, Baureihen und Paketen gegliedert und gestaltet sein.[8] Zur Dekomposition der Zielkosten existieren zwei Methoden, namentlich Komponenten- und Funktionsmethode.[9] Dieses Ziel wird mit der zweiten Phase Zielkostenspaltung verfolgt.[10]

Der dritte und abschließende Schritt, die Zielkostenerreichung, umfasst die Ermittlung von Plankosten, des Zielkostenindex sowie Maßnahmen zur Zielkostenerreichung und die damit verbundene Wertanalyse.[11] Die zentrale Größe der vorangehenden Schritte des Zielkostenmanagements sind die marktseitig bestimmten Zielkosten, welche im vorliegendem Schritt den Plankosten (engl.: Drifting Costs) zum Zweck der Zielkostenkontrolle und der Ermittlung des Kostensenkungspotenzials gegenüberzustellen sind.[12] Die Berechnung des Kostensenkungspotenzials ergibt sich durch die Diffe-

[1] Cooper und Slagmulder (1998), Target costing and value engineering, S. 5f.
[2] Kim und Berry (2014), Target Costing, S. 275f.; Cooper und Slagmulder (1998), Target costing and value engineering, S. 7.
[3] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 138.
[4] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 139.
[5] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 300.
[6] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 139f.
[7] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 306
[8] Schuh und Bender (2012), Grundlagen des Innovationsmanagements, S. 10.
[9] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 306ff.
[10] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 141.
[11] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 143ff.
[12] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 143; Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 309.

renz zwischen den Plankosten[13] als prognostizierte Kosten mit den entsprechenden Zielkostenanteilen der Komponente. Eine weitere Möglichkeit zur Visualisierung des Kostensenkungspotenzials stellt der Zielkostenindex dar. Dieser beschreibt das Verhältnis von Nutzenanteil zu Plankostenanteil einer Komponente.[14] Der Zielkostenindex stellt somit den Kundennutzen ins Verhältnis zum tatsächlichen Ressourcenverbrauch einer Komponente.[15] Im Idealfall beträgt der Zielkostenindex somit für alle Komponenten eins. Ein Wert kleiner als eins suggeriert, dass die Komponente zu kostenaufwendig umgesetzt wurde. Bei einem Wert größer als eins, kann es sich lohnen den Kostenaufwand der betroffenen Komponente weiter zu erhöhen, um so dem vom Kunden zugeordneten Nutzen gerecht zu werden (vgl. Abbildung 5-3).

Im Anschluss an die Ermittlung der Kostensenkungsbedarfe einzelner Komponenten gilt es den Target Gap, im Sinne der Differenz zwischen Plan- und Zielkosten im Zeitintervall der Entwicklungszeit bis zur Serienreife des Produktes zu eliminieren. Hierbei zählt die Wertanalyse zu den verbreitetsten Methoden in der produzierenden Industrie, um Kostenoptimierungspotenziale zu identifizieren.[16] Das zentrale Konstrukt der Wertanalyse bildet der aus zehn sequenziellen Schritten bestehende Wertanalyse-Arbeitsplan, beginnend mit der Vorbereitung des Projektes über Funktionsanalyse und Lösungsgenerierung bis hin zum finalen Schritt der Realisierung.[17] Der Arbeitsplan ist als eine strukturierte Handlungsbeschreibung zu verstehen, dessen Art und Weise der Umsetzung den Beteiligten obliegt.[18]

4.2 Prozesskostenanalyse

Um die individuellen Kundenbedürfnisse zu adressieren, vergrößern Unternehmen ihr Produktprogramm und führen vermehrt differenzierte Produktvarianten ein.[19] Diese Erhöhung der Variantenvielfalt geht mit sogenannten Komplexitätskosten einher. Dabei handelt es sich um „zusätzliche Kosten, die aufgrund der Bewältigung einer erhöhten Komplexität entstehen".[20] So entstehen beispielsweise zusätzliche Aufwände bei der Lagerung und Verwaltung neuer Bauteile, der Planung einer komplexeren Fertigung, der Ansprache unterschiedlicher Zielgruppen im Marketing, der Schulung der Vertriebsmitarbeiter sowie durch zusätzliche Rüstvorgänge in der Produktion, wenn eine neue Produktvariante eingeführt wird.[21] Eine komplexere Organisation, bedingt durch eine zu hohe Variantenvielfalt, führt weiterhin zu fehleranfälligeren Prozessen mit erhöhten Durchlaufzeiten und geringerer Reaktionsgeschwindigkeit.[22] Zudem können entgangene Skaleneffekte oder Kosten für zusätzlich notwendige Werkzeuge und Materialien konstatiert werden. Somit ist davon auszugehen, dass mit einer Erhöhung der Variantenvielfalt ein überproportionaler Anstieg der prozeduralen Kosten einhergeht.[23]

Die Preise neuer Produkte werden in der Praxis typischerweise ausgehend von einer Zuschlagskalkulation festgelegt. Dabei werden Komplexitätskosten jedoch oftmals nicht ausreichend berücksich-

[13] FISCHER verwendet den Begriff Standardkosten anstelle von Plankosten
[14] Fischer (2008), Kostenbewusstes Konstruieren, S. 64.
[15] Mohnkopf et al. (2008), Innovationserfolgsrechnung, S. 395.
[16] Schuh und Riesener (2017), Produktkomplexität managen, S. 146f.
[17] DIN EN 12973 (2002), S. 31ff.
[18] Wiest (2011), Der Wertanalyse-Arbeitsplan, S. 39.
[19] Vgl. Büschken, von Thaden (Produktvariation, -differenzierung und –diversifikation), 2007, S. 597.
[20] Vgl. Olbrich, Battenfeld (Komplexität aus Sicht des Marketing und der Kostenrechnung), 2000, S. 5.
[21] Vgl. Olbrich, Battenfeld (Variantenvielfalt und Komplexität), 2005, S. 161.
[22] Vgl. Olbrich, Battenfeld (Komplexität aus Sicht des Marketing und der Kostenrechnung), 2000, S. 9.
[23] Vgl. Olbrich, Battenfeld (Variantenvielfalt und Komplexität), 2005, S. 161.

tigt, sodass Preise insbesondere für kundenindividuelle Produkte beziehungsweise Produktneuentwicklungen zu niedrig angesetzt werden. Versuchen Unternehmen die Verluste dieser unprofitablen Exoten durch eine Preiserhöhung der absatzstarken Produkte zu kompensieren, entsteht, wie in Abbildung 4-1 dargestellt, ein oftmals schwerwiegender Wettbewerbsnachteil im Bereich der Basisprodukte.[24]

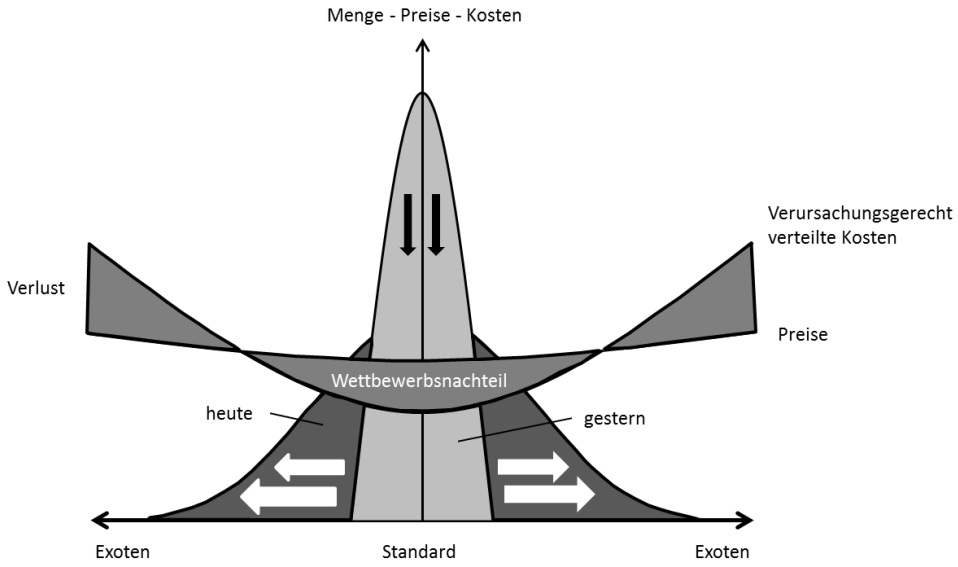


Abbildung 4-1: Quersubventionierung im Produktprogramm[25]

In der Literatur wird davon ausgegangen, dass der Gesamtumsatz eines Unternehmens im Gegensatz zu den Kosten nur unterproportional ansteigt.[26] Vor dem Hintergrund überproportional steigender Kosten und unterproportional steigender Umsätze, wird deutlich, dass die Einführung weiterer Produktvarianten gegebenenfalls zu einer Verschlechterung der Wettbewerbsfähigkeit führen kann.

Eine Methode der Kostenrechnung, die sich auf den Gemeinkostenbereich und insbesondere auf die indirekten Leistungsbereiche fokussiert, stellt die Prozesskostenrechnung dar.[27] Dabei werden anstelle pauschaler Zuschlagssätze Prozessanteile der betrieblichen Leistung verwendet um die Verteilung von Gemeinkosten auf Kostenträger zu verrechnen.[28] Im Zusammenhang mit der Prozesskostenrechnung sind die daraus resultierenden strategischen Informationsvorteile unter den Begriffen Allokations-, Degressions-, und Komplexitätseffekt zu erwähnen.[29]

Der Allokationseffekt beschreibt die möglichen Fehler, die infolge einer Verrechnung der Gemeinkosten durch Zuschlagsätze in Abhängigkeit von den Einzelkosten entstehen können. Da im realen Fall die Gemeinkosten kein proportionales Verhältnis zu den Zuschlagsätzen haben, stellt die Pro-

[24] Vgl. Schuh (Lean Innovation), 2013, S. 88 ff.
[25] i.A.a. Schuh (Lean Innovation), 2013, S. 90
[26] Vgl. Olbrich, Battenfeld (Variantenvielfalt und Komplexität), 2005, S. 161.
[27] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 277.
[28] Posluschny (2009), Kostenrechnen leicht gemacht, S. 94.
[29] Kremin-Buch (2007), Strategisches Kostenmanagement, S. 88.

zesskostenrechnung mit der Verteilung der Gemeinkosten in Abhängigkeit der in Anspruch genommenen Prozesse eine sinnvollere Lösung dar.[30]

Der Degressionseffekt hingegen berücksichtigt die Auswirkungen von Stückzahlen auf Gemeinkosten. Während bei einer Zuschlagskalkulation die Gemeinkosten proportional zu den Stückzahlen anfallen, verlaufen die Gemeinkosten bei einer Prozesskostenrechnung degressiv. Dies stellt den in der Regel auftretenden Fall dar, da einige Prozesse unabhängig von der geforderten Stückzahl ausgeführt werden und die Stückkosten sich mit steigenden Bestellungen verringern.[31]

Anhand des Komplexitätseffekts werden die Komplexität und das Variantenreichtum von Produkten und der dafür benötigten Prozesse in Betracht gezogen. So erfordern Produkte mit einer größeren Anzahl an Komponenten mehr gemeinkostenverursachende Prozesse, wie Einkaufs-, oder Logistikprozesse. Bei einer klassischen Zuschlagskalkulation werden tendenziell komplexere Produkte mit zu niedrigen Gemeinkosten und weniger komplexe Produkte mit zu hohen Gemeinkosten beaufschlagt.[32]

Die Prozesskostenrechnung kann in zwei Hauptschritte unterteilt werden. Zunächst werden *die betrieblichen Prozesse und ihre Prozessgrößen bestimmt*, anhand dessen darauffolgend *die Prozesskostenkalkulation durchgeführt* wird.[33] Zu Beginn der Prozesskostenrechnung erfolgt die Tätigkeitsanalyse auf Kostenstellenebene, die erst zu Teilprozessen und darauffolgend zu Hauptprozessen gebündelt werden.[34] Die Ermittlung der Prozesse sowie der dafür benötigte Einsatz von Personal und Betriebsmitteln erfolgt mit dem zuständigen Verantwortungspersonal der Kostenstelle anhand von Interviews.[35]

4.3 Energetische Analyse

Die Gesamtmethodik erfordert neben einer wirtschaftlichen Optimierung auch eine energetische Charakterisierung der betrachteten Anlagentechnik. Dafür ist zunächst der Ist-Zustand zu erfassen und zu beziffern um anschließend eine Wertung konstruktiver Änderungen vornehmen zu können. Der Betrachtung im finalen Schluss der Methode liegen die Nutzenergiemengen zur Raumkonditionierung sowie zur Trinkwarmwassererzeugung zu Grunde. Diese komfortsichernden Maßnahmen müssen zwingend bei allen Variantenvergleichen unter allen betrachteten Randbedingungen gleich sein. Der zur Nutzenerfüllung erforderliche Aufwand als Endenergie z.B. in Form von über die Systemgrenze bezogener elektrischer Energie oder einer bezogenen Gasmenge wird bei den zu vergleichenden Varianten eine jeweils unterschiedliche Größe einnehmen und stellt die Grundlage für die finale Bewertung dar.

Zur Beurteilung der energetischen Leistungsfähigkeit können im Wesentlichen zwei Ansätze verfolgt werden. Auf der einen Seite werden einzelne Schlüsselkomponenten in unterschiedlichen technischen Ausführungen an dafür geeigneten Teststänen messtechnisch analysiert. Die Messergebnisse dienen dann als Grundlage zur Erstellung und dem Parameter-Abgleich von Berechnungsmodellen. Auf der anderen Seite kann das Rechenmodell für das betrachtete System auch mit messtechnischen Analysen aus Feldprojekten abgeglichen und darüber in seiner Charakteristik

[30] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 280.
[31] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 280f.
[32] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 281f.
[33] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 150.
[34] Mengen und Urmersbach (2006), Prozesskostenrechnung im Industrieunternehmen, S. 219f.
[35] Coenenberg et al. (2009), Kostenrechnung und Kostenanalyse, S. 152.

plausibilisiert werden. Entscheidend ist, dass das gewählte Modell sensitiv die zu vergleichenden konstruktiven Änderungen widergeben kann und diese Charakteristik nach Möglichkeit mittels Messdaten abgeglichen ist.

Berechnungsmodell Energie

Im Rahmen des Projekts TEWISol werden hierfür drei Modelle erstellt. Die Modelle unterscheiden sich im Wesentlichen in der Art der Systemtechnik zur Trinkwarmwassererzeugung.

Schematisch lässt sich das Grundmodell wie folgt darstellen:

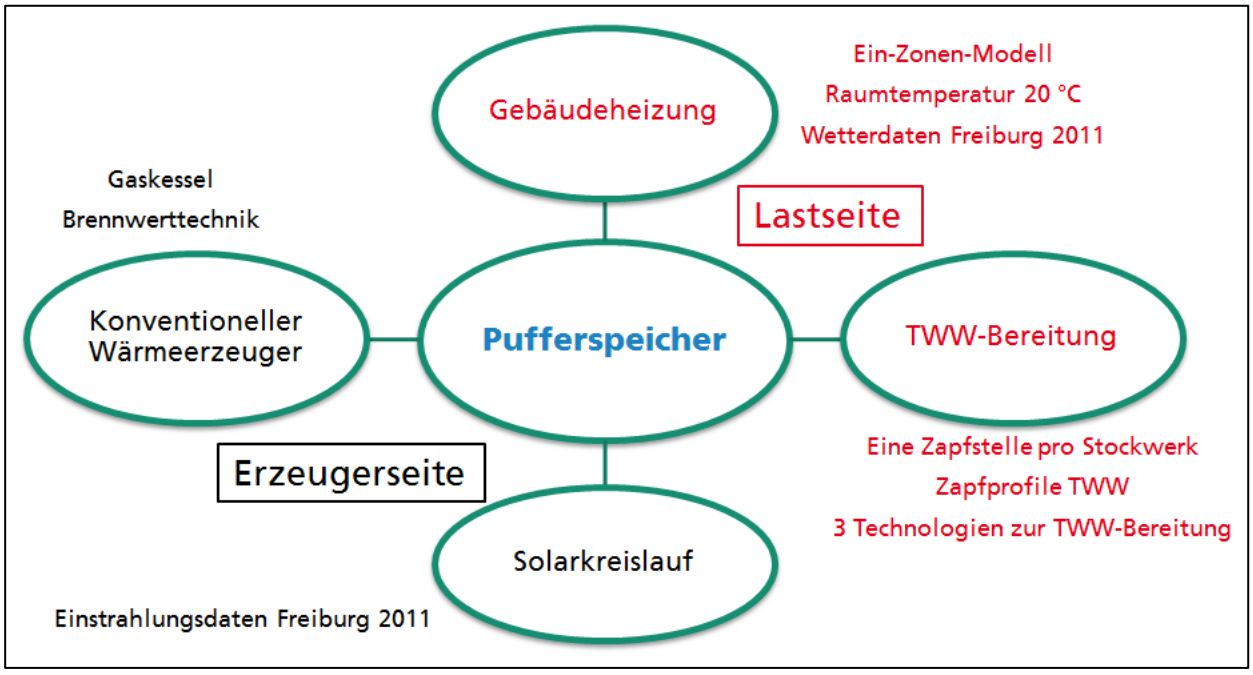


Abbildung 4-2: Konzept eines Berechnungsmodells für energetische Kennwerte

Für die hier betrachteten Varianten in der Konstruktion/Systemtechnik ist ein Modell erforderlich, welches auf der einen Seite die fluktuierenden Wärmemengen des solarthermischen Wärmeerzeugers und insbesondere auf der anderen Seite die mit Dynamik behafteten, temperatursensitiven Prozesse der unterschiedlichen Varianten zur Trinkwarmwassererzeugung abbilden kann. Es sei darauf hingewiesen, dass für Fragestellungen, die nicht auf konstruktive Variantenänderungen abzielen, auch weniger komplexe Modelle zu akzeptablen Ergebnissen führen können.

4.4 Wirtschaftliche Analyse

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden die jährlichen Gesamtkosten der Versorgungstechnik auf die umgesetzte Nutzenergie zur Raumkonditionierung und Trinkwarmwassererzeugung bezogen. Damit sind die energetischen Randbedingungen für die Bewertung über alle Varianten hinweg konstant. Die Kenngröße wird als *Levelized Cost of Heat* (*LCoH*) oder als die „konstanten und theoretischen Kosten einer Kilowattstunde Wärme“ definiert und entsprechen den abgezinsten Kosten über die Lebensdauer der Investition hinweg betrachtet. Für die Berechnung der *LCoH* einer Anlage müssen folgende Faktoren bekannt sein:

- Die erwartete Lebensdauer der Komponenten der Anlage zur Wärmeerzeugung und -verteilung
- Die über die Lebensdauer der Anlage verbrauchte Menge an Endenergie (Brennstoff, elektrische Energie,..) sowie die an die Räume abgegebene Nutzraumwärme und die gezapften Trinkwarmwassermengen.
- Die Kosten, die während der kompletten Lebensdauer anfallen, entsprechend Investitions- und Betriebskosten, Ausgaben für den Abbau der Anlage und mögliche Finanzierungskosten
- Der Zinssatz auf den Kapitalwert der Investition

Für die Kostenermittlung zur Berechnung der *LCoH* können zwei unterschiedliche Zeithorizonte zur Bilanzierung verwendet werden. Ein möglicher Zeithorizont ist ein Jahr. Dabei werden die Kosten für ein Durchschnittsjahr angegeben. Diese Kosten werden als gleichbleibend definiert und entsprechen damit einer Annuität. Die Berechnungsmethode aus der Investitionsrechnung wird als Annuitätenmethode bezeichnet. Der zweite mögliche Zeithorizont ist die Gesamtlaufzeit des Projekts. Es wird der Kapitalwert ermittelt, der den Zeitwert des Geldes berücksichtigt. Die periodischen Zahlungsströme werden abgezinst und mit der Anfangsinvestition verrechnet. Dieser Ansatz heißt Kapitalwertmethode.

Die Kosten der Wärmeversorgung im Gebäude setzen sich aus drei Teilen zusammen. Dies sind die (einmalig zu Beginn anfallenden) Investitionskosten. Hinzu kommen die bei der Nutzung entstehenden verbrauchsgebundenen Kosten, also z.B. die Kosten für Hilfsenergie und Brennstoff, sowie die betriebsgebundenen Kosten. Diese umfassen beispielsweise in vorgegebenen Intervallen anfallende Wartungsarbeiten oder Kontrollen.

Für die Berechnung des Kostenteils der Wärmegestehungskosten soll im Folgenden mit der Annuitätenmethode gearbeitet werden. Die Annuität ist eine in gleichmäßigen Abständen wiederkehrende Zahlung in konstanter Höhe, die durch Multiplikation des Kapitalwerts mit dem Annuitätenfaktor errechnet wird.

Der Annuitätenfaktor *ANF*, ergibt sich aus dem nominalen Kalkulationszinssatz i (engl. für interest rate) in % und der Nutzungsdauer *ND* in Jahren. Typische Nutzungsdauern der jeweiligen Komponente können den VDI-Richtlinien 2067 und 2068 entnommen werden. Bezüglich des Kalkulationszinssatzes i wird eine Investition aus Eigenmitteln angenommen. Dabei wird allgemein von einem am Geldmarkt erzielbaren Habenzinssatz i = 5 % ausgegangen. Aufgrund der aktuellen Niedrigzinsphase sollte jedoch bei langfristig ausgelegten Investitionen mit i = 3,5 % gerechnet werden.

$$ANF = \frac{(1+i)^{ND} \cdot i}{(1+i)^{ND} - 1} \tag{1}$$

Durch Multiplikation des Annuitätenfaktors *ANF* mit den Investitionskosten, also dem Kapitalwert zum Zeitpunkt 0, *K_0* in € ergibt sich die Annuität der Investition *AN_I* in €/a.

$$AN_I = K_0 \cdot ANF \tag{2}$$

Alle hier verwendeten Preise und Kosten sind Netto-Preise, also ohne Einbeziehung der Mehrwertsteuer.

Sowohl für die verbrauchsgebundenen als auch für die betriebsgebundenen Kosten ist die Annualisierung nicht ohne weiteres möglich. Dies liegt vor allem daran, dass es über den Betrachtungszeitraum zu Preisschwankungen für Waren und Dienstleistungen kommt. Daher wird der Annuitätenfaktor um einen Faktor ergänzt, der eine Preissteigerungsrate *PS* berücksichtigt. Zur Abbildung der Sensitivität des Ergebnisses in Abhängigkeit von unterschiedlich starken oder schwachen Preissteigerungen, werden zusätzlich zur Basispreissteigerung drei weitere Varianten von Preissteigerungen

(gering, mittel, hoch) eingeführt. Dieser Faktor wird als Mittelwert der Verteuerung *MWV* bezeichnet.

$$MWV = \frac{1+PS}{i-PS} * \left[\frac{1-(1+PS)^{ND}}{1+i}\right] * AN \quad (3)$$

Damit lassen sich die jährlichen Energiekosten *EK* in €/a errechnen. Diese sind das Produkt aus dem aktuellen Energiepreis *EP_a* in ct/kWh, dem jährlichen Energieverbrauch *EV* in kWh/a und dem Mittelwert der Verteuerung *MWV*.

$$EK = EP_a * EV * MWV \quad (4)$$

Die Instandhaltungskosten belaufen sich typischerweise auf 1 bis 2 % der Investitionssumme, also 0,01 × I_0 < *M_t* < 0,02 × I_0. Die VDI-Richtlinie 2067 enthält detaillierte Angaben zu den anteiligen Instandhaltungskosten jedes Bauteils. Zur Vereinfachung kann z.B. auch dem im IEA-SHC Task 54 definierten Vorgehen mit vereinfachten Faktoren gerechnet werden.

Durch Aufaddieren der Kostenarten ergibt sich eine Gesamtannuität. Wird diese durch den jährlichen Nutzenergiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser dividiert, ergeben sich die Wärmegestehungskosten (Levelized Cost of Heat *LCoH*) in €/kWh.

$$LCoH = \frac{Gesamtkosten\ Wärmeversorgung\ [\frac{€}{a}]}{Gesamtwärmebedarf\ [\frac{kWh}{a}]} \quad (5)$$

5 Der *TEWISol* Optimierungskreislauf

Um den Status quo der interfunktionalen Kommunikation in Unternehmen zu erfassen, werden im Folgenden anhand von Experteninterviews mit Unternehmensvertretern vier beispielhafte Fallstudien aus verschiedenen Industriesegmenten vorgestellt.

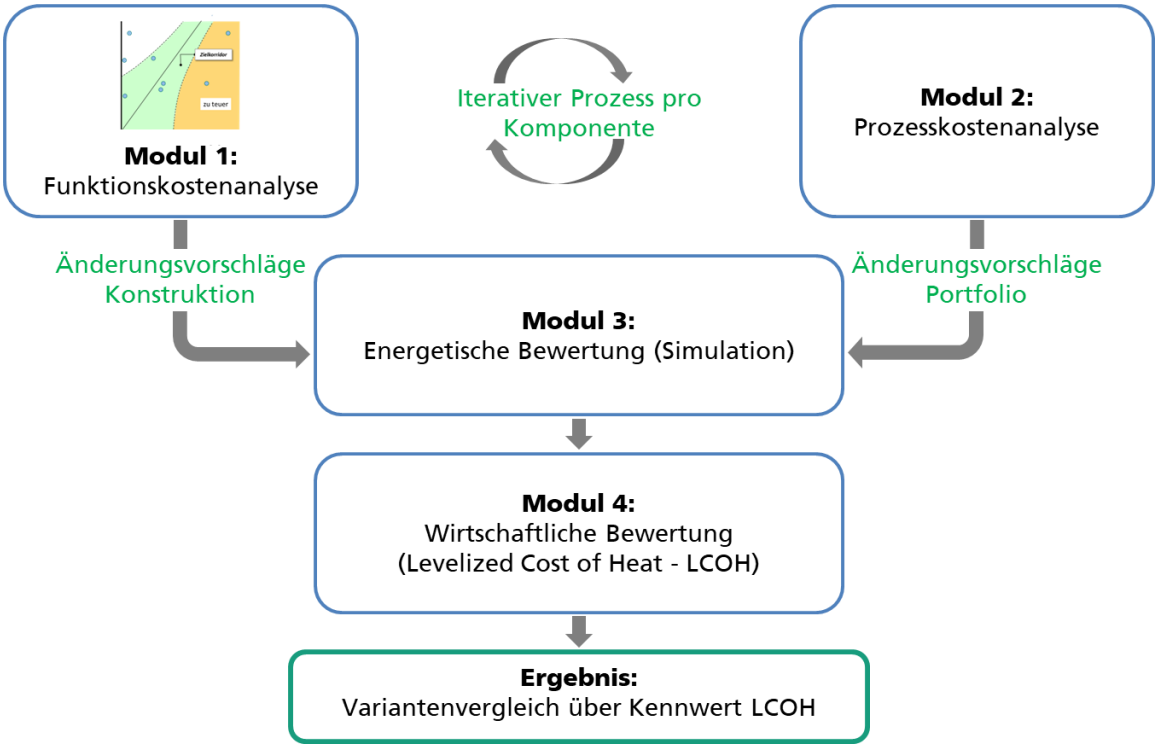


Abbildung 5-1: Der *TEWISol* Optimierungskreislauf

5.1 Modul 1 - Funktionskostenanalyse

5.1.1 Methodenschritt 1

Der erste Methodenschritt dient dazu eine Funktionsstruktur für solarthermische Kombianlagen aufzubauen. Die Funktionsstruktur ermöglicht innerhalb der Gesamtmethodik eine von physischen Komponenten unabhängige Beschreibung von solarthermischen Kombianlagen. Diese kann dazu verwendet werden, technische Lösungen verschiedener Akteure am Markt miteinander lösungsneutral zu beschreiben und so miteinander vergleichen zu können.

Für den Aufbau einer generischen Funktionsstruktur wird das zu beschreibende Produkt zunächst auf seine Hauptfunktion reduziert und diese anschließend in Nebenfunktionen dekomponiert. So stellt die Funktionsstruktur eine transparente Zusammensetzung der Gesamtfunktion eines Produktes anhand von generischen Teilfunktionen dar. Von zentraler Bedeutung der Dekomposition sind dabei folgende vier Eigenschaften, die dazu dienen einen sinnvollen und zielgerichteten Aufbau von Funktionsstrukturen zu gewährleisten:

- Allgemeingültig (Die Funktionsstruktur beschreibt die Zusammensetzung der Gesamtfunktion eines Produktes anhand von generischen Teilfunktionen)
- Kundenorientiert (Die Funktionsstruktur unterstützt die ganzheitliche Beschreibung eines Produktes aus Kundensicht)
- Branchenweit (Die Funktionsstruktur unterstützt die branchenweite Beschreibung von Funktionen)
- Lebenszyklusübergreifend (Die Funktionsstruktur stellt eine kontinuierliche Anforderungserfüllung über mehrere Produktgenerationen hinweg sicher)

Eine nach diesen Kriterien erstelle Funktionsstruktur bildet die Grundlage der Wertanalyse zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher solarthermischer Anlagen und dient der ganzheitlichen Beschreibung eines Produktes aus Sicht des Kunden. Erste mögliche Handlungsbedarfe aus Marktsicht werden dabei durch fehlende oder vom Kunden als unbedeutend wahrgenommene Realisierung von Funktionen aufgenommen.

5.1.2 Methodenschritt 2

Der zweite Methodenschritt dient dem Aufbau einer generischen Produktstruktur. Die generische Produktstruktur ermöglicht eine allgemeingültige Beschreibung einer solarthermischen Kombianlage. So wird für das Forschungsprojekt eine herstellerunabhängige Darstellung des Produktes ermöglicht und die Ergebnisse lassen sich abstrakt erarbeiten und anschließend unternehmensindividuell konkretisieren. Außerdem können so, wie auch mit der generischen Funktionsstruktur, die technischen Lösungen von verschiedenen Herstellern durch die neutrale Beschreibung miteinander verglichen werden.

Die Hauptelemente der Struktur bilden Module, Sub-Module und Komponenten. Diese Strukturierungsebenen sind dabei, entsprechend den oben beschriebenen Anforderungen, so definiert worden, dass sie zwischen verschiedenen Produktreihen übertragen und über mehrere Produktgenerationen hinweg wiederverwendet werden können. So erfüllt die Produktstruktur maßgeblich die folgenden vier zentralen Eigenschaften:

- Allgemeingültig (Die Produktstruktur beschreibt die Zusammensetzung eines Produktes mithilfe von generischen „Containern", die kundenspezifisch befüllt werden)
- Funktionsorientiert (Die Produktstruktur unterstützt die ganzheitliche, funktions-orientierte Beschreibung eines Produktes)
- Portfolioübergreifend (Die Produktstruktur unterstützt die Übertragbarkeit von Modulen/ Sub-Modulen/ Baugruppen zwischen verschiedenen Produktreihen)
- Lebenszyklusübergreifend (Die Produktstruktur unterstützt die Wiederverwendung von Modulen/ Sub-Modulen/ Baugruppen über mehrere Produktgenerationen hinweg)

So können auf Basis der generischen Produktstruktur auch Varianten verschiedener Hersteller unabhängig von den tatsächlichen Stücklisten beschrieben werden, was einen branchenweiten Einsatz der Struktur ermöglicht.

5.1.3 Methodenschritt 3

Im dritten Methodenschritt muss die Zuordnung von Komponenten der generischen Produktstruktur zu den Subfunktionen der generischen Funktionsstruktur vorgenommen werden. Die quantitative Zuordnung des Funktionsbeitrags einzelner physischer Komponenten einer solarthermischen Kombianlage zu den ermittelten Funktionen erfolgte im Rahmen des Forschungsprojekts durch das Expertenwissen der beteiligten Projektpartner. Dabei folgt die Festlegung der jeweiligen Anteile keinem vordefinierten Algorithmus, sondern ist das Ergebnis von Diskussionen und Workshops.

Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Zuordnung je nach Orientierung des späteren Ergebnisses auf zwei unterschiedliche Arten normiert werden kann. Es werden die Fälle einer komponenten- bzw. funktionsorientierten Zuordnung unterschieden:

Komponentenorientierte Zuordnung

Bei der komponentenorientierten Variante der Funktionskostenanalyse erfolgt die Zuordnung ausgehend von Funktionen in Richtung der Komponenten. Somit wird beschrieben zu welchen Anteilen einzelne Komponenten eine Funktion zu 100 % erfüllen. Die ermittelten Werte müssen dabei für jede Funktion 1 ergeben (vgl. Abbildung 5-2).

Funktionsorientierte Zuordnung

Bei der funktionsorientierten Auslegung der Methode erfolgt die Zuordnung ausgehend von den Komponenten in Richtung der Funktionen. Hier wird beschrieben zu welchen Anteilen eine Funktion von welchen Komponenten erfüllt wird. Folgerichtig lassen sich so die Anteile entlang der Komponente auf 1 summieren (vgl. Abbildung 5-2).

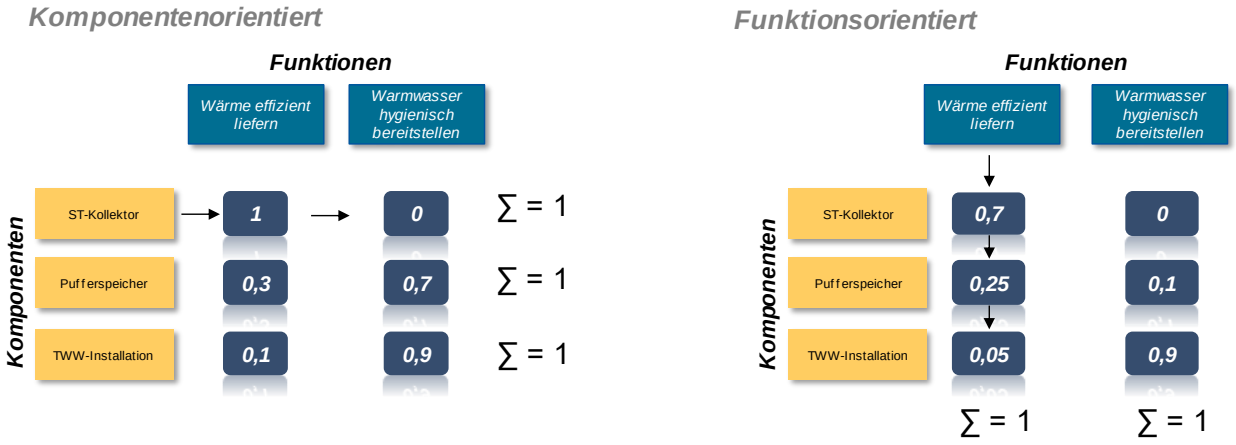


Abbildung 5-2 Gegenüberstellung der funktionsorientierter und komponentenorientierter Zuordnung

5.1.4 Methodenschritt 4

Im vierten Methodenschritt werden die Ergebnisse der zuvor durchlaufenden Methodenschritte vereint und analysiert. Das Ziel ist es zum einen Funktionen zu identifizieren, welche einen zu hohen Wert aufweisen im Vergleich zu dem Nutzen, den sie aus Sicht unterschiedlicher Stakeholder generieren. Zum anderen sollen Komponenten identifiziert werden, welche SOLL-Kosten für einzelne Komponenten auf Basis des Wertbeitrags einzelner Funktionen möglich sind.

Funktionsorientierte Auswertung

Die funktionsorientierte Auswertung verfolgt das Ziel, die Kosten und den Nutzen einzelner Funktionen des Gesamtsystems miteinander zu vergleichen. Dazu werden die technologisch unterschiedlichen Realisierungen in einem Kosten-/ Nutzen-Diagramm abgebildet und miteinander verglichen (vgl. Abbildung 5-3). Die einzelnen Punkte im Diagramm beschreiben dabei die einzelnen Funktionen. Die eingezeichnete Diagonale stellt den optimalen Fall dar, dass sich Kosten und Nutzen für den jeweiligen Stakeholder genau entsprechen und der Zielkostenindex daher 1 ergibt.

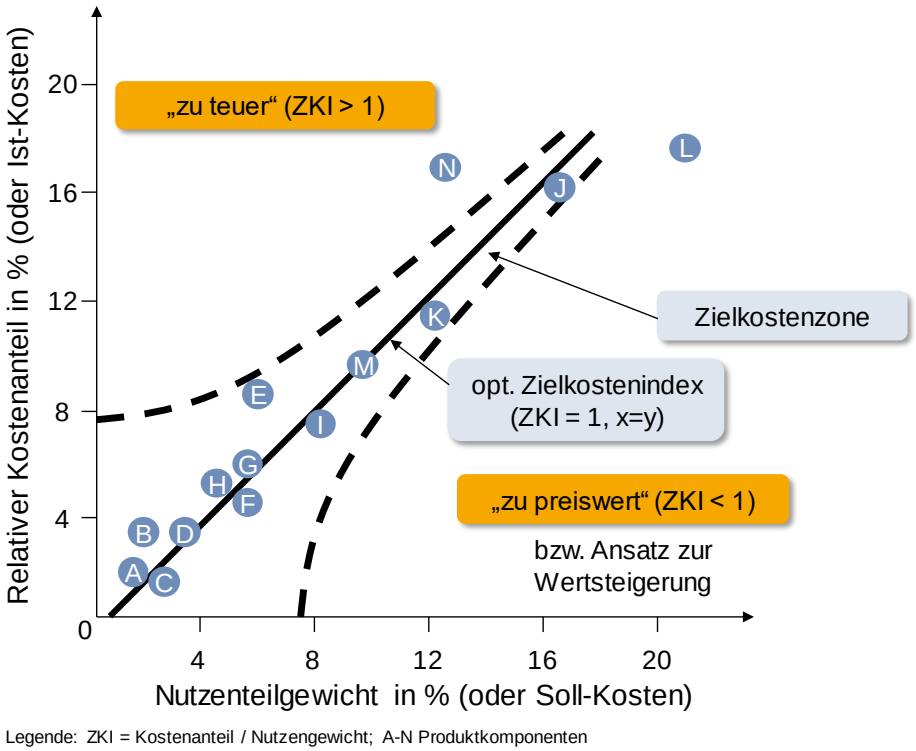


Abbildung 5-3 Zielkostenkontrolldiagramm nach HORSCH[36]

Komponentenorientierte Auswertung

Die komponentenorientierte Auswertung hingegen verfolgt das Ziel, konkrete Zielkosten für die Module und Komponenten der generischen Produktstruktur zu ermitteln. Der Ausgangspunkt dazu liegt zunächst in der Ermittlung eines theoretisch erzielbaren Marktpreises einer solarthermischen Kombianlage. Alternativ können auch aktuelle IST-Preise verwendet werden, um auf dieser Basis die Optimierungspotenziale der Herstellkosten einzelner Module und Komponenten aufzuzeigen. Ausgehend von einem definierten Zielpreis, werden die ermittelten Kosten auf Basis der relativen Nutzenanteile auf die Funktionen verteilt.

5.2 Modul 2 - Prozesskostenanalyse

5.2.1 Methodenschritt 1

Der erste Methodenschritt dient dazu, ein umfassendes Prozessmodell der Abteilungen oder Funktionsbereiche des Unternehmens aufzubauen. Im Zentrum der Betrachtung stehen dabei diejenigen Abteilungen, die unmittelbar und am stärksten von der zunehmenden Komplexität weiterer Varianten von solarthermischen Kombianlagen betroffen sind. Dazu zählen in den industriellen Unternehmen vor allem die Entwicklung, das Produktmanagement sowie die Produktion. Aber auch der Einkauf oder das Marketing kann in die Analyse eingeschlossen werden. In Handwerksbetrieben haben sich vor allem die Angebotserstellung und der Service als relevante Funktionsbereiche herausgestellt.

[36] Horsch (2018), Kostenrechnung, S. 311.

Innerhalb der identifizierten Abteilungen werden die einzelnen Arbeitsschritte auf dem Level von Teilprozessschritten, wie „Arbeitsplan anlegen" im industriellen Umfeld oder „Angebotsvorlage aktualisieren" im Handwerk aufgenommen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde aufgrund von begrenzten Kapazitäten dazu zunächst ein generisches Prozessmodell für elf Abteilungen des Projektpartners entworfen. Dieses Modell beinhaltet typische komplexitätsbehaftete Teilprozessschritte der jeweiligen Abteilungen und wurde durch den Projektpartner eigenständig auf die tatsächlich auftretenden Schritte spezifiziert. Die zu berücksichtigenden Prozessschritte der einzelnen Abteilungen können dabei in Interviews durch ein Abfragen konkreter Szenarien, wie die „Modifikation eines Bauteils" oder „Ergänzung eines Produktkatalogs" aufgedeckt werden.

Parallel zur Bestimmung der Prozessschritte werden zusätzlich die Ressourcen aufgenommen, welche an der Durchführung einzelner Aktivitäten beteiligt sind. Zur Vereinfachung des Modells und aufgrund eines bedeutenden Anteils von Personalkosten an den Gesamtkosten der analysierten Abteilungen, wurde lediglich die Ressource Mitarbeiter und nicht beispielsweise weitere Betriebsmittel betrachtet. Jedoch lassen sich je Abteilung unterschiedliche Mitarbeiterressourcen identifizieren. So treten in der Produktion beispielsweise reguläre Produktionsmitarbeiter, aber auch Mitarbeiter für die Prüftechnik oder Lagerarbeiter auf, welche jeweils unterschiedliche Kostensätze abrufen.

Das Ergebnis des ersten Methodenschritts ist ein umfassendes und detailliertes Modell der Prozessschritte wesentlicher Abteilungen sowie die Übersicht der relevanten Ressourcen, welche zur Durchführung der Arbeitsschritte benötigt werden.

5.2.2 Methodenschritt 2

Das Ziel des zweiten Methodenschritts ist die Ergänzung des Prozessmodells um die konkreten Kosten der identifizierten Prozessschritte in Abhängigkeit sogenannter Komplexitätstreiber.

Als Komplexitätstreiber werden die Größen verstanden, von denen der Aufwand der jeweiligen Arbeitsschritte des Prozessmodels abhängt. Von der Qualität dieser Treiber hängt maßgeblich das Gesamtergebnis dieses Vorgehensmodells ab. Daher müssen die Komplexitätstreiber gewissenhaft in sogenannten Komplexitätskosteninterviews identifiziert und deren Aufwand sorgfältig evaluiert werden. Typische Treiber sind beispielweise die Anzahl der Materialnummern für den Teilprozessschritt „Stammdatenpflege" oder die Anzahl der Sprachen bei der „Erstellung von Handbüchern" in der Produktdokumentation.

Die Aufwände für die Komplexitätstreiber werden als Zeit angegeben, welche die identifizierte Ressource den Treiber in dem jeweiligen Prozessschritt bearbeitet. Dabei wird der Einfachheit halber ein linearer Zusammenhang zwischen der Zeit und dem Aufwand angenommen. Bei der Durchführung des Methodenschritts mit den am Forschungsprojekt beteiligten Unternehmen hat sich sowohl industrieseitig als auch im Handwerk gezeigt, dass die größte Herausforderung in der Bestimmung des Aufwands je Treiber und Prozessschritt lag. Es hat sich dabei als hilfreich erwiesen die Aufwände über Nebenrechnungen grob abzuschätzen. So fiel es den Interviewpartnern beispielsweise schwer den Aufwand für die Pflege der Stammdaten einzelner Materialnummern abzuschätzen. Einfacher war es jedoch zu beziffern, wie viele Stammdaten im Jahr gepflegt werden und wie viele FTE diese Aufgabe erfüllen. Über die jährliche Arbeitszeit eines FTE konnte so zumindest eine Abschätzung getroffen werden.

Weiterhin gilt es in diesem Methodenschritt zu differenzieren, inwiefern die Aufwände einmalig anfallen oder regelmäßig anfallen. Letztere müssen dabei für alle Prozessschritte und alle Abteilungen auf einen einheitlichen Zeitraum skaliert werden, um die Vergleichbarkeit und die Aggregation zu einem Gesamtmodell zu ermöglichen. Es hat sich dabei als hilfreich erwiesen, die laufenden Aufwände stets auf ein Geschäftsjahr zu beziehen, um sicherzustellen, dass alle Prozesse einmal vollständig durchlaufen werden.

Das Ergebnis des zweiten Methodenschrittes ist somit ein prozessorientiertes Kostenmodell, das jedem komplexitätsbehafteten Prozess eine Ressource und einen Kostentreiber mit dem entsprechenden Kostensatz zuordnet und zwischen laufenden und einmaligen Teilprozesskosten unterscheidet.

5.2.3 Methodenschritt 3

Das Ziel des dritten Methodenschrittes ist die Aggregation der Komplexitätskostentreiber. So lässt sich ein gesamtheitliches Komplexitätskostenmodell für das jeweilige Unternehmen erstellen.

Aufbauend auf den ersten beiden Methodenschritten werden die identifizierten Kosten der Teilprozesse je Komplexitätstreiber im Rahmen einer komplexitätstreiberbasierten Evaluierung aggregiert. Dazu wird zunächst eine Homogenisierung der Komplexitätstreiber zwischen den unterschiedlichen Abteilungen vorgenommen. Anschließend lässt sich das unternehmensspezifische Komplexitätskostenmodell aufbauen. Dazu werden die identischen Kostentreiber der einzelnen Abteilungen zusammengefasst und deren finanzielle Auswirkungen summiert. So lässt sich allgemein der gesamtunternehmerische Aufwand einzelner Komplexitätstreiber angeben.

In dem Komplexitätskostenmodell können so auf Basis der einzelnen Treiber verschiede Referenzfälle simuliert und die gesamten Abteilungsübergreifenden Komplexitätskosten erfasst werden. Weiterhin können in Abhängigkeit der Ausprägungen der Kostentreiber die laufenden und initialen Kosten ermittelt und Referenzmodelle miteinander verglichen werden. Dazu wurde das Modell im Rahmen des Forschungsprojekts in einem Microsoft Excel-basierten Tool umgesetzt.

Das Ergebnis des dritten Methodenschritts ist das vollständige und unternehmensspezifische Komplexitätskostenmodell, welches die komplexitätsabhängigen Aufwände des Unternehmens abbildet. Die weiteren Funktionalitäten und die Anwendung des Modells werden ausführlich im nachfolgenden Kapitel erläutert.

5.2.4 Methodenschritt 4

Das Ziel des vierten Methodenschritts ist die Definition und der Aufbau von Referenzfällen zur Bewertung der typischen Komplexitätskosten eines Unternehmens. Typische Referenzfälle sind beispielsweise die Erstellung einer neuen Variante eines Bauteils, einer Baugruppe oder einer Produktvariante.

Für jeden dieser identifizierten Referenzfälle findet eine Quantifizierung der zuvor bestimmten Komplexitätstreiber im aufgebauten Komplexitätskostenmodell statt. So kann sich beispielsweise die Einführung einer neuen Baugruppe für eine Produktvariante aus zwei zusätzlichen mechanisch-hydraulischen Bauteilen und einem elektronischen Bauteil ohne Software zusammensetzten. Diese beiden Komplexitätstreiber führen somit sowohl in der mechanisch-hydraulischen als auch in der elektronischen Konstruktion zu Aufwänden. Außerdem müssen in der Funktionsprüfung neue Prüfpläne geschrieben werden, sodass auch hier komplexitätsbedingte Kosten entstehen. Weiterhin ist es denkbar, dass neue strategische Lieferanten eingebunden werden müssen und so auch Kosten für Verhandlungen und Zertifizierung im Einkaufsbereich anfallen.

Die Quantifizierung der einzelnen Treiber während des Konfigurationsprozess führt jedoch nicht nur zu einer Aufschlüsselung der initialen Komplexitätskosten. Durch die Aufnahme der laufendenden Kosten in Abhängigkeit der identischen Komplexitätstreiber im Methodenschritt 2, werden automatisch auch die laufenden Komplexitätskosten ausgegeben. Auf diese Weise lassen sich verschiede Referenzfälle äußerst präzise konfigurieren, um so zunächst unternehmensintern die Kosten eines Unternehmens zu analysieren.

Im Rahmen des Forschungsprojekts gilt es jedoch nicht nur die komplexitätsabhängigen Aufwände eines Unternehmens abzubilden, vielmehr ist es das Ziel die Kosten der gesamten Wertschöpfungskette zu erkennen. Dazu werden separate Komplexitätskostenmodelle für ein Zuliefererunterneh-

men, den Systemhersteller sowie einen Handwerksbetrieb aufgebaut. Es ist jedoch nicht möglich, die Komplexitätstreiber der verschiedenen Wertschöpfungsstufen inhaltlich miteinander so in Bezug zu setzen, dass eine durchgängige vollautomatisierte Konfiguration der gesamten Wertschöpfungskette ermöglicht wird. Dieses lässt sich damit begründen, dass das Endprodukt des Zulieferers bereits eine Baugruppe oder Komponente des Systemherstellers ist. Es existieren zu viele Varianten möglicher Verbindungen um diese vollumfänglich modellieren zu können. Daher wurde eine referenzfallbasierte Vorgehensweise gewählt. Dabei wird ein Referenzfall für einen der drei Akteure definiert und anschließend werden die Auswirkungen dieses Falls für die anderen beiden Wertschöpfungsstufen untersucht. Darauf aufbauend werden die entsprechenden Referenzfälle in diesem Unternehmen konfiguriert.

Das Ergebnis des vierten Methodenschritts ist somit zunächst eine detaillierte Betrachtung der komplexitätsbasierten Aufwände für einzelne Unternehmen. Weiterhin lassen sich jedoch auch die Auswirkungen von Produktänderungen in einer Stufe der Wertschöpfungskette auf die übrigen Akteure analysieren und bewerten.

5.3 Modul 3 - Energetische Analyse

Im Rahmen von Modul 3 wird die Modellierung zur Leistungscharakterisierung des zu betrachtenden Systems vorgenommen. Das Gesamtsystem wird dabei nach Möglichkeit in einzelne Teilsysteme auf Komponentenebene zerlegt, die dann separat modelliert werden.

Wärmelast - Gebäude

Beispielhaft soll im Folgenden aufgezeigt werden, wie eine Gebäudelast als Heizlast in ein Gesamtmodell integriert werden kann.

Das zu beheizende Gebäude soll hier gemäß VDI-Richtlinie 6020 mittels eines Ein-Zonen-Modells abgebildet werden. Dies lässt sich dadurch motivieren, dass auf Grund der zu betrachtenden temperatursensitiven Prozesse in den Varianten eine dynamische Einbindung der Heizkreise im Modell erforderlich ist. Mit dem 1-zonigen Modellansatz werden alle Temperaturzonen in dem betrachteten Gebäude auf eine Zustandsgröße für einen Raumluftknoten gebracht und damit exakt gleich behandelt. Das ist hier in diesem Beispiel zulässig, da die zu untersuchenden Varianten ein anderes Ausprägungsmerkmal besitzen (Fokus: Technologien zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser). Wie in Abbildung 5-4 ersichtlich ist, berücksichtigt das Modell passive Energiegewinne durch Sonnenstrahlung sowie interne Wärmegewinne. Außerdem werden Verluste über die Außenflächen sowie Verteilverluste modelliert. Die Beheizung des Gebäudes erfolgt über einen Radiatorheizkörpertyp. Auch die Wirkung des Luftaustausches durch Infiltration und Ventilation wird im Berechnungsmodell hinterlegt.

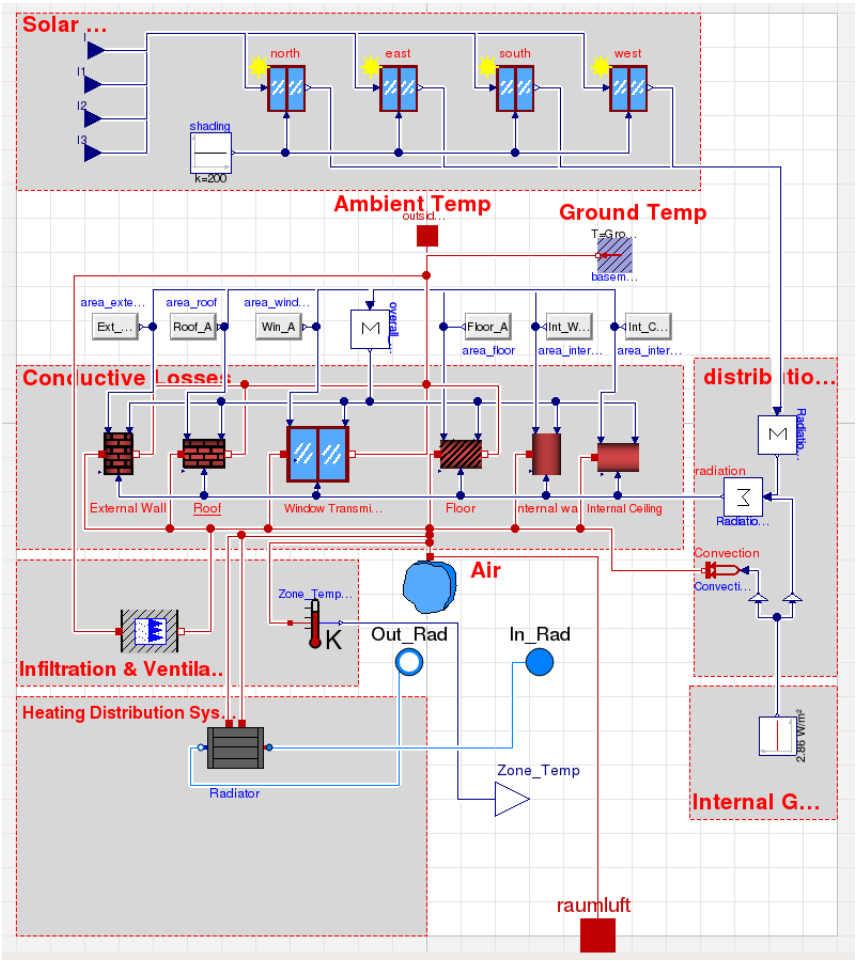


Abbildung 5-4: Komponentenansicht Gebäude im Ein-Zonen-Modell

Die Berechnung der Normheizlast, die für die Auslegung des Wärmeerzeugers sowie des Radiatorheizkörpers erforderlich ist, erfolgt nach DIN EN 12831.[37]

Wärmelast - Trinkwarmwasser

Es wird ein mittlerer Tagesbedarf an Trinkwarmwasser von 40 Liter pro Person bei 40 °C eingestellt.[38] Abbildung 5-5 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus einem TWW-Zapfprofil in dem über 24 Stunden die anfallenden Zapfmengen dargestellt werden.

[37] Deutsches Institut für Normung e.V. (2017), DIN EN 12831-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast.

[38] Laasch und Laasch (2013), Haustechnik.

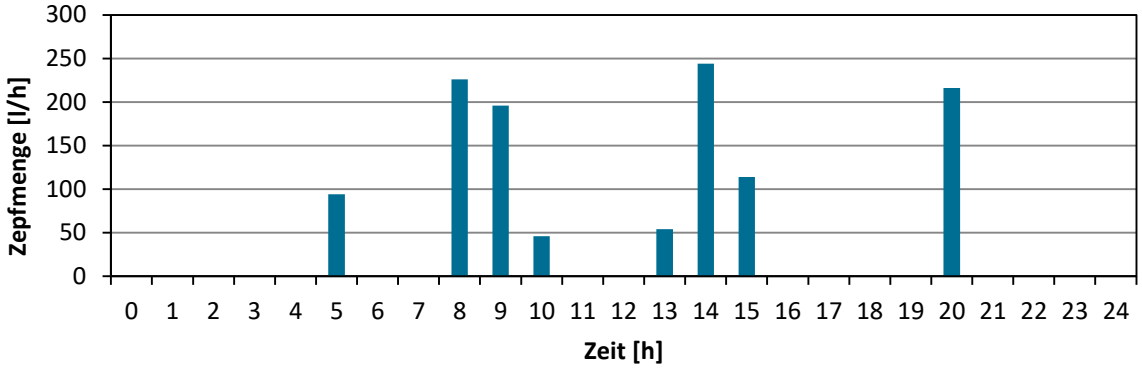


Abbildung 5-5: Beispielhaftes TWW-Zapfprofil für einen Tag

Heizkreisverteilung

Die Rohrdurchmesser für TWW-Leitungen werden entsprechend der DIN 1988-300[39] ausgelegt und im Ausgangsmodell berücksichtigt. Dabei werden für jede Wohneinheit drei unterschiedliche Zapfstellen angenommen. Dies sind eine Dusche, ein Waschbecken und eine Küchenspüle.

In den zwei Modellen zur zentralen TWW-Bereitung ist eine separate Zirkulationsleitung mit dem Medium Trinkwasser vorgesehen. Damit ist eine Systemtrennung zwischen Heizungs- und Trinkwasser vor dem Eintritt in Hausverteilung implementiert (4-Leiter-Technik). Für die Variante Zentrale TWW-Bereitung im Durchflussprinzip (zDF) ist ein einzelner Wärmetauscher im Modell vorhanden. Dieser wird bei der Variante zur TWW-Bereitung um Speicherladprinzip (zSL) durch einen Trinkwasserspeicher ergänzt.

Im Modell der Variante mit einer dezentralen TWW-Bereitung im Durchflussprinzip mittels Wohnungsübergabestationen (dDF) sind für jede Wohneinheit separate Wärmeübertrager vorgesehen.

Solarthermischer Wärmeerzeuger

Die Auslegung der Größe des Kollektorfeldes der thermischen Solaranlage erfolgt nach der zu beheizenden Nutzfläche. Pro Quadratmeter zu beheizende Nutzfläche wird für eine Anwendung zur Erwärmung von Trinkwasser 0.05 m² Kollektorfläche vorgesehen. Die zu beheizende Nutzfläche des Referenzgebäudes beträgt 702 m². Daher werden 35 m² Kollektoraperturfläche für das Modell parametriert.

Warmwasserspeicher

Das Volumen des Pufferspeichers wird auf 70 Liter pro m² Kollektorfläche angesetzt. Es wird ein U_A-Wert für die Dämmung des Speichers eingesetzt, welcher der Energieeffizienzklasse D der EU Ökodesign-Richtlinie entspricht. Damit werden auch die Verluste der Anschlüsse berücksichtigt.

5.4 Modul 4 – Wirtschaftliche Bewertung

Für die Berechnung der *LCoH* wird eine Methodik und darauf basierend ein Software-Werkzeug in MS Excel entwickelt.

[39] Deutsches Institut für Normung e.V. (2012), DIN 1988-300: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 300: Ermittlung der Rohrdurchmesser; Technische Regel des DVGW.

Zur Ausführung des Programms sind die folgenden Eingaben nötig:

- Kalkulationszinssatz
- Nutzungsdauer
- Materialkosten der solarthermisch unterstützten Anlage zur Wärmeversorgung (ohne Mehrwertsteuer)
- Raumnutzwärme sowie gezapfte Menge Trinkwarmwasser der gesamten Wohneinheiten
- Bedarf an Endenergie für den konventionellen Energieerzeuger
- Faktor für Montage und Inbetriebnahme
- Faktor für Instandhaltung
- Faktor für Planung

Aus diesen Werten lässt sich unter den in der Arbeit getroffenen Annahmen ein Preis für die durch das System erzeugte Wärmeenergiemenge in €/kWh oder Cent/kWh errechnen.

Die *LCoH* bieten damit eine Vergleichsmöglichkeit zwischen verschiedenen Anlagenkonzepten und Technologien. Die Eingabemaske für die Daten zur wirtschaftlichen Charakterisierung auf Komponentenebene des solarthermischen Wärmeerzeugers wird in der folgenden Abbildung 5-6 dargestellt.

Basisdaten Anlagentechnik								
Komponente	**Einheit**	**Kosten/ Menge**	**Kostenquelle (siehe Funktionskostenanalyse-Tool)**	**Nutzungsdauer [a]**	**Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Inspektion**	**Norm (Quelle für Nutzungsdauern und Aufwände)**	**Abschnitt**	**Annuitätenfaktor Invest**
Thermischer Solarkollektor								
Absorber	€/m²Aap	120.89 €	/4/	20	1.5%	VDI 2067	A2. 1.3.1.10	0.0582
Abdeckung	€/m²Aap	50.37 €	/4/	20	1.5%	VDI 2067	A2. 1.3.1.10	0.0582
Gehäuse	€/m²Aap	30.22 €	/4/	20	1.5%	VDI 2067	A2. 1.3.1.10	0.0582
Befestigungssystem ST								
Befestigungssystem	€/Stück	190.00 €	/4/	20	1.5%	VDI 2067	A2. 1.3.1.10	0.0582
Solarstation								
Solarkreispumpe, Regler, sonstige Armaturen (Sich	€/Stück	548.00 €	/1/	15	3.0%	VDI 2067	A2. 1.2.4	0.0838
Membranausdehnungsgefäß	€/Stück	375.32 €	/4/	15	2.0%	VDI 2067	A2.1.2.3	0.0778
Fluid	€/l	4.60 €	/4/	20	1.5%	VDI 2067	A2. 1.3.1.10	0.0582
Wärmeübertrager (30 Platten)	€/Stück	327.00 €	/1/	20	2.0%	VDI 2067	A2. 1.3.3	0.0612

Abbildung 5-6: Eingabemaske am Beispiel des solarthermischen Wärmeerzeugers

Die zentralen Eingaben für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der Annuitätenmethode lassen sich der folgenden Abbildung 5-7 entnehmen.

Allgemeine Angaben			
Betrachtungszeitraum	20	a	
Kalkulationszinssatz nominal	2.1%		
Annuitätenfaktor (für Betrachtungszeitraum u. Kalkulationszinssatz)	0.0617		
Aufschlag Montage und Inbetriebnahme	5.00%		
Aufschlag Planung	10.00%	5%EFH / 10% MFH	
Mittelwertfaktor der Energiepreissteigerung		Ausgleichsannuität (inklus	
Basis	2.0%	1.222	
Var A - gerine Energiepreissteigerung	0.5%	1.051	
Var B - mittlere Energiepreissteigerung	2.2%	1.248	
Var C - hohe Energiepreissteigerung	5.0%	1.679	
Förderung Solaranlage	200	€/m² Bruttokollektorfläche	
Energiepreis	0.06	€/kWh	
Erzeugeraufwandszahl	0.8		

Abbildung 5-7: Eingaben der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit der Annuitätenmethode

In der folgenden Abbildung 5-8 werden dann die unterschiedlichen Dimensionierungen für den beispielhaft dargestellten solarthermischen Wärmeerzeuger vorgenommen.

Angaben zur Systemkonfiguration					
Komponente	**Einheit**	**Faktor**	**zSL**	**zDF**	**dDF**
Thermischer Solarkollektor					
Absorber	m²Aap	35.1	35	33	31
Abdeckung	m²Aap		35	33	31
Gehäuse	m²Aap		35	33	31
Befestigungssystem ST					
Befestigungssystem	Stück		35	33	31
Solarstation					
Solarkreispumpe, Regler, sonstige Armaturen (Sicherheitsgrup	Stück	1	1	1	1
Membranausdehnungsgefäß	Stück	1	1	1	1
Fluid	l	20	20	19	18
Wärmeübertrager (30 Platten)	Stück	1	1.00	0.93	0.88
Regelung ST					
Sensoren inkl Verkablung	Stück		11	11	11
Regler (Hardware)	Stück		1	1	1
Thermischer Speicher					
Behälter	l	50	1755	1518	1359
Wärmedämmung	l		1755	1518	1359

Abbildung 5-8: Parametrierung der einzelnen Komponenten für die wirtschaftliche Bewertung

Die Ergebnisse der wirtschaftlichen Betrachtung lassen sich dann mit der in der folgenden Abbildung 5-9 dargestellten Form zusammenfassen.

Annuität Planungs-/Montagekosten			492 €	472 €	467 €
Annuität der kapitalgebundenen Kosten	**(Spalte I - Basisdaten Anlag**		**3 600 €**	**3 451 €**	**3 429 €**
Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten					
Nutzenergiebedarf (TWW+Heizung) - Bezug für LCOH			48 280	48 280	48 280
Konventioneller Erzeuger Endenergiebedarf (Heizung u. TWW) [kWh/a]			72 718	72 718	72 718
Basis			6 667 €	6 667 €	6 667 €
Energiepreissteigerung Var A			5 730 €	5 730 €	5 730 €
Energiepreissteigerung Var B			6 805 €	6 805 €	6 805 €
Energiepreissteigerung Var C			9 156 €	9 156 €	9 156 €
Annuität der Betriebs-/wartungsgebundenen Kosten	**(Spalte F - Basisdaten Anla**		**1 032 €**	**993 €**	**988 €**
Gesamtannuität	**€/a**				
Basis	€/a		11 298 €	11 111 €	11 083 €
Energiepreissteigerung Var A	€/a		10 362 €	10 174 €	10 146 €
Energiepreissteigerung Var B	€/a		11 437 €	11 249 €	11 221 €
Energiepreissteigerung Var C	€/a		13 788 €	13 600 €	13 573 €

Abbildung 5-9: Auszug aus dem Ergebnis der wirtschaftlichen Betrachtung

Eine beispielhafte Zusammenfassung der investiven Aufwendungen basierend auf den einzelnen Komponenten des gesamten Systems lässt sich der folgenden Abbildung 5-10 entnehmen.

Invest Material					
Thermischer Solarkollektor			7 072	6 577	6 223
Befestigungssystem ST			6 650	6 270	5 890
Solarstation			1 342	1 248	1 181
Regelung ST			1 347	1 347	1 347
Thermischer Speicher			3 229	2 793	2 501
Haupterzeuger, Übergabe Raum			16 723	16 723	16 723
Verrohrung Heizkreise			9 174	9 174	9 174
Ergänzende Heizungskomponenten			3 932	3 932	3 932
Konnektivität			621	621	621
Wohnungsübergabestation			0	0	2 790
Frischwasserstation			0	2 263	0
Trinkwasserspeicher mit TWW-Bereitung			3 008	0	0
			53 098	50 948	50 382
Invest					
Material			53 098	50 948	50 382
Förderung ST			-7 800	-7 254	-6 864
Planung (10% Material)			5 310	5 095	5 038
Montage und Inbetriebnahme (5% Material)			2 655	2 547	2 519

Abbildung 5-10: Investive Aufwendungen für das gesamte System basierend auf den einzelnen betrachteten Komponenten

6 Ergebnisse der Fallstudien

Um die entworfene Gesamtmethodik veranschaulicht zu erläutern sollen die einzelnen Methodenschritte im Folgenden an realen Fallstudien und Ergebnissen des Forschungsprojekts dargestellt werden. Aufgrund des grundlegenden Aufbaus des Projekts erfolgt dieses nicht anhand eines durchgängigen Beispiels, sondern die einzelnen Module des *TEWISol* Optimierungskreislaufs werden in einzelnen und in sich abgeschlossenen Fallstudien vorgestellt.

6.1 Funktionskostenanalyse

Zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der vorgestellten Methodenschritte, wurden diese mit den Projektpartnern validiert.

Der zentrale Schritt der Methode und damit auch des Forschungsprojekts ist die Bewertung der Funktionen aus der Perspektive unterschiedlicher Stakeholder. Die Funktionsbewertung aus der Perspektive des Handwerksbetriebs wurde mit dem am Projekt beteiligten Handwerksbetrieb durchgeführt. Dabei wurde der paarweise Vergleich auf Basis einer Microsoft Excel-basierten Matrix vorgenommen. Es hat sich gezeigt, dass diese Art der Bewertung verhältnismäßig zeitaufwendig ist, da für eine Bewertung von 28 Funktionen 378 Entscheidungen getroffen werden müssen. Zwar unterstützt die Matrixdarstellung die Fortschrittsanzeige, jedoch benötigt selbst eine drei-stufige Entscheidungsskala zwischen „wichtiger“, „unwichtiger“ oder „gleich bedeutend“ ungefähr 60 Minuten für die vollständige Bewertung. Auf Grund dieser Erfahrungen wurde für die Kundenbefragung ein Fragebogen entworfen. Dieser erleichtert die Befragung sowohl seitens des Verständnisses als auch hinsichtlich des zeitlichen Aufwands merklich.

Es ist anzumerken, dass die Ergebnisse der fragebogenbasierten Funktionsbewertung weniger präzise sind, da nicht alle Funktionen miteinander verglichen werden. Stattdessen werden die detaillierten Vergleiche anschließend berechnet. Diese Ungenauigkeit kann aber aus Sicht der Autoren vernachlässigt werden. In der Darstellung der Ergebnisse weist die entwickelte Methode eine gewisse Scheingenauigkeit auf. Die Bestimmung der Funktionsgewichtung sowohl mittels Matrix als auch mittels Fragebogen ermöglicht ausschließlich eine Rangfolge der Funktionen entlang ihrer Wichtigkeit für den jeweiligen Stakeholder. Die gezeigten Prozentwerte sind eine rechnerische Größe, welche sich bei der Annahme von äquidistanten Abständen der Funktionen ergeben. Diese Annahme kann jedoch deswegen übernommen werden, da das Ergebnis der Funktionskostenanalyse in dieser Anwendung lediglich Hinweise zur Optimierung von solarthermischen Anlagen liefert und keine dedizierten Aussagen treffen soll, um welchen Grad einzelne Designparameter justiert werden müssen.

Ein Ergebnis des Arbeitspaketes zeigt Abbildung 6-1. Hier wird der Nutzen- und Wertanteil einer solarthermischen Kombianlage aus der Sicht des Kunden dargestellt. Es wird deutlich, dass bereits viele der abgefragten Funktionen in der definierten Zielkostenzone liegen. Allerdings zeigt die Darstellung auch, dass die Funktion „Wärmeenergie an Fluid binden“ (dunkelblaue Raute) mit einem Wertanteil von 18,08 % und einem Nutzenanteil von 5,70 % in ihrer aktuellen Realisierung deutlich zu kostenintensiv ist bzw. der Kunde andere Funktionen deutlich stärker wertschätzt. Diese Erkenntnis lässt sich als Indikator dafür werten, dass eine weitere Steigerung des Wirkungsgrads von solarthermischen Kombianalagen nicht mit höheren Preisen am Markt honoriert wird. Stattdessen sollten andere Funktionen der Anlage weiter ausgebaut werden. Ein Hinweis für weitere Entwicklungstrends lässt sich ebenfalls bereits erkennen. So wird die Funktion „Legionellenprävention“ (dunkelrote Raute) oder „Sicherheitsregelungen des Systems“ (orange Raute) von Kunden relativ als sehr wichtig erachtet.

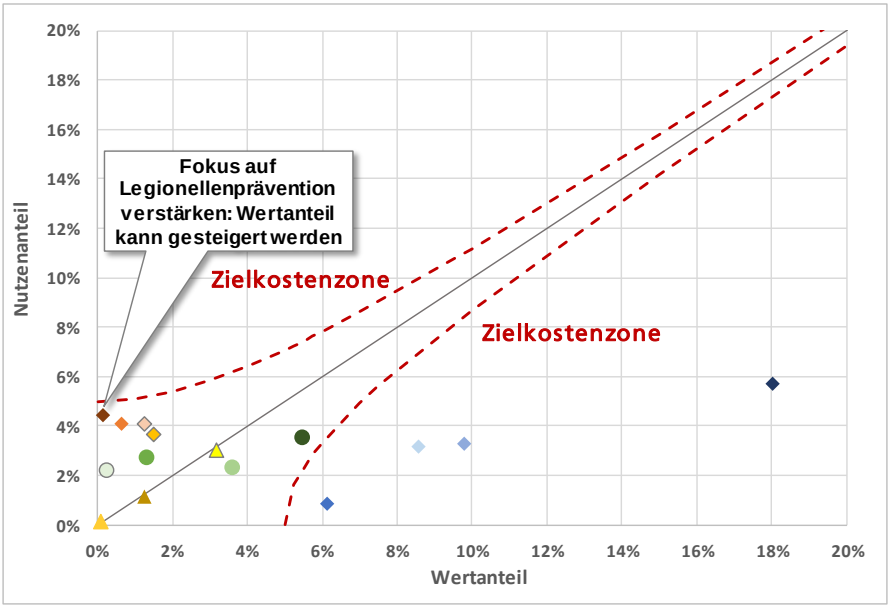


Abbildung 6-1: Handlungsfeld Trinkwasserhygiene aus Sicht des Kunden für Variante *zSL*

Ein weiteres Ergebnis des Arbeitspaktes zeigt Abbildung 6-2. Das Diagramm bildet den Nutzen- und Funktionsanteil von 10 ausgewählten Funktionen einer solarthermischen Kombianlage aus der Perspektive des Kunden und auch des Handwerks ab. Dabei bleibt die kostenseitige Bewertung der Funktionen unberührt. Die Bewertung der solarthermischen Kombianlage durch unterschiedliche Stakeholder wirkt sich ausschließlich auf die Nutzenwerte aus. So lässt sich zeigen, dass Funktionen aus unterschiedlichen Perspektiven bewertet auch einen nahezu identischen Nutzenwert aufweisen können. Ein Beispiel hierfür ist die Funktion „Abdichtung gegenüber Staub/ Schmutz". Aus Sicht des Forschungsprojekts sind jedoch die unterschiedlichen Bewertungen interessanter. Beispielsweise liegen deutliche Unterschiede in der Bewertung der Funktionen „Temperaturschichtung sicherstellen" oder „Strahlungskonversion" durch Handwerk und Kunde vor. Für den ersten Fall, lässt sich diese eventuell damit erklären, dass einem durchschnittlichen Kunden das detaillierte technische Verständnis für die Auswirkungen der Temperaturschichtung im Wärmespeicher der solarthermischen Kombianlage fehlt und somit die Funktion unterbewertet wird. Umgekehrt verhält es sich mit der Funktion „Strahlungskonversion". Dort ist es denkbar, dass der Kunde diese Funktion in seiner Wichtigkeit überbewertet, da er die Gesamtfunktionalität des Systems in diese Funktion projiziert. Im umgekehrten Fall ist jedoch auch ebenfalls denkbar, dass Funktionen, welche die Effizienz des Gesamtsystems beschreiben im Handwerk niedriger bewertet werden, als Funktionen, welche auf die Montier- oder Wartbarkeit des Systems abzielen. Diese Funktionen betreffen den montierenden Handwerksbetrieb stärker als die konkrete Leistungsfähigkeit der solarthermischen Anlage.

Als Ergebnis des Forschungsprojekts kann so eindrucksvoll gezeigt werden, dass eine einseitige Bewertung von solarthermischen Kombianlagen ausschließlich aus einer Perspektive zu einem verzerrten Bild bezüglich der Entwicklungspotenziale führt. Erst durch das Gesamtbild aller beteiligten Anspruchsgruppen an die Anlage ergeben sich sinnvolle Optimierungspotenziale. Dabei wird auch deutlich, dass zukünftig vor allem auch das Handwerk stärker eingebunden werden sollte, da dort ein detailliertes Wissen verborgen ist.

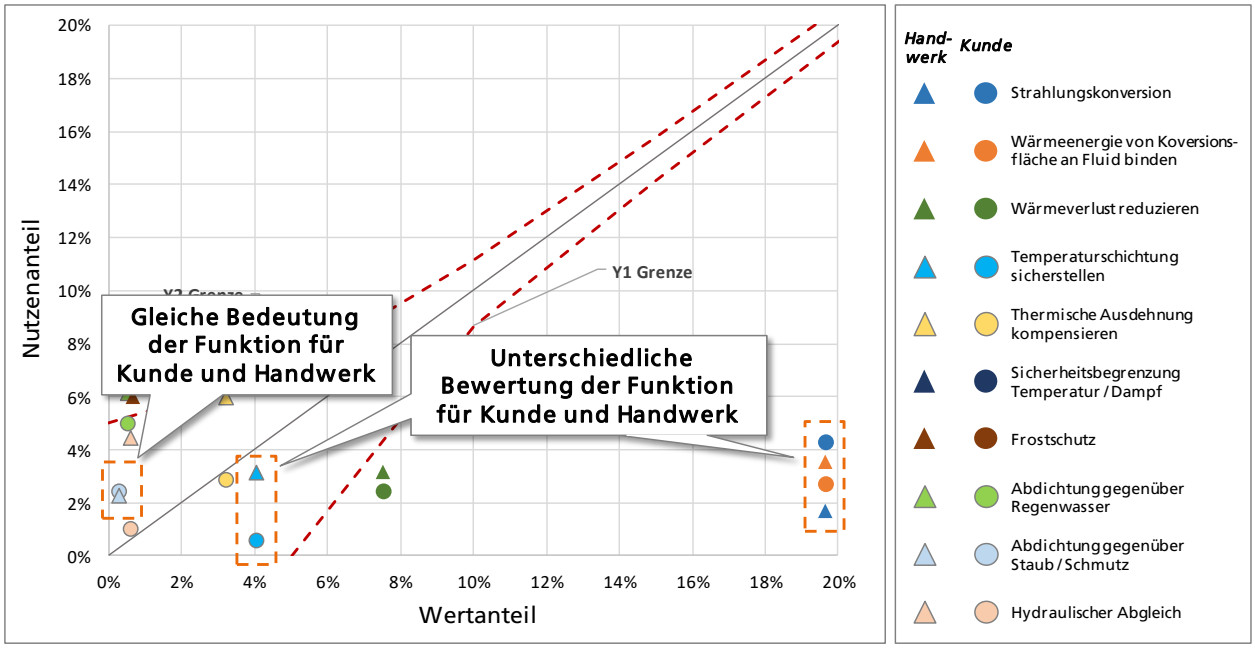


Abbildung 6-2: Vergleich ausgewählter Funktionen aus Kunden- und Handwerksicht im Zielkostenkontrolldiagramm für Variante *zSL*

6.2 Komplexitätskostenanalyse

Zur Validierung der beschriebenen Methodenschritte der Komplexitätskostenanalyse wurden diese vollständig mit dem beteiligten industriellen Projektpartner durchlaufen. Dazu werden im Folgenden die unternehmensinternen Ergebnisse anonymisiert, die unternehmensübergreifenden Ergebnisse vorgestellt und auf Limitationen der Ergebnisse hingewiesen.

Für den beteiligten industriellen Projektpartner stellt das vollständige Komplexitätskostenmodell des Unternehmens das zentrale Ergebnis dieses Arbeitspakets dar. Dazu zeigt Abbildung 6-3 beispielhaft den Anwendungsfall der Bewertung eines neuen mechanischen Bauteils. Es wird deutlich, dass die mechanische Konstruktion eines mechanischen Bauteils zunächst in der Entwicklung finanzielle Aufwände in der Höhe von 510,11 € erzeugt. Die elektrische Konstruktion ist in diesem Anwendungsfall nicht betroffen, sodass hier keine Aufwände berücksichtigt werden müssen. Für die Durchführung der Funktionsüberprüfung fallen einmalig Aufwände in Höhe von 169,65 € an. So lassen sich systematisch die einmaligen und laufenden Aufwände aller Unternehmensbereiche auflisten und zu einem durchgängigen Anwendungsfall konfigurieren. Das Ergebnis für ein neues mechanisches Bauteil ergibt sich zu 5.207,30 € im ersten Jahr. Die laufenden Kosten aller drauffolgenden Jahre betragen 608,37 € pro Jahr. Die Kosten beinhalten keine Herstellungs- oder Materialkosten. Sie veranschaulichen lediglich den notwendigen finanziellen Aufwand dafür, dass dieses Bauteil im Unternehmen „lebendig bleibt“ und produziert werden könnte.

So ist ein erstes Ergebnis des Arbeitspakets das Aufdecken von bislang intransparenten, da in den Gemeinkosten enthaltenen, Kosten der Wertschöpfungskette eines Unternehmens der Solarthermiebranche. Mithilfe dieses Ergebnisses können vor allem Variantenentscheidungen besser getroffen werden, da die vollständigen finanziellen Auswirkungen konstruktiv neuer Varianten auf das Unternehmen sichtbar werden.

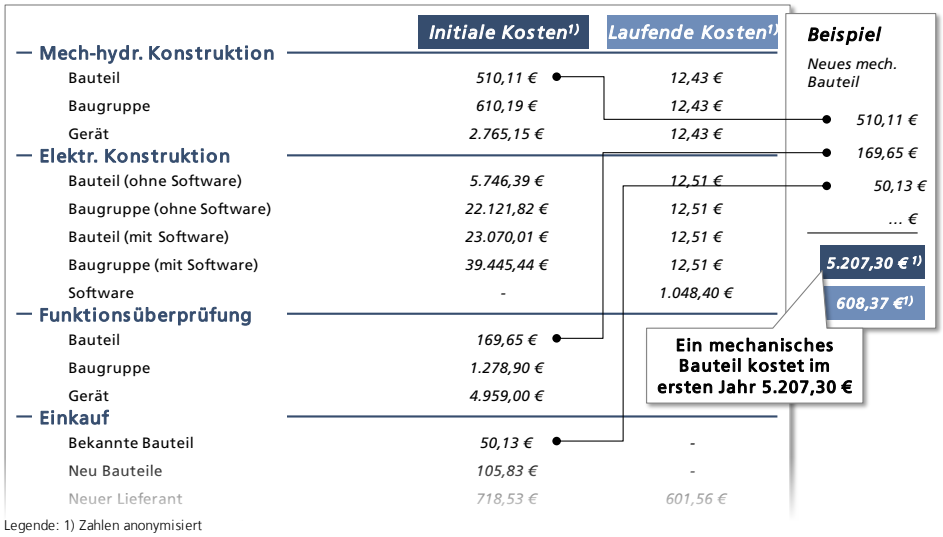


Abbildung 6-3: Ausschnitt der kostentreiberbasierten Evaluierung für ein neues mechanisches Bauteil

Das zweite Ziel des Forschungsprojekts war der Übertrag dieser Transparenz auf die vollständige Wertschöpfungskette der Branche. Auch hier muss zunächst auf die Limitationen der Ergebnisse eingegangen werden. Wie bereits oben beschrieben, ist es nicht möglich einheitliche Komplexitätskostentreiber für die gesamte Wertschöpfungskette zu ermitteln.

Die Lösung zum Erreichen des definierten Ziels liegt darin, für eine gesamtheitliche Betrachtung der Wertschöpfungskette und der Vergleichbarkeit zwischen den Akteuren die Komplexitätstreiber der jeweiligen Prozesskostenmodelle von Zulieferer, Hersteller und Handwerk zu aggregieren und möglichst zu standardisieren (vgl. Abbildung 6-4). Das bedeutet, dass Kostentreiber funktionsübergreifend betrachtet und bei inhaltlicher Ähnlichkeit zusammengefasst werden.

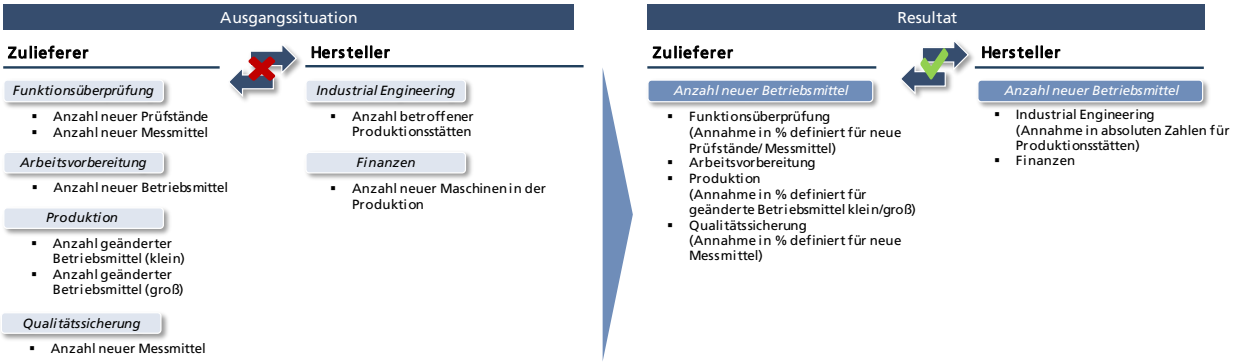


Abbildung 6-4: Beispiel der Aggregation und Standardisierung von Kostentreibern zwischen Zulieferer und Hersteller

Anhand der so standardisierten und aggregierten Kostentreiber sind Referenzfälle nicht nur innerhalb der eigenen Wertschöpfungsleistung je Akteur erstellbar, sondern können vielmehr in ihrer gesamtheitlichen Auswirkung auf die Wertschöpfungskette betrachtet werden, was Ausgangspunkt des Bedarfs zum Einsatz der Prozesskostenanalyse im Rahmen dieses Forschungsprojektes darstellt. Dazu zeigt Abbildung 6-5 exemplarisch die durchgängige Betrachtung die Änderungen einer Komponente einer solarthermischen Kombianlage. Es wird deutlich, dass diese verhältnismäßig geringe Kostenänderung beim Zulieferer, vor allem beim Systemhersteller um ca. 400 % höhere Kosten hervorruft. Dieses Ergebnis zeigt eindrucksvoll die Notwendigkeit die vollständige Wert-

schöpfungskette bei der Bewertung von Produktoptimierungen zu betrachten. Nur so kann eine branchenweite Optimierung von solarthermischen Anlagen erreicht werden. Dazu liefern die in diesem Forschungsprojekt erstellten Kostenmodelle erste Hinweise, welche Auswirkungen Produktänderungen in einem Glied der Lieferkette haben können. Zusätzlich befähigt die vollständige Methodik des Forschungsprojektes Unternehmen der Solarthermiebranche diese Kosten im Detail zu ermitteln und so auch, anstelle eines Teilbereichs, die gesamte Wertschöpfungskette zu optimieren.

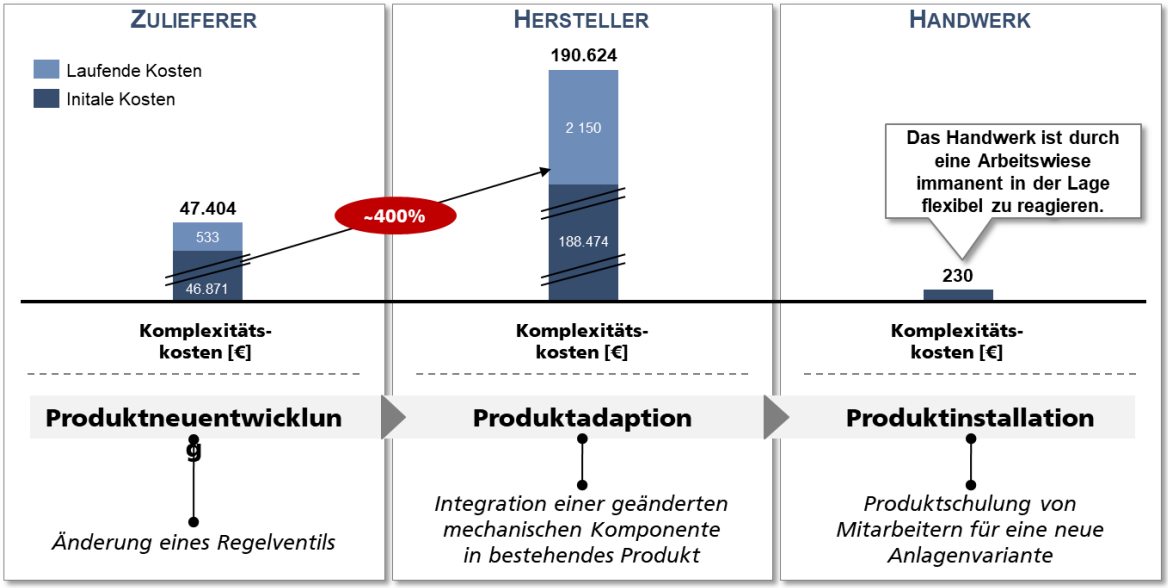


Abbildung 6-5: Beispielhafte Betrachtung der Komplexitätskosten in der Wertschöpfungskette

6.3 Energetische Analyse

Das zentrale Ergebnis der energetischen Analyse betrifft auf der einen Seite die Anlageneffizienz in Form der Wärmeverteilverluste der drei betrachteten Varianten zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser und auf der anderen Seite die daraus resultierenden Temperaturprofile in der Anlagentechnik. Entsprechend der Abbildung 6-6 reduzieren sich Wärmeverteilverluste bezogen auf die Variante zSL um 9 % durch den Einsatz der Variante zDF und um 15 % durch den Einsatz der Variante dDF.

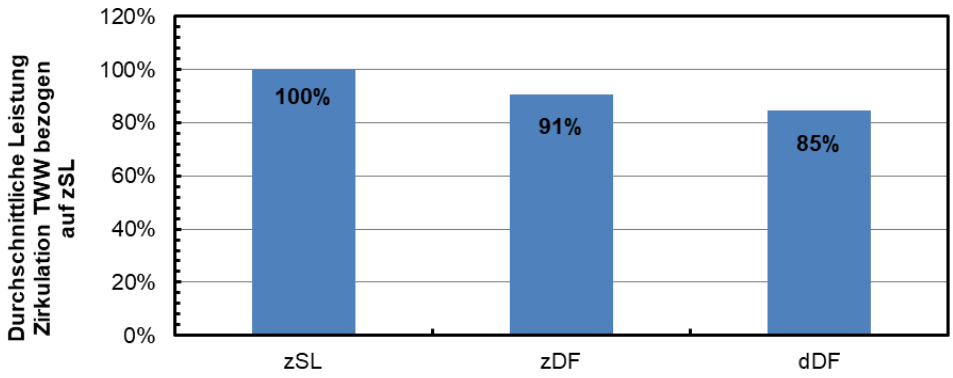


Abbildung 6-6: Reduktion der jährlichen und im Gebäude nicht nutzbaren Wärmeverluste für Zirkulation zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser bezogen auf zSL

Für den hier anzustellenden Vergleich der Varianten wird die Dimensionierung des solarthermischen Wärmeerzeugers in jeder Variante so eingestellt, dass sich der gleiche solarthermische Deckungsanteil in Höhe von 60 % am gezapften Trinkwarmwasser, wie bei der Variante zSL ergibt. Damit ergeben sich insbesondere auf Grund der unterschiedlichen Temperaturprofile in der Anlagentechnik die in der Abbildung 6-7 dargestellten Dimensionierungen des solarthermischen Wärmeerzeugers bezogen auf die energetisch am wenigsten effiziente Variante zSL.

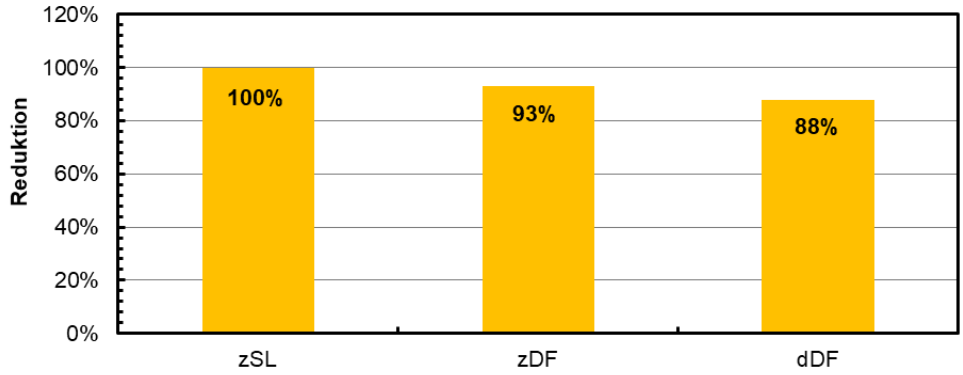


Abbildung 6-7: Reduktion Dimensionierung solarthermischer Wärmeerzeuger bezogen auf zSL

Diese Reduktion der Dimensionierung des solarthermischen Wärmeerzeugers ist die Grundlage für die im nächsten Modul auszuführende wirtschaftliche Betrachtung.

6.4 Wirtschaftliche Analyse

Aus der Funktionskostenanalyse gehen zunächst die IST-Kosten für die einzelnen Komponenten einer solarthermischen Kombianalage hervor. Diese zeigt exemplarisch Abbildung 6-8 in Form der relativen Anteile der jeweiligen Baugruppen an den Investitionskosten. Diese unterscheiden sich nicht signifikant über die drei betrachteten technologischen Varianten.

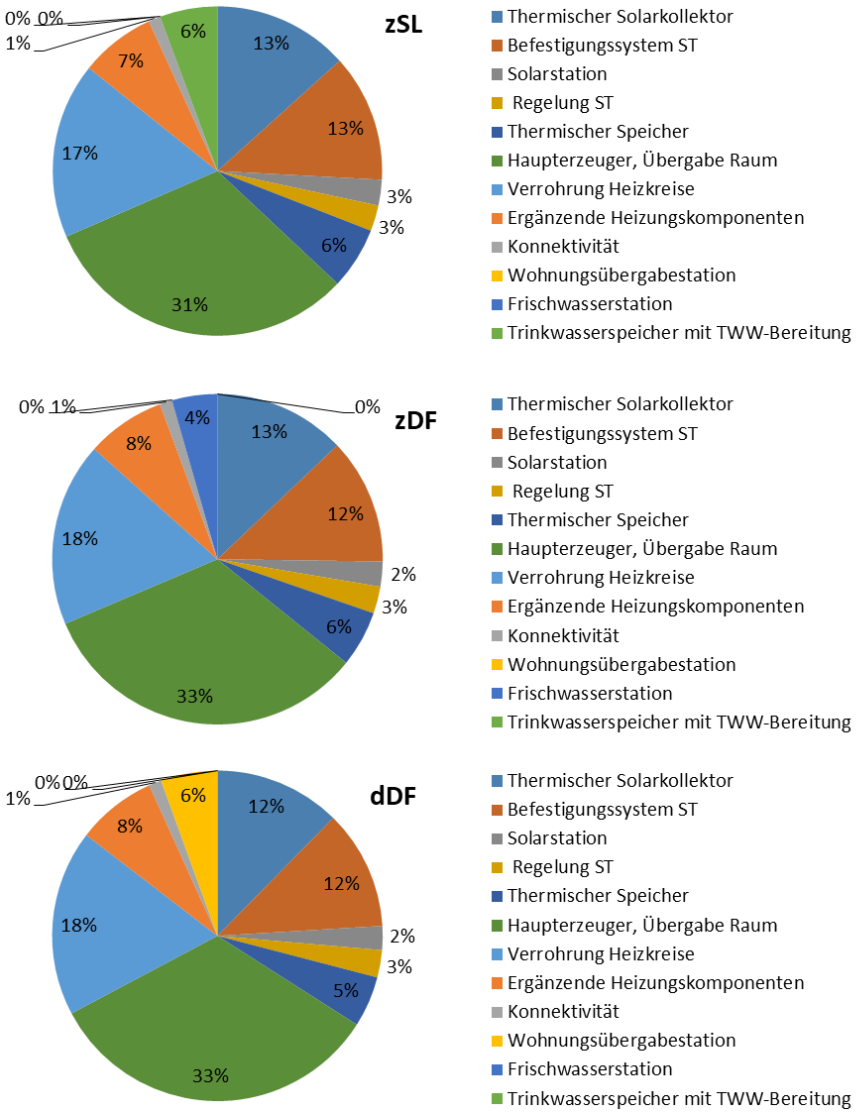


Abbildung 6-8: Investitionskostenverteilung auf die Komponenten (IST) als Ergebnis der Funktionskostenanalyse für das System Speicherlade (zSL), Frischwasserstation (zDF) und Wohnungsübergabestation (dDF)

In der folgenden Abbildung 6-9 werden die gesamten jährlichen Kosten für die einzelnen Varianten aufgeführt.

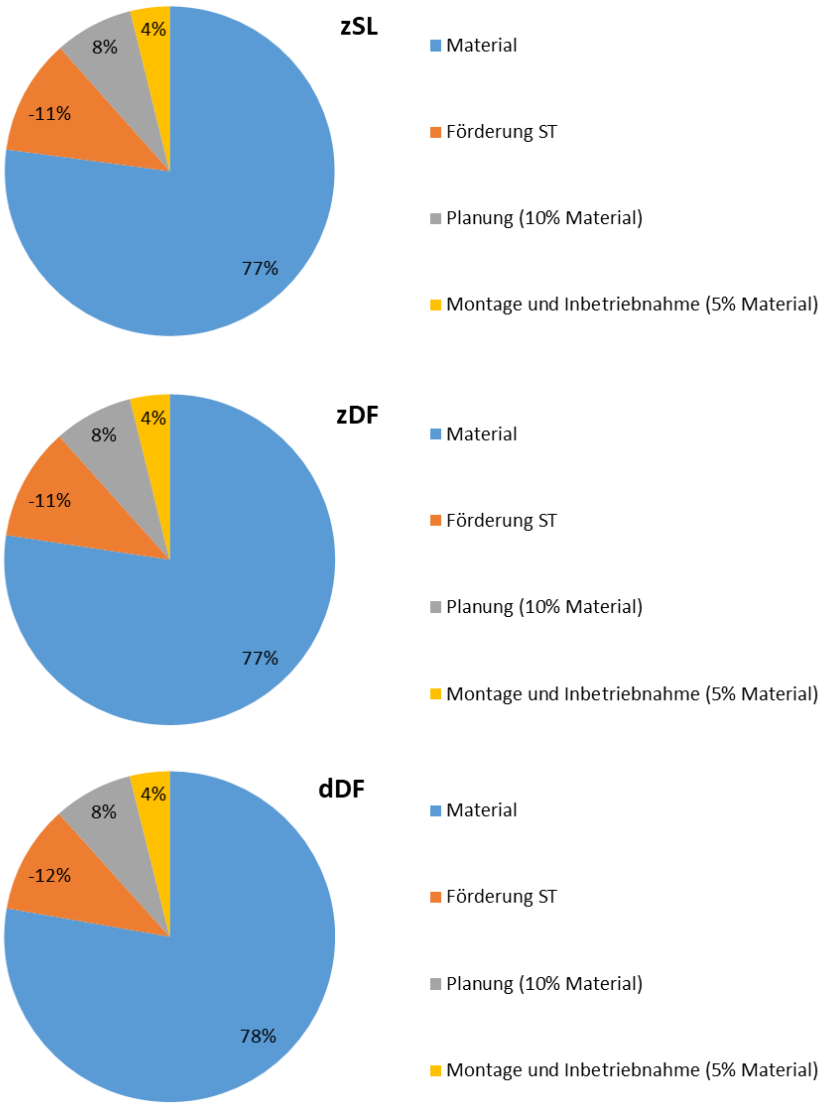


Abbildung 6-9: Jährliche Gesamtkostenverteilung auf die Komponenten (IST) als Ergebnis der Funktionskostenanalyse für das System Speicherlade (zSL), Frischwasserstation (zDF) und Wohnungsübergabestation (dDF)

Es zeigt sich auch hier, dass keine signifikanten Unterschiede in der Kostenstruktur über die betrachteten Varianten vorliegen.

6.5 Zusammenfassung der Gesamtbetrachtung

Mittels der dargestellten Fallstudien lassen sich für jedes der eingeführten Module Optimierungen durchführen. In der Gesamtbetrachtung muss jedes Modul für sich selbstständig optimiert werden und dann iterativ mit den anderen Modulen abgeglichen werden. Eine durchgängige rechnerunterstützte Optimierung mittels globaler Variablen ist nicht möglich.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen von *TEWISol* wird methodisch einer zur Analyse der Wärmegestehungskosten in der Heizungsbranche aus insgesamt vier Modulen aufgebauter Optimierungskreislauf entwickelt. Dabei werden auf der einen Seite die auflaufenden Kosten der beteiligten Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette mittels wirtschaftswissenschaftlicher Methoden insbesondere hinsichtlich den nicht produktbehafteten, indirekten Kosten modelliert und in das Verhältnis zur energetischen Performance der gesamten Anlage zur Wärmeversorgung gesetzt. Mit dem Vorgehen werden insbesondere für einen Industriebetrieb etablierte Methoden zur Funktions- und Prozesskostenanalyse auf den in der Heizungstechnik typischen Anwendungsfall mit mehreren Stakeholdern einer Wertschöpfungskette hin adaptiert und mit den im Projekt beteiligten Stakeholdern an einem Referenzfall beispielhaft umgesetzt.

Im Modul 1 wird dabei die Methode der Wertanalyse entsprechend erweitert, auf die einzelnen Stakeholder der Heizungsbranche adaptiert und eine Funktionskostenanalyse aufgesetzt. Hierfür werden insgesamt die vier spezifischen Methodenschritte

- Aufbau einer Funktionsstruktur
- Aufbau einer generischen Produktstruktur
- Zuordnung von Komponenten zu Funktionen
- Bewertung des Zielwertes von einzelnen Komponenten

aufgezeigt und hinsichtlich einer funktionsorientierten sowie komponentenorientierten Auswertung umgesetzt. Es zeigt sich dabei, dass der zentrale Schritt der Methode und damit auch des Forschungsprojekts die Bewertung der Funktionen aus der Perspektive unterschiedlicher Stakeholder ist. Ein Zusammenführen der einzelnen „Sichtweisen-Modelle" der Stakeholder zu einer eindeutigen, finalen Betrachtung ist nicht möglich, da eine Betrachtung immer aus der jeweiligen Perspektive des entsprechenden Stakeholders erfolgen muss. Als Ergebnis des Forschungsprojekts kann eindrucksvoll gezeigt werden, dass eine einseitige Bewertung von solarthermischen Kombianlagen ausschließlich aus einer Stakeholder-Perspektive zu einem verzerrten Bild bezüglich der Entwicklungspotenziale führt. Erst durch das Gesamtbild aller beteiligten Anspruchsgruppen an die Anlage ergeben sich sinnvolle Optimierungspotenziale. Dabei wird auch deutlich, dass zukünftig vor allem auch das Handwerk stärker eingebunden werden sollte, da dort ein detailliertes Wissen verborgen ist.

In Modul 2 wird mit der Prozesskostenanalyse ein vollständig entwickeltes und für den beteiligten industriellen Projektpartner auch anhand von Referenzfällen beispielhaft validiertes Komplexitätskostenmodell eines Unternehmens aus der Heizungsbranche aufgebaut. Es wird methodisch in den folgenden Schritten vorgegangen:

- Aufbau eines Prozessmodells
- Erfassung der Komplexitätstreiber
- Ableitung Gesamtmodell für Komplexitätstreiber
- Bewertung von Referenzfällen

Wie bei den Funktionskosten ist es auch an dieser Stelle nicht möglich, die Komplexitätstreiber der verschiedenen Wertschöpfungsstufen inhaltlich über einheitliche Komplexitätskostentreiber für die gesamte Wertschöpfungskette in Bezug zu setzen, daher werden für die weiteren Stakeholder separate Komplexitätskostenmodelle für den Systemhersteller sowie einen Handwerksbetrieb erstellt. Exemplarisch wird eine durchgängige Betrachtung für die Prozessschritte zur konstruktiven Änderungen einer Komponente einer solarthermischen Kombianlage aufgezeigt. Es wird deutlich, dass diese verhältnismäßig geringe Kostenänderung beim Zulieferer vor allem beim Systemhersteller um ca. 400 % höhere Kosten hervorruft. Der Stakeholder Handwerk ist dagegen für dieses Beispiel

bedingt durch seine Arbeitsweise immanent in der Lage, flexibel zu reagieren und von dieser Adaption kostenseitig kaum betroffen. Dieses Ergebnis zeigt eindrucksvoll die Notwendigkeit, die vollständige Wertschöpfungskette bei der Bewertung von Produktoptimierungen zu betrachten.

Im Rahmen von Modul 3 werden auf der einen Seite drei Warmwasserspeicher mit jeweils unterschiedlichen Konstruktionsmerkmalen und auf der anderen Seite eine Wohnungsstation mit unterschiedlichen Ausprägungen zur Wärmeübertragung messtechnisch analysiert und zur Modellierung von mit den Messdaten abgestimmten Systemen zur solarthermisch unterstützten Wärmeversorgung eines Mehrfamilienwohngebäudes herangezogen. Mittels den auf der Prüfsequenz EN 12977-3:2016 für Warmwasserspeicher basierenden Messdaten werden mehrere Ansätze für Modelle in der Simulationsumgebung Dymola/Modelica validiert und zu einem konsistenten Modell zusammengeführt. Damit können insbesondere die untersuchten Varianten zur Trinkwarmwassererzeugung als temperatursensitiven Prozesse, die mit der Temperaturschichtung der Warmwasserspeicher in Wechselwirkung stehen, effektiv in der Simulationsumgebung Dymola/Modelica implementiert und final simulationstechnisch abgebildet werden.

Die Zusammenführung der wirtschaftlichen und energetischen Methoden wird mit dem Modul 4 erreicht, in dem die Funktionskosten über die Annuitätenmethode mit den energetischen Werten der simulierten Anlagenvarianten zusammengebracht werden. Es kann damit exemplarisch gezeigt werden, dass sich die Wärmegestehungskosten für die untersuchten und am Markt verfügbaren Technologien zur Trinkwarmwassererzeugung nicht signifikant voneinander unterscheiden. Hier sind andere in erster Linie monetär nur schwer erfassbare Kriterien, wie die mit der Trinkwasserhygiene einhergehenden Risiken oder die mit der Organisation der Zugänglichkeit und Wartung von kleinteilig ausgeführten dezentralisierten Anlagen einhergehenden Aufwände zu bewerten.

Beispielhaft wird eine Standardisierung von Komponenten in der Heizungstechnik aufgezeigt, der eine konstruktionsbedingte Variantenänderung beim Zulieferer zu Grunde liegt. Mit einer Betrachtung der relevanten Kostenpositionen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg liegen die wesentlichen Kosten in den mit einer Adaption bedingten, indirekten Kostengruppen auf Seiten der Hersteller/Systemanbieter.

Literaturverzeichnis

Coenenberg, A. G.; Fischer, T. M.; Günther, T., Kostenrechnung und Kostenanalyse,, 7., überarb. und erw. Aufl., Stuttgart, Schäffer-Poeschel, 2009.

Cooper, R.; Slagmulder, R., Target costing and value engineering,, [Nachdr.], Portland, Or., Productivity Press, 1998.

Deutsches Institut für Normung e.V.DIN EN 12973 2002

Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 1988-300: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 300: Ermittlung der Rohrdurchmesser; Technische Regel des DVGW, Berlin, Mai 2012.

Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 12831-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Berlin, September 2017.

Fischer, J. O., Kostenbewusstes Konstruieren,, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2008.

Horsch, J., Kostenrechnung,, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.

Kim, I.-w.; Berry, E., Target Costing, In: Abdel-Kader, M. G. (Hrsg.): Review of Management Accounting Research, 1st ed. 2011; London: Palgrave Macmillan UK, 2014, S. 275-294.

Kremin-Buch, B., Strategisches Kostenmanagement,, 4. Aufl., s.l., Gabler Verlag, 2007.

Laasch, T.; Laasch, E., Haustechnik - Grundlagen Planung Ausführung,, 13. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2013.

Mengen, A.; Urmersbach, K., Prozesskostenrechnung im Industrieunternehmen, In: Controlling & Management, Nr. 450. Jg., 2006, S. 218-226.

Mohnkopf, H.; Hartmann, M.; Metze, G.; Schmeisser, W., Innovationserfolgsrechnung,, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2008.

Posluschny, P., Kostenrechnen leicht gemacht - Eine praktische Anleitung - von der Deckungsbeitrags- bis zur Prozesskostenrechnung,, 1. Aufl., München, Redline, 2009.

Schuh, G.; Bender, D., Grundlagen des Innovationsmanagements, In: Schuh, G. (Hrsg.): Innovationsmanagement - Handbuch Produktion und Management 3, 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl.; Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, S. 1-16.

Schuh, G.; Riesener, M., Produktkomplexität managen - Strategien - Methoden - Tools,, 3., vollständig überarbeitete Auflage, München, Hanser, 2017.

Wiest, R., Der Wertanalyse-ArbeitsplanWertanalyse - das Tool im Value Management, 6., neu bearb. und erw. Aufl., [korrigierter Nachdr.]; Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 39-52.