



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Masterthesis**

Kenneth Teetzen

## **Konzept- und Variantenvergleich für eine kombinierte, energieeffiziente Wärme- und Kälteerzeugung von Gebäuden**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Kenneth Teetzen**

# **Konzept- und Variantenvergleich für eine kombinierte, energieeffiziente Wärme- und Kälteerzeugung von Gebäuden**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

Im Studiengang Maschinenbau / Nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau  
am Departement Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

DB Station & Service AG  
Europaplatz 1  
10557 Berlin

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell  
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt

Abgabedatum: 30.06.2016

## Danksagung

Mein Dank gilt allen Personen, die mich während meines Studiums und der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt den beiden Prüfern.

Frau Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell danke ich für die hochschulseitige Betreuung dieser Arbeit.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt bedanken, der kurzfristig vor Beginn der Thesis die Aufgabe des Zweitprüfers übernommen hat.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die beide Korrektur gelesen haben und mich während der gesamten Zeit meines Studiums unterstützt haben.

# **Zusammenfassung**

**Kenneth Teetzen**

## **Thema der Masterthesis**

Konzept- und Variantenvergleich für eine kombinierte, energieeffiziente Wärme- und Kälteerzeugung von Gebäuden

## **Stichworte**

Gebäudesimulation, U-Werte, Dämmung, Emissionen, Wärme- und Kältebereitstellung, Transmissionswärmeverluste

## **Kurzzusammenfassung**

In dieser Masterthesis wird der energetische Ist-Zustand des Heidelberger Hauptbahnhofs ermittelt. Das bestehende Bahnhofsgebäude wird vollständig in ein Gebäudesimulationsprogramm überführt. Auf dieser Basis werden die Energiebedarfe bestimmt, mit dem Ziel, eine Bewertung gemäß EnEV vorzunehmen. Auf Grundlage dieser Simulationsergebnisse werden Handlungsbedarfe zur nachhaltigen Optimierung der Energiebedarfe abgeleitet. Abschließend wird die ökologische und ökonomische Wirksamkeit der Maßnahmen verglichen und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt.

**Kenneth Teetzen**

## **Master Thesis title**

Concept- and variation comparison for a combined energy-efficient warm- and cold-production of buildings

## **Keywords**

Building simulation, U-value, insulation, emissions, combined heat and cold production, transmission heat losses

## **Abstract**

The energetic actual state of the Heidelberg main station is determined in this master thesis. The outer shell of the existing building is transferred into a building simulation program. On this basis the buildings energy demands are calculated and an assessment in accordance to the EnEV can be done. Subsequently different measures for an energetic renovation are introduced, in order to optimize the energy consumption of the station. Finally, the effectiveness of the measures will be compared and a profitability analysis should be conducted.

# Aufgabenstellung

für die Masterthesis

von Herrn **Kenneth Teetzen**

Matrikel-Nummer: 1975265

**Thema:** Konzept- und Variantenvergleich für eine kombinierte, energieeffiziente Wärme- und Kälteerzeugung von Gebäuden

**Schwerpunkte:**

- Bestandsaufnahme der Gebäudeparameter für ein Planungsobjekt
- Erstellen eines Simulationsmodells
- Berechnung der Energiebedarfe
- Vergleich von Möglichkeiten zur Wärme- und Kälteerzeugung
- Berechnung der Gesamtwirtschaftlichkeit
- Bewertung der Konzepte unter Berücksichtigung der gesetzlichen Anforderungen

---

Datum

---

Erstprüfer/in

# Inhalt

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einführung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung in das Thema .....	1
1.2 Ziel der Arbeit .....	3
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
2.1 Begriffsdefinitionen .....	4
2.2 Die Energieeinsparverordnung.....	6
2.2.1 Die Entwicklung der Energieeinsparverordnung .....	6
2.2.2 Aufbau und Inhalt der Energieeinsparverordnung 2014/2016.....	7
2.2.3 Definition und Anforderungen von Nichtwohngebäuden .....	8
<b>3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof .....</b>	<b>9</b>
3.1 Aufbau des Planungsobjektes.....	10
3.1.1 Das Bestandsgebäude .....	10
3.1.2 Der Neubau.....	13
3.2 Auswahl der Simulationssoftware.....	14
3.3 Ermittlung der Gebäudeparameter .....	15
3.3.1 Das Bestandsgebäude .....	16
3.3.2 Der Neubau.....	17
3.4 Simulation des Jahres-Primär- und Endenergiebedarfs .....	18
3.4.1 Aufbau des Simulationsmodells.....	18
3.4.2 Simulationsergebnisse .....	26
3.4.3 Überprüfung der Simulationsergebnisse.....	28
3.4.4 Berechnungsbeispiel U-Wert und Transmissionswärmeverlust .....	29
3.5 Zusammenfassung .....	32
<b>4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf.....</b>	<b>35</b>
4.1 Maßnahmen zur Sanierung der Gebäudeaußenhülle.....	35
4.1.1 Maßnahme 1 - Sanierung der opaken Außenbauteile .....	36
4.1.2 Maßnahme 2 - Sanierung der transparenten Außenbauteile .....	38
4.1.3 Maßnahme 3 - Kombination von Maßnahme 1 + 2.....	40
4.1.4 Zusammenfassung der Maßnahmen 1 - 3.....	41

4.2	Konzepte zur Modernisierung der Anlagentechnik .....	43
4.2.1	Anlagenkonzept 1 - Blockheizkraftwerk + Spitzenlastkessel + Absorptionskältemaschine.....	44
4.2.2	Anlagenkonzept 2 – Fernwärmeversorgung + Absorptionskältemaschine .....	50
4.2.3	Anlagenkonzept 3 – Erdgas Wärmepumpe + PV-Anlage + Kompressionskältemaschine .....	52
4.3	Zusammenfassung .....	57
<b>5</b>	<b>Vergleich der Maßnahmen und Konzepte.....</b>	<b>59</b>
5.1	Auswahl der Kriterien .....	59
5.1.1	Kriterien ökonomischer Vergleich .....	59
5.1.2	Kriterien ökologischer Vergleich .....	60
5.2	Ökonomischer Vergleich .....	61
5.2.1	Kostenaufstellung für die Maßnahmen an der Außenhülle .....	61
5.2.2	Kostenaufstellung für die Konzepte an der Anlagentechnik .....	67
5.2.3	Ergebnis ökonomischer Vergleich .....	74
5.3	Ökologischer Vergleich .....	76
5.3.1	Treibhausgasemissionen für die Maßnahmen an der Gebäudehülle .....	76
5.3.2	Treibhausgasemissionen für die Konzepte an der Anlagentechnik.....	78
5.3.3	Bewertung des Treibhausgasemissionen .....	78
5.3.4	Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung .....	79
5.3.5	Ergebnis ökologischer Vergleich .....	83
5.4	Zusammenfassung .....	83
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>85</b>
	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>87</b>
	<b>Anhangsverzeichnis.....</b>	<b>XCII</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Aufteilung der Wärmeverluste eines Gebäudes .....	2
Abbildung 2.1 Energiebilanz eines Gebäudes .....	4
Abbildung 3.1 Foto des Heidelberger Hauptbahnhofs .....	9
Abbildung 3.2 Empfangshalle des Heidelberger Hauptbahnhofs .....	11
Abbildung 3.3 Eingangsbereich in die Schalterhalle und der Bürokomplex.....	12
Abbildung 3.4 Gastronomie am Heidelberger Hbf im südöstlichen Flügel.....	13
Abbildung 3.5 Grundriss Erdgeschoss incl. geplantem Neubau .....	14
Abbildung 3.6 Vorgehensweise beim Erstellen des Simulationsmodells.....	19
Abbildung 3.7 Übersicht Projektstruktur: Projekte und Varianten.....	19
Abbildung 3.8 Modelldarstellung im Grundriss: Außenwand, Türen, Fenstern.....	20
Abbildung 3.9 3D-Modell des Heidelberger Hauptbahnhofs Ansicht 1 .....	20
Abbildung 3.10 3D-Modell des Heidelberger Hauptbahnhofs Ansicht 2.....	21
Abbildung 3.11 Geometrische Auswahlparameter für Fenster .....	22
Abbildung 3.12 Auswahl der Raumprofile.....	22
Abbildung 3.13 Kennzeichnung der Räume im Modell .....	22
Abbildung 3.14 Nutzungsprofil für Zone 7 gem. DIN 18599 .....	23
Abbildung 3.15 Nutzungszonen im Simulationsmodell .....	23
Abbildung 3.16 Zuordnung des U-Wertes für ein einzelnes Bauteil .....	25
Abbildung 3.17 Zuordnung des U-Wertes in der Bauteilübersicht.....	25
Abbildung 3.18 Darstellung der Anlagentechnik im Simulationsmodell.....	26
Abbildung 3.19 Ertrag der PV-Anlage 1 (Neubau) .....	28
Abbildung 4.1 Energielabel für Maßnahme 1 .....	37
Abbildung 4.2 Energie-/Exergiefluss für Strom- und Wärmeerzeugung .....	44
Abbildung 4.3 Prinzipschaltbild von Kraft-Wärme-Kopplung .....	45
Abbildung 4.4 Aufbau einer Absorptionswärmepumpe .....	48
Abbildung 4.5 Übersicht Anlagentechnik – Konzept 1 .....	49
Abbildung 4.6 Technologische Einteilung von Wärmepumpen .....	53
Abbildung 4.7 Funktionsprinzip einer Wärmepumpe .....	54
Abbildung 4.8 3D-Modell der PV-Anlage 2 für Konzept 3 .....	56
Abbildung 5.1 Berechnungsergebnisse der Wirtschaftlichkeit - Maßnahme 1.....	63
Abbildung 5.2 Berechnungsergebnisse der Wirtschaftlichkeit - Maßnahme 2.....	65
Abbildung 5.3 Berechnungsergebnisse der Wirtschaftlichkeit - Maßnahme 3.....	67
Abbildung 5.4 Wartungs- und Instandhaltungskosten eines BHKW.....	70
Abbildung 5.5 Investitionskosten eines BHKW .....	70
Abbildung 5.6 Berechnungsergebnisse der Wirtschaftlichkeit – Konzept 3.....	74

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Auswahl von Primärenergiefaktoren nach DIN V 18599-1: 2011-12.....	7
Tabelle 3.1 Eckdaten des Heidelberger Hauptbahnhofs.....	10
Tabelle 3.2 Geschossanzahl und Nutzung der Flächen.....	10
Tabelle 3.3 Gebäudeparameter für den Gebäudebestand.....	16
Tabelle 3.4 Gebäudeparameter für den Neubau .....	17
Tabelle 3.5 Zonierung gemäß DIN V 18599-10 .....	24
Tabelle 3.6 Simulationsergebnisse des Ist-Zustandes.....	27
Tabelle 3.7 Vergleich des Wärmebedarfes zum Heizen zwischen Modell und Realität..	29
Tabelle 3.8 Schichtaufbau Dach.....	30
Tabelle 3.9 Kennwerte zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste.....	32
Tabelle 3.10 Zusammenfassung Berechnung Ist-Zustand.....	33
Tabelle 4.1 Vergleich der Wärmedurchgangskoeffizienten .....	36
Tabelle 4.2 Simulationsergebnisse - Maßnahme 1 .....	38
Tabelle 4.3 Simulationsergebnisse - Maßnahme 2.....	39
Tabelle 4.4 Simulationsergebnisse - Maßnahme 3.....	40
Tabelle 4.5 Übersicht der Simulationsergebnisse - Maßnahmen 1 - 3.....	41
Tabelle 4.6 Prozentuale Veränderung Simulationsergebnisse.....	42
Tabelle 4.7 Vergleich des Brennstoffbedarfs .....	42
Tabelle 4.8 Anlagenkennwerte Konzept 1 .....	49
Tabelle 4.9 Simulationsergebnisse - Konzept 1.....	50
Tabelle 4.10 Simulationsergebnisse - Konzept 2.....	51
Tabelle 4.11 Aufwandszahlen für Wärmepumpen .....	53
Tabelle 4.12 Simulationsergebnisse – Konzept 3.....	56
Tabelle 4.13 Zusammenfassung der Anlagenkonzepte 1 - 3.....	58
Tabelle 4.14 Übersicht der Simulationsergebnisse Anlagenkonzepte 1 - 3.....	58
Tabelle 5.1 Festlegung und Gewichtung der ökologischen Kriterien.....	60
Tabelle 5.2 Betriebs- und Brennstoffkosten Ist-Zustand .....	61
Tabelle 5.3 Betriebs- und Brennstoffkosten - Maßnahme 1 .....	62
Tabelle 5.4 Investitionskosten - Maßnahme 1 .....	63
Tabelle 5.5 Betriebs- und Brennstoffkosten - Maßnahme 2.....	64
Tabelle 5.6 Investitionskosten - Maßnahme 2 .....	64
Tabelle 5.7 Betriebs- und Brennstoffkosten - Maßnahme 3.....	66
Tabelle 5.8 Investitionskosten - Maßnahme 3 .....	66
Tabelle 5.9 Wartungs- und Instandhaltungskosten von Anlagentechnik .....	68
Tabelle 5.10 Betriebs- und Brennstoffkosten - Konzept 1 .....	69
Tabelle 5.11 Investitionskosten - Konzept 1 .....	69
Tabelle 5.12 Betriebs- und Brennstoffkosten - Konzept 2.....	71
Tabelle 5.13 Investitionskosten - Konzept 2 .....	71
Tabelle 5.14 Betriebs- und Brennstoffkosten - Konzept 3.....	72
Tabelle 5.15 Investitionskosten - Konzept 3 .....	72
Tabelle 5.16 Zusammenfassung der Maßnahmen 1 - 3 .....	75
Tabelle 5.17 Zusammenfassung der Anlagenkonzepte 1 - 3.....	75
Tabelle 5.18 Spezifische Treibhausgasemissionen der Energieträger.....	76
Tabelle 5.19 Treibhausgasemissionen durch die Maßnahmen an der Gebäudehülle....	77
Tabelle 5.20 Treibhausgasemissionen durch die Konzepte für die Anlagentechnik.....	78
Tabelle 5.21 Kriterien zur Bewertung der Treibhausgasemissionen .....	79

Tabelle 5.22 Bewertung der Treibhausgasemissionen .....	79
Tabelle 5.23 Deutscher Strommix 2015.....	80
Tabelle 5.24 Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung: Gesamtergebnis erneuerbare Energien .....	81
Tabelle 5.25 Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung: Gesamtergebnis Strom.....	82
Tabelle 5.26 Gesamtergebnis ökologischer Vergleich .....	83
Tabelle 5.27 Kennzahlenvergleich der vorgestellten Maßnahmen und Konzepte .....	84

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
Abs. WP	Absorptionswärmepumpe
Abs.KM	Absorptionskältemaschine
BHKW	Blockheizkraftwerk
BJ	Baujahr
DENA	Deutsche Energie Agentur
EnEG	Energieeinsparungsgesetzes
EnEV	Energieeinsparverordnung
HeizAnIV	Heizungsanlagenverordnung
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KM	Kältemaschine
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
NWG	Nichtwohngebäude
PV-Anlage 1	Photovoltaik-Anlage auf dem Dach des Neubau
PV-Anlage 2	Photovoltaik-Anlage auf dem Dach des Bestandgebäudes
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
WG	Wohngebäude
WP	Wärmepumpe
WSchV	Wärmeschutzverordnung

# 1 Einführung

## 1.1 Einführung in das Thema

Begrenzte fossile Ressourcen, wie Erdöl, Erdgas und Kohle und ein stetig steigender Energiebedarf durch das Wachstum der Weltbevölkerung sowie ihren steigenden Bedürfnissen machen ein Umdenken im Umgang mit den noch vorhandenen Ressourcen zu einem globalen Thema. Weltweit sind die veränderten Lebensbedingungen durch die Veränderung des Klimas spürbar. Der Ausstoß von klimaschädlichen Abgasen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe muss reduziert werden, damit der Klimawandel gestoppt bzw. stark verlangsamt werden kann.

Nicht erst seit der bei uns in Deutschland eingeleiteten Energiewende in den 2000er Jahren ist bekannt, dass es für den nachhaltigen Betrieb von technischen Anlagen und Gebäuden sowie für die Bereitstellung von Energie (in Form von Wärme, Kälte, Strom) wichtig ist, veraltete Anlagen und alte Bausubstanzen zu modernisieren oder zu ersetzen, um die Verschwendung unwiederbringlicher Ressourcen und die Belastung der Umwelt deutlich zu reduzieren. Im Rahmen des Kyoto-Abkommens sowie den daraus abgeleiteten EU-Richtlinien hat Deutschland das Ziel bis 2020 seine CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 um 40% zu senken. Wesentlicher Bestandteil zum Erreichen dieses Ziels ist der Gebäudesektor, der für etwa 40 % des Energieverbrauchs in Deutschland verantwortlich ist.

In den vergangenen Jahren haben sich Unternehmen und Bauherren zunehmend mit Energiemanagement und Energieeffizienz auseinandersetzen müssen [1]. Während für die Industrie mit ihren Prozessen und technischen Anlagen unter anderem die Richtlinie „ISO 50001 – Energiemanagementsysteme: Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung“ maßgeblich ist, kommt für den Bereich der Gebäude- und Anlagentechnik die Energieeinsparverordnung, kurz EnEV, in ihrer aktuellsten Fassung zur Anwendung.

Die Energieeinsparverordnung ist im Jahr 2002 erstmals in Kraft getreten und zwischenzeitlich diversen Überarbeitungen unterzogen worden. Sie ist ein wichtiger Baustein der deutschen Energiepolitik hinsichtlich der Erreichung der angestrebten Klimaziele. Zielsetzung bei Bestands- und Neubauten ist die ganzheitliche Betrachtung und Bewertung der Anlagentechnik zur Energiebereitstellung, der Energieverteilung und des Gebäudekörpers. Nicht-fossile und regenerative Energieträger sollen forciert werden. Unterstützt werden die Vorgaben durch finanzielle Anreizsysteme der KfW Bank in Form von Zuschüssen, zinsgünstigen Darlehen und Tilgungserstattungen.

Wohn- und Nichtwohngebäude bieten ein enormes Energieeinsparpotential. Den Nichtwohngebäuden, die nur etwa 10 Prozent des Gebäudebestandes in Deutschland

## 1 Einführung

ausmachen, kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, denn auf sie entfällt über ein Drittel des Gebäudeenergiebedarfes [2].

Ein Großteil der genutzten Energie im Bereich von Wohn- und Nichtwohngebäuden, wird zum Heizen und Kühlen von Arbeits- und Wohnflächen benötigt. Neben der Behaglichkeit, die auf dem persönlichen Empfinden beruht, schreibt z.B. auch die Arbeitsstättenverordnung konkrete Temperaturen für den Arbeitsplatz vor. Je nach Tätigkeit und Arbeitsplatz darf diese zwischen 12°C Raumtemperatur bei schwerer körperlicher Arbeit im Stehen und 20°C bei sitzenden Arbeiten betragen [3]. Gerade im Winter, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft besonders hoch ist, führt die Wärmeleitung durch Bauteile bei schlechter Dämmung zu hohen Transmissionswärmeverlusten. Ziel ist es, die Energieverluste beim Betreiben eines Gebäudes so gering wie möglich zu halten. Über die exakten Energieverluste eines Gebäudes kann grundsätzlich nur im Einzelfall geurteilt werden, da kein Gebäude dem anderen gleicht. Die Größenordnung der Verluste lässt sich statistisch zusammenfassen und darstellen. In Abbildung 1.1 ist eine Unterteilung der Wärmeverluste eines Gebäudes dargestellt.

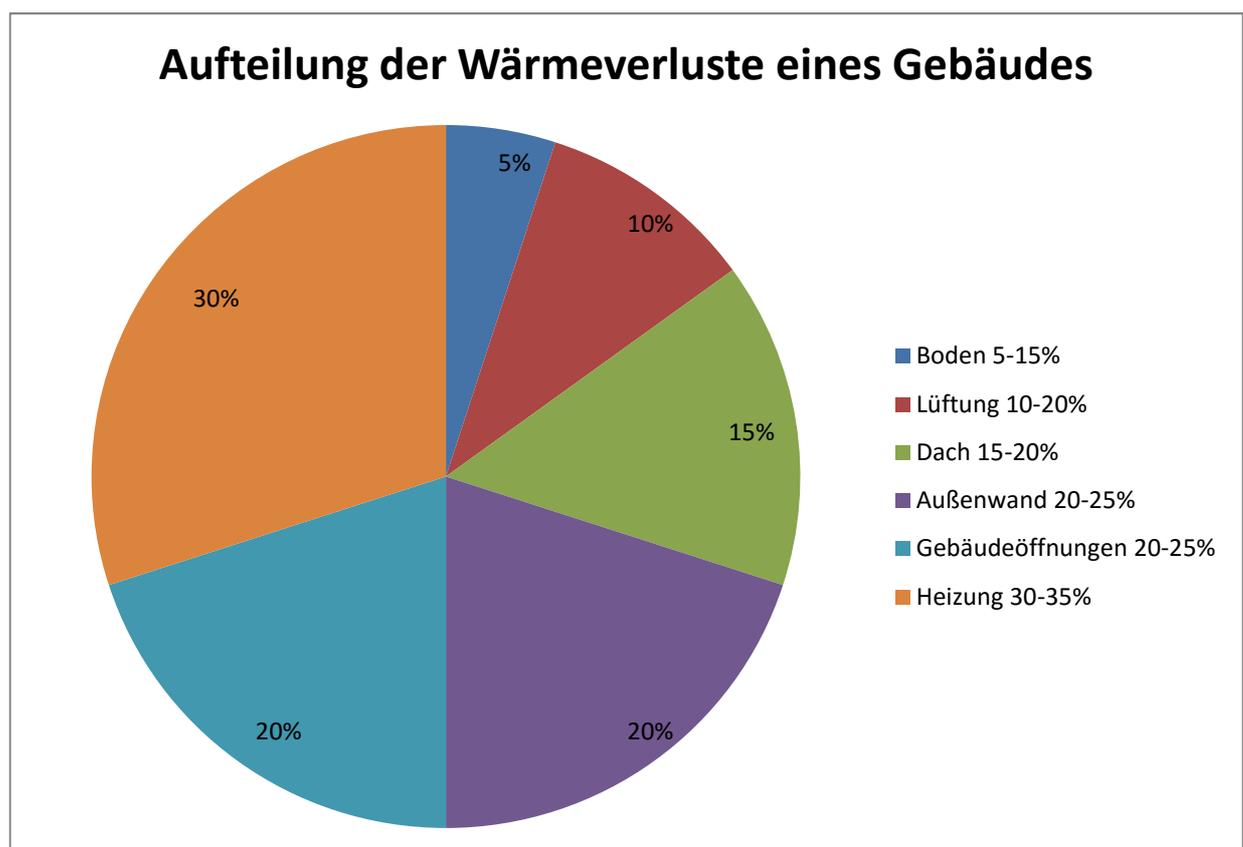


Abbildung 1.1 Aufteilung der Wärmeverluste eines Gebäudes, Quelle: [4]

## 1.2 Ziel der Masterarbeit

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, energetische Sanierungsmaßnahmen bzw. -Konzepte für ein Nichtwohngebäude vorzustellen. Diese sollen als Entscheidungshilfe für eine nachfolgende Planung mit eventueller Umsetzung dienen und aufzeigen, wie ein Planungsobjekt energetisch optimiert werden kann. Der Energiebedarf des Gebäudes und die damit verbundenen Betriebs- und Brennstoffkosten sollen gezielt durch Maßnahmen an der Anlagentechnik und der Gebäudehülle verringert werden und die erzeugte Wärme und Kälte effizienter genutzt und bereitgestellt werden. Dazu wird eine Bestandsaufnahme über den aktuellen Zustand eines Bestandsgebäudes und dessen Energiebedarf durchgeführt. Als Planungsobjekt für diese Masterarbeit wird der Heidelberger Hauptbahnhof herangezogen. Unter zur Hilfenahme einer Simulationssoftware lässt sich für den Ist-Zustand der theoretische Energiebedarf für die verschiedenen Energieträger bestimmen und eine Bewertung gemäß EnEV kann vorgenommen werden. Parallel erfolgt eine Plausibilitätsprüfung des Modells durch den Abgleich mit dem tatsächlich abgerechneten Heizwärmeverbrauch des aktuellen Energieversorgers.

Das Planungsobjekt wird in seinem aktuellen Zustand, inklusive eines neu geplanten Anbaus zur Erweiterung der Vermarktungs- und Büroflächen in einem Simulationsprogramm am Computer manuell erfasst. Die Deklaration der Flächennutzung für den vorliegenden Zustand und den vorgesehenen Neubau werden aus dem realen Objekt übernommen. Die vorhandene Anlagentechnik zur Wärme- und Kältebereitstellung wird als Planungsgrundlage mit herangezogen.

Im Zentrum der Abschlussarbeit steht das Erstellen eines Berechnungsmodells mit Hilfe einer Simulationssoftware, wie sie auch bei Architekten und Energieberatern zum Einsatz kommt, um den aktuellen Zustand des Gebäudes abzubilden. Auf Basis einer Bestandsaufnahme wird der aktuelle Zustand als Modell abgebildet. Anschließend werden durch Variation von Gebäudeparametern und Anlagentechnik Maßnahmen simuliert. Diese werden hinsichtlich ihres Einflusses auf den Endenergiebedarf, den Jahres-Primärenergiebedarf, die Emissionen sowie auf ihre Wirtschaftlichkeit hin verglichen und eine Handlungsempfehlung ausgesprochen. Für die Auswahl der Maßnahmen kommen folgende, in dieser Masterarbeit betrachtete Ansätze in Frage:

1. Modernisierung der Bausubstanz, im Wesentlichen an den gegen Kälte gerichteten Bauteilen (z.B. Dämmung der Außenwand, des Daches, des Fußbodens, der Fenster)
2. Modernisierung der Anlagentechnik (z.B. neue Wärme- und Kälteversorgung, PV-Anlage installieren)
3. Kombination von 1. und 2.

## 2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die wesentlichen für das weitere Verständnis der Arbeit notwendigen Definitionen und Fachbegriffe erläutert. Dabei wird ein grundsätzliches technisches Verständnis und Grundwissen vorausgesetzt. Anschließend wird ein kurzer Überblick über die gesetzlichen Anforderungen für Neu- und Bestandsbauten in Deutschland geliefert.

In Abbildung 2.1 wird die Zusammensetzung der Energiebilanz eines Gebäudes dargestellt. Ebenso können die nachfolgend definierten Begriffe entnommen werden.

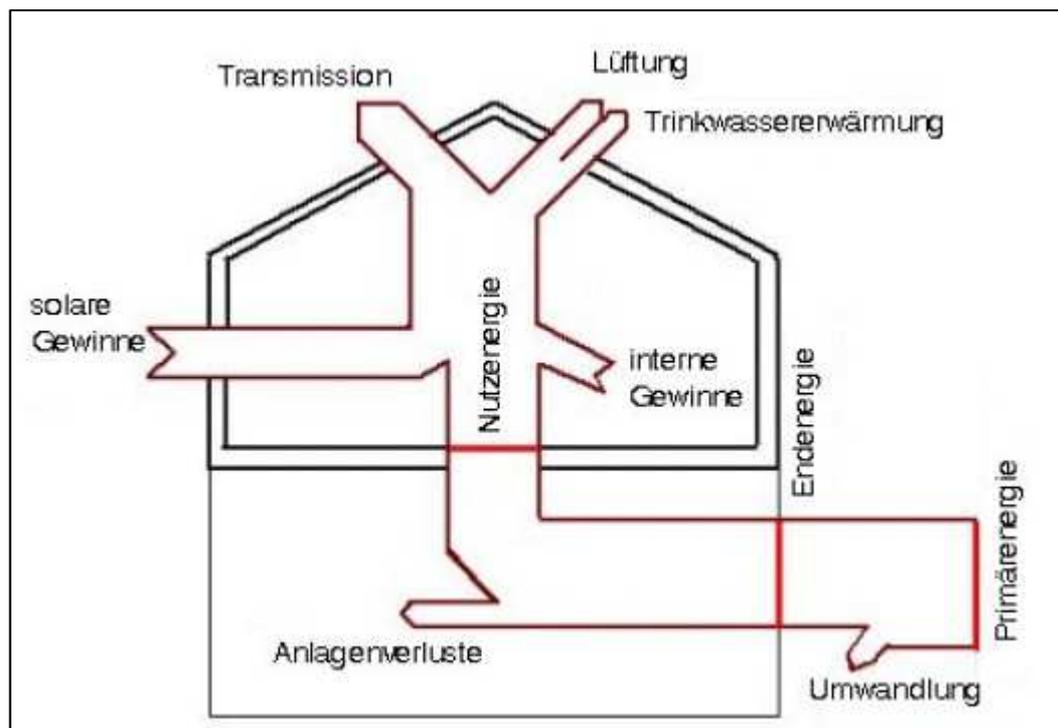


Abbildung 2.1 Energiebilanz eines Gebäudes [5]

### 2.1 Begriffsdefinitionen

**Endenergie:** Als Endenergie wird die Energie bezeichnet, die beim Verbraucher ankommt. Sie ist eine zur Verfügung stehende Energie innerhalb des Systems und ist eine Teilmenge der Primärenergie. Sie wird nach Abzug von Verlusten durch Gewinnung, Transport und Umwandlung bestimmt.

**Lüftungswärmeverlust:** Als Wärmeverluste werden die durch das Lüften eines Raumes oder Gebäudes innerhalb eines bestimmten Zeitraums Verluste bezeichnet. Dazu zählen vorhersehbare Verluste durch eine gezielte Be- und Entlüftung ebenso, wie Verluste durch Undichtigkeiten des Gebäudes, beispielsweise an Fenstern, Türen und Fugen.

## 2 Grundlagen

---

**Nutzenergie:** Die Nutzenergie ist der tatsächlich genutzte Anteil der Endenergie (Beispiel: Licht). Sie entspricht der Endenergie abzüglich der Anlagen- und Umwandlungsverluste.

**Primärenergie:** Dies bezeichnet den Energiegehalt des Energieträgers (zum Beispiel: Öl, Erdgas, Kohle) vor den Verlusten und der Umwandlung

**Primärenergiebedarf:** Der Primärenergiebedarf ist im Zusammenhang mit Gebäuden die Energiemenge, die zur Deckung der Heiz- und Warmwasserbedarfs notwendig ist. Dabei werden auch die Energiemengen berücksichtigt, die für die Gewinnung, Umwandlung und Verteilung notwendig sind.

**Strom (Hilfsenergie):** Bei den Gebäude- und Anlagenplanern gelten elektrische Energien, die unmittelbar mit der Versorgung des Gebäudes mit Raumwärme, Kälte oder Warmwasser in Verbindung stehen als Hilfsenergien. Zu den Nutzern der Hilfsenergie zählen Pumpen, Ventilatoren und elektrische Regeleinrichtungen. Ebenfalls geht der elektrische Energiebedarf der Beleuchtung in diese Größe mit ein.

**Transmissionswärmeverluste:** Als Transmissionswärmeverluste werden Verluste bezeichnet, die durch die Energieabgabe von Gebäuden an die Umwelt entstehen. Die Wärme verlässt das Gebäude als Folge der Wärmeleitung durch die Gebäudehülle von innen nach außen. Ziel bei Neubauten oder Sanierungen ist es, die Transmissionswärmeverluste durch entsprechende Gebäudedämmung so gering wie möglich zu halten, damit der Energieverbrauch sinkt und gleichzeitig der Wohnkomfort im Inneren steigt [6].

**Wärmedämmung:** Durch eine geeignete Wärmedämmung wird die Wärmeleitung durch die Gebäudehülle massiv reduziert. Sie bietet im Winter Schutz gegen Wärmeverluste von innen nach außen. Zur Gebäudedämmung können Fenster, Türen, Fassadendämmung, Decken und Böden sowie Innendämmung beitragen.

**Wärmedurchgangskoeffizient:** Der Wärmedurchgangskoeffizient, auch U-Wert genannt, ist ein Maß für den Wärmedurchgang von einer Seite eines festen Körpers zur anderen. Abhängig ist der U-Wert vom Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Fluid und Festkörper (auf beiden Seiten), der Wärmeleitfähigkeit des Festkörpers und dessen Geometrie. In SI-Einheiten wird der U-Wert in  $W / (m^2 \cdot K)$  angegeben und ist die maßgebliche Berechnungsgröße für Transmissionswärmeverluste.

**Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ):** Die Wärmeleitfähigkeit, auch spezifische Wärmeleitfähigkeit genannt, ist temperaturabhängig und gibt an, welche Wärmemenge bei einem Temperaturunterschied von 1 K in 1 Sekunde durch 1 m<sup>2</sup> Fläche einer 1 m dicken Wand fließt. Die SI-Einheit der Wärmeleitfähigkeit ist  $W / (m \cdot K)$ .

## 2.2 Die Energieeinsparverordnung

Die Energieeinsparverordnung stellt in ihrer aktuellen Fassung vom 01.01.2016 die nationale Umsetzung der europäischen Richtlinien dar und ist eines der wichtigsten Instrumente der deutschen Energie- und Klimaschutzpolitik. Sie regelt die Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von Wohn- und Nichtwohngebäuden und die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz sowie die Effizienzkriterien der eingesetzten Anlagentechnik. Dabei gelten für Neubauten und Gebäudebestand verschiedene Anforderungen.

### 2.2.1 Die Entwicklung der Energieeinsparverordnung

Am 1. November 1977 trat die erste Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung) als Folge des Energieeinsparungsgesetzes in Kraft. Sie wurde in den Jahren 1984 und 1995 jeweils novelliert und wurde schließlich im Jahr 2002 durch die EnEV abgelöst. Mit ihrem Inkrafttreten löste die EnEV die Wärmeschutzverordnung und die Heizungsanlagenverordnung ab und fasste diese in einer einzigen Verordnung zusammen, wodurch erstmals bauliche und heizungstechnische Anforderungen an Gebäude (Bestand und Neubau) gemeinsam betrachtet wurden.

Für das Erreichen der bis zum Jahr 2050 angestrebten energiepolitischen Ziele der Bundesregierung, nämlich einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand, ist diese Verordnung ein wichtiges Steuerinstrument [7]. Über ein weiteres Gesetz, das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz, wird der Einsatz erneuerbarer Energien im Neubau von Wohn- und Nichtwohngebäuden verbindlich vorgeschrieben. Bei der Modernisierung oder Sanierung von Bestandsgebäuden schreibt das EEWärmeG keine verpflichtenden EE-Anteile zur Energieerzeugung vor [8].

Im Jahr 2004 und 2007 erfolgten Revisionen der EnEV, um die jeweils gültige EU-Gebäuderichtlinie (2002/91/EG) in nationales Gesetz umzusetzen. In Artikel 1 der EU-Gebäuderichtlinie wird als Ziel die Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in der Gemeinschaft definiert. Außerdem wird erstmals die verpflichtende Erstellung eines Energieausweises für Gebäude vorgeschrieben [9]. Die EU-Richtlinie hat den verpflichteten Mitgliedsstaaten einen festgelegten Rahmen für eine einheitliche Berechnungsmethode zur Bestimmung der Gesamtenergieeffizienz geliefert und es wurden konkrete Anforderungen an die Energieeffizienz von Neu- und Bestandsbauten festgesetzt.

Im Jahr 2009 erfolgte eine weitere Änderung der EnEV. Es war eine der umfangreichsten Änderungen der Verordnung [10]. Die Überarbeitung der EnEV aus dem Jahr 2013 ist am 01.05.2014 bundesweit in Kraft getreten. Anlass zur Novellierung ist die Umsetzung der neu gefassten EU-Gebäuderichtlinie (2010/31/EU) über die

## 2 Grundlagen

Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden gewesen. In §1 ist das erwähnte Ziel bis 2050 einen möglichst klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen festgehalten. Des Weiteren wurde festgelegt, dass für Gebäude, deren Baubeginn nach dem 01.01.2016 liegt, der Wert des zulässigen Jahres-Primärenergiebedarfs um 25% unter den bis dahin gültigen Werten liegen muss und der Wert für die Mindestwärmedämmung der Gebäudehülle um durchschnittlich 20% gesenkt werden muss [7].

### 2.2.2 Aufbau und Inhalt der Energieeinsparverordnung 2014/2016

Die EnEV nimmt eine Unterteilung der Gebäude nach ihrer Nutzung vor, sodass im Gesetzestext zwischen Wohngebäuden (kurz WG) und Nichtwohngebäuden (kurz NWG) unterschieden wird. Des Weiteren wird zwischen Neubauten und Gebäudebestand unterschieden.

Die Bewertung von NWG gemäß EnEV findet auf Grundlage der *DIN V 18599 – Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarf für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung* statt. Diese DIN Norm liefert die notwendigen Vorgaben zur Bestimmung der (theoretischen) Energiebedarfe. Zur Berechnung wird ein vorgegebenes Referenzgebäude am gleichen Standort angenommen, welches in Größe, Aufbau und Nutzung identisch mit dem geplanten bzw. betrachteten Gebäude übereinstimmt. Die EnEV gibt Werte des maximalen Jahres-Primärenergiebedarf  $Q_{P\ REF}$  und der maximalen Transmissionswärmeverluste  $H_{T'\ REF}$  für das Referenzgebäude vor.

Als Berechnungsmethoden stehen die Normen DIN 18599 und die DIN 4108 zur Verfügung. Zur Ermittlung des Jahres-Primärenergiebedarf wird zunächst der Endenergiebedarf  $Q_E$  bestimmt, aus dem anschließend mittels des Primärenergiefaktors  $f_p$  der Primärenergiebedarf gemäß  $Q_P = f_p \cdot Q_E$  errechnet wird. Der Primärenergiefaktor ist abhängig von dem eingesetzten Energieträger und stellt sich für ausgewählte Energieträger nach DIN V 18599-1 wie folgt dar:

Tabelle 2.1 Auswahl von Primärenergiefaktoren nach DIN V 18599-1: 2011-12

Energieträger		Primärenergiefaktor (nicht erneuerbarer Anteil)
Fossile Brennstoffe	Erdgas H, Heizöl EL, Flüssiggas	1,1
Strom, Strom Mix		1,8
Umweltenergie	Solarenergie, Erdwärme, Umgebungswärme, -Kälte	0,0
Biogene Brennstoffe	Holz, Biogas	0,2 – 0,5

## 2 Grundlagen

---

### 2.2.3 Definition und Anforderungen von Nichtwohngebäuden

In der aktuellen Fassung der EnEV vom 24.10.2015 ist ein Nichtwohngebäude nach §2, Nr. 1 und 2, wie folgt definiert:

*„Im Sinne dieser Verordnung*

- 1. sind Wohngebäude Gebäude, die nach ihrer Zweckbestimmung überwiegend dem Wohnen dienen, einschließlich Wohn-, Alten- und Pflegeheimen sowie ähnlichen Einrichtungen.*
- 2. sind Nichtwohngebäude Gebäude, die nicht unter Nummer 1 fallen.“ [7]*

Entsprechend der Definition handelt es sich beim Heidelberger Hauptbahnhof um ein Nichtwohngebäude.

Die Anforderungen an Nichtwohngebäude werden in den Tabellen 1 und 2 der Anlage 2, zu den Paragraphen §§ 4 und 9, der EnEV 2016 zusammengefasst und regeln die Höchstwerte für den Jahres-Primärenergiebedarf und die maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten von Außenbauteilen. Durch die Anlage 3 zu den §§ 8 und 9 der EnEV werden verbindliche Grenzwerte für U-Werte für Bauteile eines NWG vorgeschrieben, und welche weiteren Anforderungen an den Wärmedurchgangskoeffizienten beim erstmaligen Einbau, Ersatz und Erneuerung von Außenbauteilen zu erfüllen sind. Diese Anforderungen sind maßgeblich für Modernisierungsmaßnahmen an der äußeren Gebäudehülle und müssen, sofern mehr als 10 Prozent der am Gebäude vorhandenen Bauteile ausgetauscht werden, eingehalten werden. Außenbauteile sind unter anderem Außenwände, Türen, Fenster, Dachflächen, Wände und Böden gegen das Erdreich oder Vorhangfassaden.

Das vorausgenannte gilt die den Bestandsbau des Bahnhofsgebäudes. Für den geplanten Neubau gelten andere Höchstwerte bezüglich des Jahres-Primärenergiebedarfs und der U-Werte als bei der Modernisierung des Bestandsgebäudes. Daher ist es notwendig den Neubau in Kapitel 0 sowohl einzeln als auch in der Kombination mit dem Bestandsgebäude zu betrachten.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Der Heidelberger Hauptbahnhof wurde im Jahr 1955 in Betrieb genommen und wird bis heute als Durchgangsbahnhof durch die Deutsche Bahn AG betrieben. Er ist einer der größten Bahnhöfe Baden-Württembergs und die durchschnittliche Anzahl an Reisenden beträgt circa 46.650 pro Tag. Der Bahnhof gehört gemäß Angaben der Deutschen Bahn AG zur Kategorie 2 [11]. Die Kategorisierung gibt Auskunft über die bereitgestellten Leistungen der DB AG vor Ort (z.B. Reisezentrum, Ansage, Einstiegshilfen, etc.) und ist ein Indikator für die Größe und Wichtigkeit eines Bahnhofs. Bahnhöfe der Kategorie 2 sind oftmals wichtige Zustiegspunkte für den Fernverkehr oder es sind Hauptbahnhöfe von größeren Städten. Insgesamt befinden sich im Heidelberger Hauptbahnhof auf 5.400 m<sup>2</sup> bebauter Grundfläche 15 verschiedene Gewerbeeinheiten (z.B. Restaurant, Blumenladen, Drogeriemarkt).

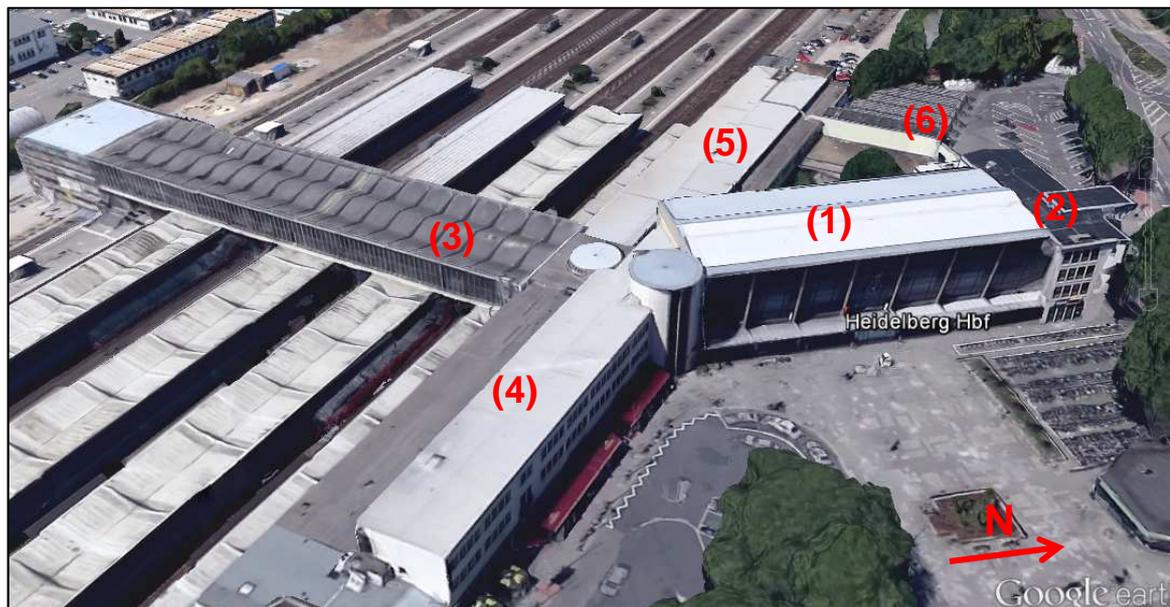


Abbildung 3.1 Foto des Heidelberger Hauptbahnhofs (2016)

Der Gebäudekomplex besteht aus mehreren Gebäudeteilen, die untereinander und von außen frei zugänglich sind. In Abbildung 3.1 ist der Heidelberger Hauptbahnhof so dargestellt, wie er im Jahr 2016 vorzufinden ist. Der gesamte Gebäudekomplex unterteilt sich in die folgenden Gebäudeteile - die Empfangshalle (1), ein im Norden daran grenzendes Bürogebäude (2), die Brücke zu den Gleisen (3) sowie einen gemischten Gebäudekomplex, in dem sich Vermarktungsflächen, Büroräume und Restaurants befinden (4) und (5). Zusätzlich ist der genannte Neubau (6) in Planung, der in die Betrachtung einbezogen werden soll. Eine detailliertere Aufteilung in die Nutzung der Flächen kann Tabelle 3.2 entnommen werden. In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Fakten über das Planungsobjekt zusammengefasst.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Tabelle 3.1 Eckdaten des Heidelberger Hauptbahnhofs

Heidelberg Hauptbahnhof	
Baujahr	1955
Anzahl Reisende pro Tag	46.650
bebaute Grundfläche	5.400 m <sup>2</sup>
Anzahl Etagen	5 (1 UG, EG, 3 OG)
bebaute Fläche gesamt (alle Etagen)	ca. 17.000 m <sup>2</sup>
Anzahl Ladeneinheiten	15
Wärmeversorgung	Fernwärme der Stadtwerke Heidelberg
Kälteversorgung	dezentral (Klima-Split-Geräte)

### 3.1 Aufbau des Planungsobjektes

Zur Festlegung der Bedingungen und Anforderungen an die Innentemperatur sowie Heiz- und Kühlbedarfe wurde das Gebäude in Nutzungszonen unterteilt. Die Geschossanzahl der einzelnen Gebäudeteile gemäß Abbildung 3.1 sowie die vorwiegende Nutzungsart der Gebäudeteile sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Tabelle 3.2 Geschossanzahl und Nutzung der Flächen

Gebäudeteil	Geschossanzahl	Nutzungsflächen
1	3	Vermarktungsfläche, Verkehrsfläche, Lager
2	5	Vermarktungsfläche, Lager, Büroräume
3	1	Verkehrsfläche
4	5	Restaurant, Büroräume, Lager, Sozialräume
5	3	Vermarktungsfläche, Lager, Sozialräume
6	5	Vermarktungsfläche, Lager, Büroräume

#### 3.1.1 Das Bestandsgebäude

Der aktuelle Gebäudekomplex rund um den Heidelberger Hauptbahnhof ist seit dessen Eröffnung im Jahr 1955 durchgehend in Betrieb. Die Bausubstanz der opaken Bauteile der Gebäudehülle wurde seit der Eröffnung keiner umfangreichen Erneuerung unterzogen und entspricht somit dem energetischen Baustandard von vor circa 60 Jahren. Für eine verständlichere Darstellung werden nachfolgend die verschiedenen Gebäudeteile entsprechend der Nummerierung aus Abbildung 3.1 jeweils kurz vorgestellt.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

---

#### *Die Schalterhalle*

Die Empfangshalle bzw. Schalterhalle ist der zentrale Anlaufpunkt des Bahnhofs. Sie dient als Durchgangsgebäude für die Reisenden zu den Gleisen sowie zu den Vermarktungsflächen und dem Reisezentrum. Mit einer Gesamtgrundfläche von ca. 5000 m<sup>2</sup>, aufgeteilt auf das Erdgeschoss und zwei Untergeschosse, nimmt sie einen Großteil der Gesamtfläche ein. Die Halle ist ca. 12 m hoch und hat einen sehr hohen Fensteranteil zur Ost- und Westseite des Gebäudes. Getragen wird das Gebäude von insgesamt 12 Betonsäulen an der östlichen und westlichen Seite sowie den fensterlosen Wänden im Norden und Süden des Gebäudes. Die tragenden Säulen sowie die fensterlosen Wände bestehen aus verputztem Stahlbeton. Die Fenster sind einfach verglast und haben metallische Rahmen. Die Halle verfügt im Erdgeschoss über 3 Eingänge mit gläsernen Türen, welche ganzjährig dauerhaft geöffnet sind. Die zwei nach Osten gerichteten Eingänge besitzen eine Durchgangsbreite von ca. 4 m und der Eingang in Richtung Norden ist ca. 3 m breit und ebenfalls ganzjährig geöffnet. Die Halle selbst wird nicht beheizt und gekühlt und es ist aufgrund der Undichtigkeiten des Gebäudes und des ständigen Luftwechsels mit der Umgebung und den anderen Zonen auch nicht geplant dies einzuführen. Lediglich die Vermarktungsflächen (Verkaufsflächen) werden mit Hilfe von Radiatorheizung und Türschleieranlagen mit Wärme versorgt.



Abbildung 3.2 Empfangshalle des Heidelberger Hauptbahnhofs [12]

#### *Der Bürokomplex Nordseite*

Der Bürokomplex zur Nordseite des Bahnhofs liegt über den im Erdgeschoss befindlichen Vermarktungsflächen der Empfangshalle und umfasst das 1. bis 3. Obergeschoss. Er schließt nahtlos an die Empfangshalle an. Die Obergeschosse sind von außen über einen separaten Eingang und ein Treppenhaus zu erreichen. Die opake Gebäudehülle ist seit der Errichtungszeit unverändert. Lediglich die Verglasung ist vor einigen Jahren modernisiert und von einer Einfachverglasung auf eine Doppelverglasung mit Wärmeschutzfolie umgerüstet worden. Die Büros werden über das vorhandene

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Wärmenetz des Bahnhofs mit Wärme versorgt und im Sommer über dezentrale Klima-Splittergeräte gekühlt.



Abbildung 3.3 Eingangsbereich in die Schalterhalle (nördlich) und der Bürokomplex

#### *Die Vermarktungsflächen*

Die Vermarktungsflächen nehmen im Erdgeschoss des Heidelberger Hauptbahnhofs einen Großteil der Nutzungsfläche ein. Sie erstrecken sich über weite Bereiche der Gebäudeteile 1, 2, 5 (siehe Abbildung 3.1) des Bahnhofsgebäudes. Die Innenräume und –wände der Vermarktungsflächen sind im Zuge von Neuvermietungen regelmäßig erneuert worden. Die innenliegenden Fenster zur räumlichen Trennung der Vermarktungsflächen gegenüber den Verkehrswegen sind aus Isolierverglasung. Zusätzlich zu den installierten Radiatorheizkörpern sind die Eingangsbereiche der größeren Vermarktungseinheiten mit Warmluft-Türschleiern ausgestattet. Diese wurden installiert, um Lüftungsverluste zwischen den im Winter warmen Verkaufsflächen und der unbeheizten Schalterhalle zu minimieren.

#### *Die Gleisbrücke*

Die Gleisbrücke ist ein zu den Fernbahnsteigen hin offener und unbeheizter Gebäudeabschnitt. Der Zugang in Richtung Schalterhalle erfolgt durch einen ca. 8 m breiten Zugangsbereich mit offenen Glas-Automattüren. Für den Umfang dieser Masterarbeit ist dieser Bereich nicht relevant, da hier keine Anlagentechnik zum Heizen oder Kühlen zum Einsatz kommt.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

#### *Der Gastronomiekomplex*

Der Gastronomiekomplex (vgl. Abb.3.1, Nummer 4) ist ein vom Rest des Gebäudes abgetrennter Bereich und befindet sich im Erdgeschoss des südöstlichen Flügels des Gebäudes. Er ist sowohl von innen (Bereich Schalterhalle/Gleisbrücke) als auch von außen durch Eingangstüren zu betreten. Die Türen werden, anders als bei der Schalterhalle, geschlossen gehalten und entsprechen den modernen Anforderungen hinsichtlich des Energiestandards. Die Wärmeversorgung dieses Bereiches erfolgt wie beim gesamten Bahnhof zentral über die Fernwärme der Stadtwerke Heidelberg und wird durch Radiatorheizkörper und eine Lüftungsanlage realisiert.



Abbildung 3.4 Gastronomie am Heidelberger Hbf im südöstlichen Flügel

#### **3.1.2 Der Neubau**

Es ist geplant, den Heidelberger Hauptbahnhof um ein weiteres Areal zu erweitern. Dieser Bereich (vgl. Abb. 3.5 rote Markierung) soll im Erdgeschoss an die vorhandenen Flächen angrenzen, um weitere Vermarktungsflächen zu erschließen. Im ersten Untergeschoss sollen die Kellerräume vorwiegend als Lager- und Sozialräume genutzt werden. Der Neubau soll über drei Obergeschosse verfügen, deren Nutzung als Büroräume vorgesehen ist. Das vorhandene Wärmenetz soll um den neuen Gebäudeteil erweitert werden. Die Klimatisierung erfolgt in der ersten theoretischen Betrachtung, analog zu dem bestehenden System, über Klima-Splitgeräte. Diese Annahme ermöglicht es, die nachfolgend erstellten Simulationsmodelle einheitlich zu betrachten.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

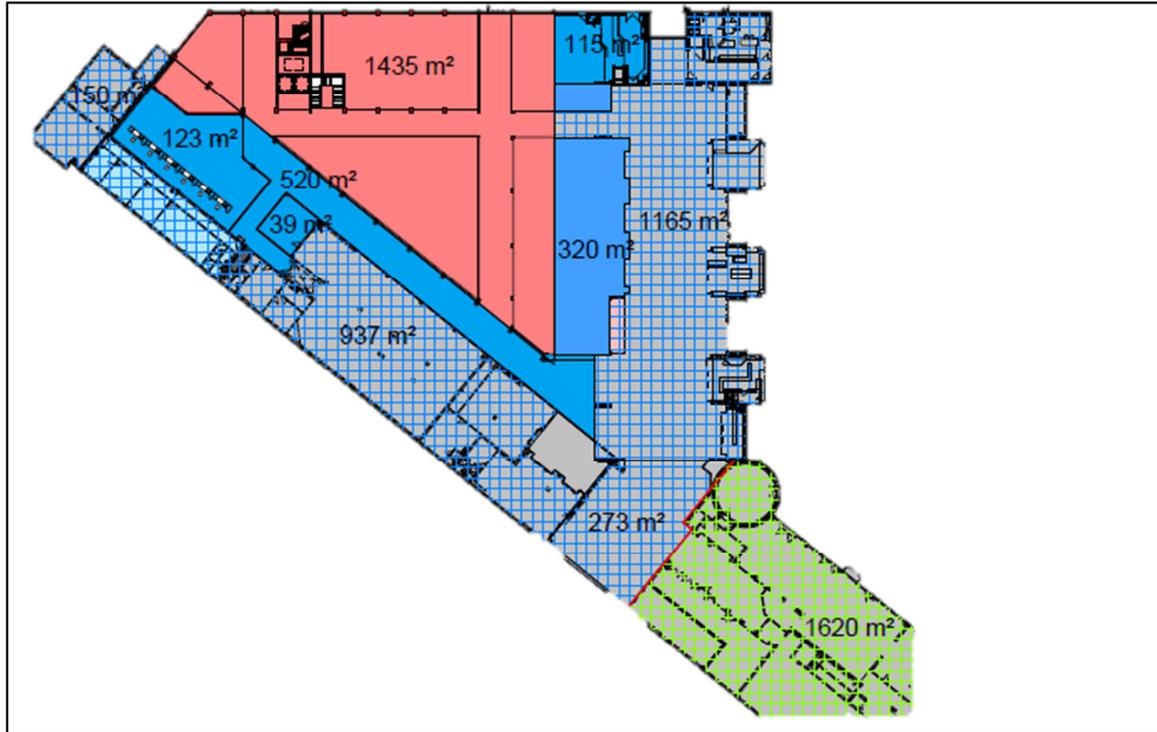


Abbildung 3.5 Grundriss Erdgeschoss incl. geplantem Neubau

Im Erdgeschoss wird davon ausgegangen, dass nur die Verkaufsflächen eine geregelte Wärme- und Kälteversorgung erhalten und die neu erschlossenen Verkehrsflächen, analog zur Schalterhalle, aufgrund ihrer Bauweise ohne Konditionierung betrieben werden.

### 3.2 Auswahl der Simulationssoftware

Zur energetischen Bewertung von Gebäuden nach EnEV und KfW Standards ist aufgrund der Komplexität der Rechengänge eine entsprechende Software zur Berechnung und Simulation zu verwenden. Die Berechnung gemäß der geltenden und notwendigen Normen (beispielsweise DIN V 18599, DIN 4108-6 oder DIN 4701) ist sehr komplex und ohne die Hilfe eines computergestützten Systems kaum fehlerfrei zu handhaben.

Der Markt weist verschiedene Anbieter für solche Produkte auf und der Leistungsumfang der einzelnen Pakete variiert stark. Die Anbieter verfügen über verschiedene Leistungsspektren, verschiedene Zusatzpakete und -module und sie unterscheiden sich in der Benutzerfreundlichkeit.

Für den Umfang dieser Masterarbeit sowie den zeitlich gesteckten Rahmen war es notwendig ein Produkt auszuwählen, welches dem Anwender die Möglichkeit bietet sich in kurzer Zeit, ohne fremde Hilfe, einen Großteil der Funktionen aneignen zu können.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

---

Die Auswahl der Simulationssoftware erfolgte auf Grundlage einer Umfrage, die in Zusammenarbeit mit der GEB (Gebäude Energie Beratung) durchgeführt wurde. Im Jahr 2012 wurden deutschlandweit 441 Energieberater befragt, die ihre Meinung zum Thema Energieberatersoftware / EnEV Software-Programme darlegten [13].

Mit dem Ergebnis der Befragung sowie dem Wissen, dass die Simulationssoftware nur über einen Zeitraum von maximal 6 Monaten genutzt werden soll, wurden verschiedene Software Anbieter kontaktiert und Angebote eingeholt. Nicht alle Anbieter haben Studentenlizenzen im Angebot oder haben zeitnah auf Anfragen geantwortet, sodass am Ende zwei mögliche Softwareanbieter (ROWA-Soft GmbH und Hottgenroth Software GmbH) zur Auswahl standen. Das Angebot von kostenlosen Webinaren sowie ein preisgünstigeres Angebot für ein Softwarepaket mit Studentenlizenz haben den Ausschlag für den Energieberater 18599 3D Plus der Firma Hottgenroth gegeben. Die Hottgenroth GmbH ist mit ihrem Softwareangebot der derzeitige Marktführer auf dem Bereich der Energieberatersoftware (Stand: November 2014) [14]. Des Weiteren bietet die Software den Vorteil, dass die Eingabe der Gebäudedaten in einem integrierten 3D-Modul erfolgen kann, sodass bereits vorhandene Grundrisse des Planungsobjektes für die Bearbeitung in das Programm übernommen werden konnten.

### 3.3 Ermittlung der Gebäudeparameter

Für eine Ermittlung des theoretischen Energiebedarfes eines Gebäudes ist es notwendig, die Größe und Form des Grundrisses sowie die Zusammensetzung und den Aufbau der Gebäudeaußenhülle und der Innenbauteile zu kennen. Es muss beispielsweise eine Abgrenzung der Räume gegen beheizte/unbeheizte Innenwände erfolgen sowie eine Unterscheidung nach Außenwänden und Bodenflächen gegen Keller oder Erdreich vorgenommen werden. Anhand dieser Parameter ist es möglich mit der Simulationssoftware ein Modell des Bahnhofs abzubilden und die Energiebedarfe zu berechnen. Für die Erhebung der Grundrissdaten des Gebäudes sind die vorhandenen Grundrisse eingeholt worden. Da die weitere Dokumentation hinsichtlich der vorhandenen Bausubstanz von Innen- und Außenbauteilen unvollständig gewesen ist und keine Details über den Aufbau der Gebäudehülle nachzuweisen waren, wurden mehrere Termine vor Ort in Heidelberg durchgeführt. Zielsetzung war die möglichst exakte Aufnahme von Daten der Gebäudehülle anhand von Sichtproben und Expertenmeinungen. Für den Fall, dass dies nicht möglich gewesen ist, durfte für die U-Werte der betroffenen Bauteile gem. § 9 Satz 2 der EnEV folgende Annahme getroffen werden:

*„Sollten energetische Kennwerte für bestehende Bauteile und Anlagenkomponenten nicht vorliegen, können gesicherte Erfahrungswerte für Bauteile und Anlagenkomponenten vergleichbarer Altersklassen verwendet werden.“*

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Zur überschlägigen Bestimmung der Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen existieren für genau diese Anwendungsfälle Pauschalwerte, welche für die Berechnung angenommen werden dürfen, sofern keine detaillierten Informationen über ein Gebäudebauteil vorliegen [15]. Diese Werte sind nicht für jedes Bauteil exakt zutreffend, beruhen aber auf Erfahrungswerten von Bauherren und Experten für Bauphysik. Anhand der Baualtersklasse des Gebäudes erfolgt die Zuordnung der Wärmedurchgangskoeffizienten für die einzelnen Bauteile. Dieses zugelassene Hilfsmittel ermöglicht es, die Berechnung von Wärme- und Kältebedarfen im Zuge der EnEV für ein Bestandsgebäude oder einen zu planenden Neubau auch durchzuführen, wenn noch kein Detailwissen über die Bausubstanz vorliegt [16] [17].

Des Weiteren bietet dieser Leitfaden [15] dem Planer bereits während der Planungsphase eines Bauvorhabens die Möglichkeit zu prüfen, ob und welche Anforderungen der EnEV und der KfW-Standards erfüllt werden.

#### 3.3.1 Das Bestandsgebäude

Für das Bestandsgebäude konnten durch Begutachtungen vor Ort und der DENA Arbeitshilfe [15] folgende in Tabelle 3.3 gelisteten Gebäudeparameter aufgenommen werden.

Tabelle 3.3 Gebäudeparameter für den Gebäudebestand

Bauteil		Aufbau / Schichtung	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) in $\frac{W}{m^2K}$
Außenwand	gegen Luft	Beton, 1-2 cm Dämmung, verputzt	1,4
	gegen Erde	Beton, 1-2 cm Dämmung, verputzt	1,4*
Decke / Fußboden	gegen Luft	Beton + Estrich + 1cm Dämmung	1,4
	gegen Erde	Beton + Estrich + 1cm Dämmung	1,4*
Innenwand		Beton, verputzt	3,2
Fenster	Empfangshalle	Einfachverglasung, Metallrahmen	5,5
	andere	Doppelverglasung, WSV	2,5
Türen	Außentüren	Leichtmetallrahmen, über 80% Glasanteil	2,5
	Innentüren (pauschal)		1,4
Flachdach		Stahlbetondach mit Dämmung 1-2 cm	1,5*
(*): Diese Werte sind unter zur Hilfenahme von [15] ermittelt worden			

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

#### 3.3.2 Der Neubau

Da für den geplanten Neubau bisher keine Planungsunterlagen bezüglich der Gebäudehülle vorliegen, wird angenommen, dass die Planung und Umsetzung so erfolgt, dass alle durch die EnEV 2016 gestellten Randbedingungen erfüllt werden. Eine Betrachtung der Errichtungskosten für das Gebäude gehört nicht zum Gegenstand dieser Masterarbeit. Die ausgewählten Bauteile und Materialien finden nach Rücksprache mit einem Fachkundigen Anwendung und werden für das Berechnungsmodell verwendet.

Tabelle 3.4 Gebäudeparameter für den Neubau

Bauteil		Aufbau / Bestandteile(*)	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) in $\frac{W}{m^2K}$	
Außenwand	gegen Luft	Mörtel, Kalksandstein, Polystyrolschaum, Kunstharzputz	0,23	
	gegen Erde	Beton, Bitumen und Polystyrolschaum	0,33	
Decke / Fußboden	gegen Luft	Estrich, Mineralwolle, PE-Folie, Beton, Mörtel	0,33	
	gegen Erde	Stahlbeton, Polystyrolschaum	0,27	
Innenwand		Beton, Bitumen und Polystyrolschaum	0,44	
Fenster		3-Scheiben Wärmeschutzverglasung, Kunststoffrahmen (30%)	0,7	$U_f = 0,8$ $U_G = 0,5$
Türen	Außentüren	Leichtmetallrahmentüren mit Verglasung	1,1	
	Innentüren (pauschal)		0,77	
Flachdach		Beton, Mörtel, PUR IR- Hartschaum, Luftschicht, Bitumen, Konstruktionsholz	0,18	
(*) : Entnommen aus dem Bauteilkatalog der Simulationssoftware				

In Tabelle 3.4 sind die verwendeten Bauteile mit den dazugehörigen Wärmedurchgangskoeffizienten dargestellt. Die verwendeten Bauteile erfüllen mit ihren Wärmedurchgangskoeffizienten die notwendigen Anforderungen der EnEV (§ 4, Anlage 2 Tabelle 1) für zu errichtende Nichtwohngebäude. Die Wärme- und Kältebereitstellung für den Neubau erfolgt analog zum Bestandsgebäude über Fernwärme und Klima-Splitgeräte.

### 3.4 Simulation des Jahres-Primär- und Endenergiebedarfs

Für den Ist-Zustand des Heidelberger Hauptbahnhofs (Bestandsgebäude), den Neubau und für den geplanten Zustand (Bestand und Neubau in einem Modell) sind insgesamt 3 Berechnungsmodelle auf Basis der ermittelten Gebäudeparameter erstellt worden. Alle Berechnungen wurden nach dem in der EnEV zugelassenen Berechnungsverfahren, der DIN 18599, vollständig durchgeführt. Der Heiz- und Kühlbedarf wird von den folgenden Einflussgrößen maßgeblich bestimmt:

- *Transmissionswärmeverluste*: Wärmeleitung durch Außen- und Innenbauteile in andere Räume oder an die Umwelt
- *Interne Wärmegewinne*: Wärmestrahlung von elektrischen Geräten, Beleuchtung und Körperwärme
- *Solare Gewinne*: Transmission durch transparente Bauteile (Fenster, Türen)
- *Lüftungswärmeverluste*: Austausch von Innen- und Außenluft

Mit Hilfe der Software können diese Verluste und Gewinne bereits während der Modellbildung und der Erstellung des Simulationsmodells anhand der Bauteilausrichtung und deren U-Werten berechnet werden.

#### 3.4.1 Aufbau des Simulationsmodells

Die Erstellung und Berechnung der Energiebedarfe erfolgt, wie bereits in Kapitel 3.2 erläutert, mit dem „Energieberater 18599“ der Firma Hottgenroth Software GmbH & Co. KG. Die Vorgehensweise wird in Abbildung 3.6 in ihren wichtigsten Schritten zusammengefasst:

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

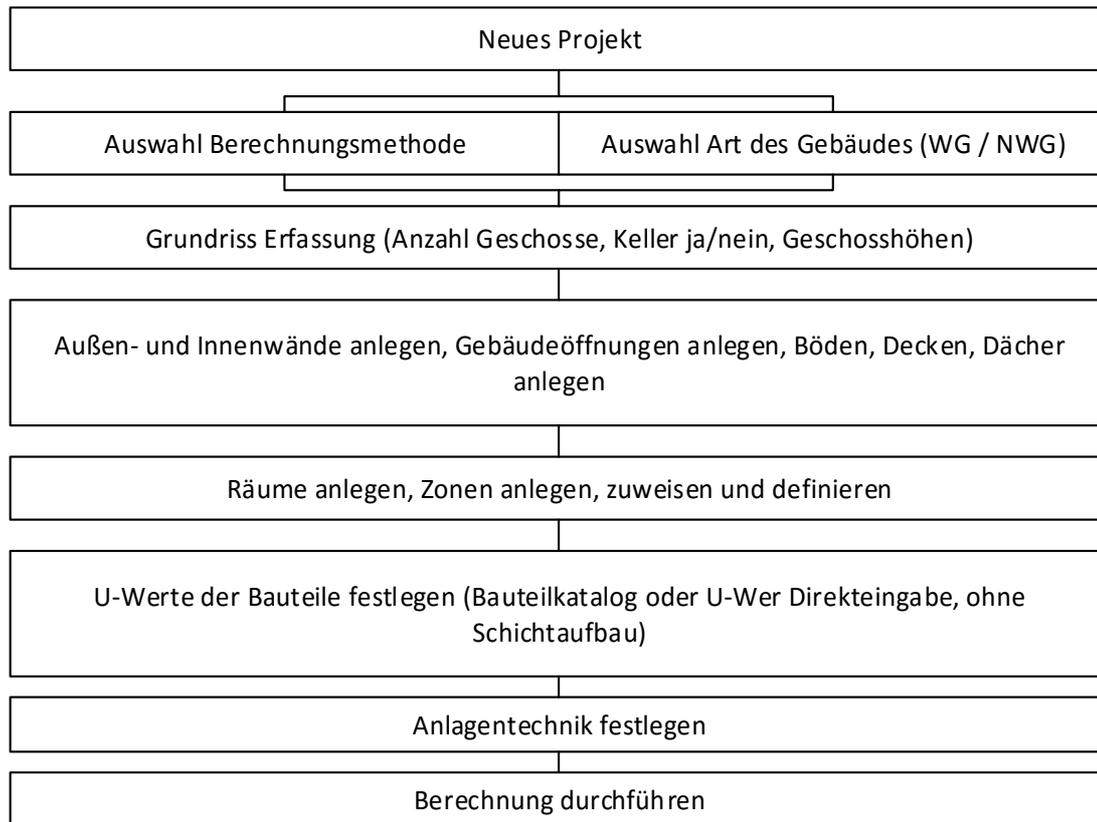


Abbildung 3.6 Vorgehensweise beim Erstellen des Simulationsmodells

Beim Anlegen eines Projektes werden Randbedingungen und Angaben zum Standort vorgenommen. Hierüber kann für den Fall mehrerer Projekte und Varianten eine Zuordnung erfolgen (vgl. Abbildung 3.7).

Vorhandene Projekte		
Nr.	Projekt	Datum
1	Heidelberg Hbf	14.03.2016
2	Heidelberg Hbf- Anbau - Fertig - incl. PV (EnEV erfüllt)	05.04.2016
3	Heidelberg Hbf - Fertig - incl. Anbau	03.05.2016
4	- Sole+Wand+Dach-Dämmung - Fertig	03.05.2016
5	- Fenster+Türen+Dach-Dämmung - Fertig	03.05.2016
6	- opake+transparente Fertig	03.05.2016
7	Heidelberg Hbf - Fertig - incl. Anbau	03.05.2016

Abbildung 3.7 Übersicht Projektstruktur: Projekte (rot) und Varianten (grün)

Des Weiteren sind detaillierte Eckdaten einzugeben, die sich durch das festgelegte Planungsobjekt ergeben. Informationen über die Art des Gebäudes (WG oder NWG), ob es sich um einen Neubau oder Bestand handelt, die Anzahl der Geschosse und deren lichte Höhe und/oder ob ein Keller vorhanden ist oder nicht, muss bereits zu Beginn festgelegt werden.

Im darauf folgenden Schritt wird der gesamte Gebäudegrundriss, d.h. alle Etagen, auf virtuelles Zeichnungspapier des Programms manuell eingegeben. In diesem Fall erfolgte

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

das Zeichnen der Grundrisse für alle Geschosse anhand der vorhandenen Dokumentation des Heidelberger Hauptbahnhofs. Nach dem Zeichnen der Außen- und Innenwände werden Gebäudeöffnungen (Fenster, Türen, Treppen) hinzugefügt. Das Modell der Wände entspricht dem in Abbildung 3.8 dargestellten Ausschnitt.

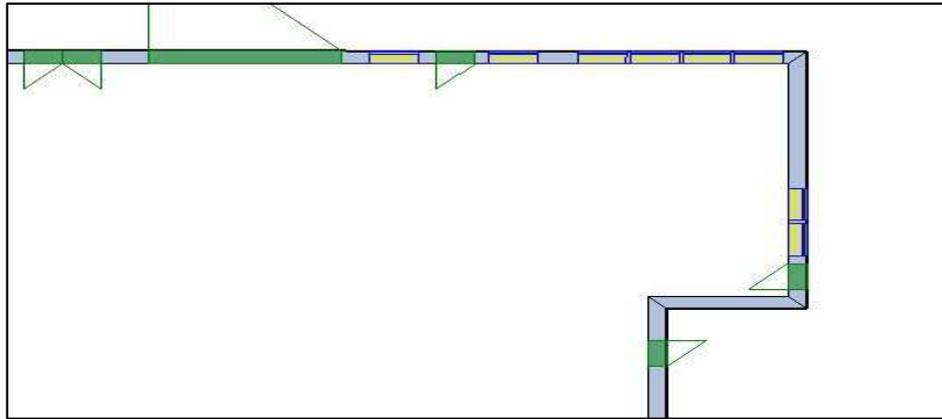


Abbildung 3.8 Modelldarstellung im Grundriss: Außenwand (blau), Türen (grün), Fenstern (gelb)

Dieses Vorgehen wird geschossweise durchgeführt, sodass in dem Modell eine Überinanderschichtung von zweidimensionalen Grundrissen vorliegt. Über die eingegebenen Geschosshöhen ermittelt das Programm ein 3D-Modell des Gebäudes. Dieses Modell sieht nach vollständiger Eingabe der Daten wie folgt aus:

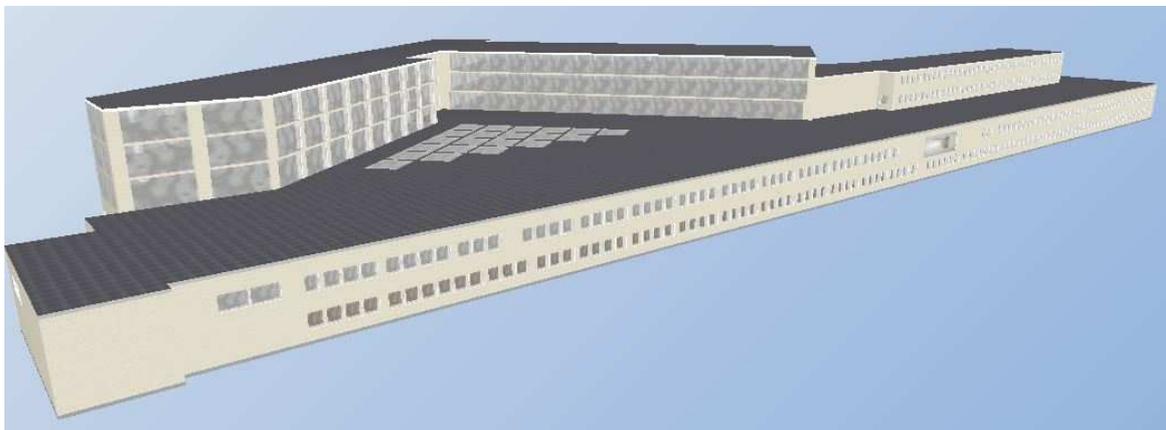


Abbildung 3.9 3D-Modell des Heidelberger Hauptbahnhofs Ansicht 1

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

---



Abbildung 3.10 3D-Modell des Heidelberger Hauptbahnhofs Ansicht 2

Die Eingabe der Fenster und Türen erfolgt anhand verschiedener geometrischer Parameter (siehe Abbildung 3.11), sodass sich beispielsweise sowohl bodentiefe Fenster als auch runde oder ovale Fenster in das Modell einarbeiten lassen.

Nach Fertigstellung, wie in Abbildung 3.9 und Abbildung 3.10 dargestellt, wird das Innere des Gebäudes definiert. Die Innenwände als Trennwände für die Raumaufteilung werden in einem späteren Schritt den Nutzungszonen zugeordnet.

In Abbildung 3.12 ist exemplarisch die Programmmaske zum Anlegen von Raumprofilen für Büroräume dargestellt. Die für die Simulation der Energiebedarfe wichtigen Eigenschaften dieses Raumes können situationsbedingt angepasst werden. Standardmäßig werden Büroräume mit einer Norm-Innentemperatur von 20°C und einer Mindest-Luftwechselrate von 0,5 des Raumvolumens pro Stunde berechnet. Die Werte sind fix und dürfen nur bei besonderen Nutzungsverhältnissen verändert werden. Sie sind für diese erstellten Modelle unverändert geblieben.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

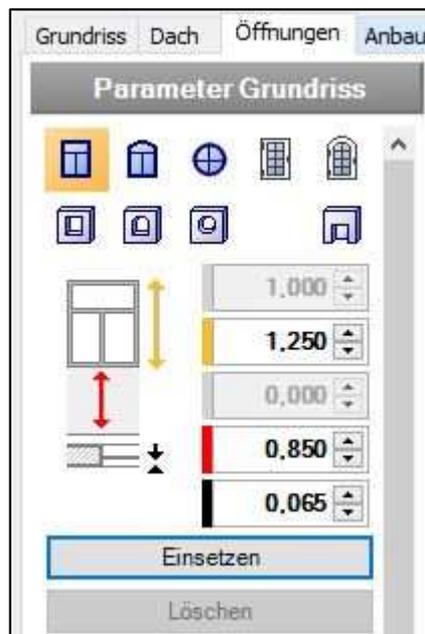


Abbildung 3.11 Geometrische Auswahlparameter für Fenster (links)



Abbildung 3.12 Auswahl der Raumprofile (rechts)

Ein angelegter Raum wird im Modell farblich gekennzeichnet und mit einem entsprechenden Text versehen (siehe Abbildung 3.13). Räume erhalten zur eindeutigen Kennzeichnung, je nach Art der Nutzung, einheitliche Farben, um Verwechslungen auszuschließen.

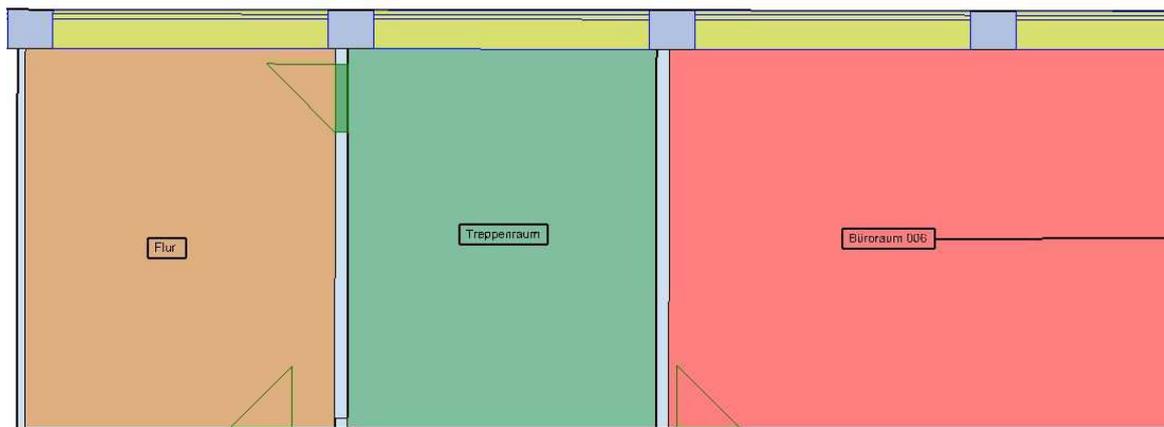


Abbildung 3.13 Kennzeichnung der Räume im Modell

Im nächsten Schritt werden Nutzungszonen definiert und den Räumen zugeordnet. Nutzungszonen legen die Bedingungen in einem Raum fest. Sie enthalten Informationen über die raumluftechnische Ausstattung, die Beleuchtung, die Belüftung und den Warmwasserbedarf. Jeder Zone wird durch die DIN 18599 ein Nutzungsprofil (vgl.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Abbildung 3.14) zugeteilt. Dieses bildet das Nutzungsverhalten der Menschen in einer Zone ab und enthält standardisierte Nutzungsdaten, die nur im Ausnahmefall verändert werden dürfen.

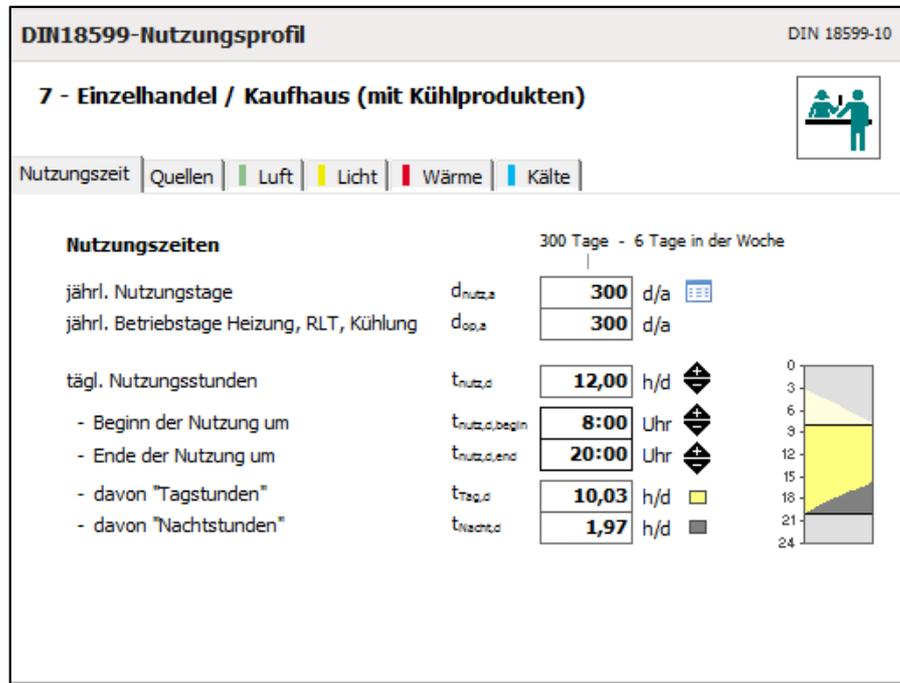


Abbildung 3.14 Nutzungsprofil für Zone 7 gem. DIN 18599

Unabhängig von den Nutzungsprofilen kann festgelegt werden, welche Art der Konditionierung für eine Zone vorliegt und ob sie mit Warmwasser, Wärme, Kälte, Licht oder Luft versorgt wird. Im Modell des Heidelberger Hauptbahnhofs wurden die Zonen wie in Abbildung 3.15 definiert und angelegt.

Nutzungszone									
Nutzung   Geometrie   Bauweise   Luft   Licht   Wärme   Kälte   Wasser   Ergebnisse									
Nr	Zone	A_NGF	Nutzung	Tage	Nutzungsstunden	$t_{v,op,d}$	$d_{op,a}$		
1	Gruppenbüro	3.271	2 - Gruppenbüro (2 bis 6 Arbeitsplätze)	250	11 (10/1)	13	250		
2	Schalterhalle	3.713	5 - Schalterhalle	250	11 (10/1)	13	250		
3	Einzelhandel/Kaufhaus (L)	2.469	7 - Einzelhandel / Kaufhaus (mit Kühlprodukten)	300	12 (10/2)	14	300		
4	Restaurant	644	13 - Restaurant	300	14 (8/6)	16	300		
5	WC und Sanitärräume in N	241	16 - WC, Sanitärraum (in Nichtwohngebäuden)	250	11 (10/1)	13	250		
6	Nebenflächen ohne Außer	7.164	18 - Nebenfläche (ohne Aufenthaltsräume)	250	11 (10/1)	13	250		

Abbildung 3.15 Nutzungszonen im Simulationsmodell

Insbesondere in Nichtwohngebäuden existieren häufig Flächen, die sich durch ihre Art der Nutzung, technische Ausstattung oder die Versorgung mit Tageslicht stark voneinander unterscheiden. Zur einfacheren Darstellung und korrekten Berechnung erfolgt aus diesem Grund eine Zonierung des Gebäudes. Anhand der wichtigsten Regeln, die sich aus der EnEV, der DIN V 18599-1 und der DIN V 18599-10 ergeben, in [18] aufgelistet sind und mit der Ursprungsquelle belegt sind, erfolgt eine Einteilung in

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Anlehnung an die in den Grundrissen gekennzeichneten Räume. Nachfolgend die wichtigsten Regeln zur Einordnung normgerechte Zonen:

- Flächen von unbeheizten Räumen sind nicht in die Berechnung einzubeziehen (siehe Schalterhalle) [19].
- Flächen von insgesamt bis zu 5% der Gesamtfläche des Gebäudes dürfen bei abweichender Nutzung, aber gleicher Konditionierung einer anderen Zone zugeschlagen werden [20].
- Sehr kleine Zonen, unter 1% der Gesamtfläche des Gebäudes, sind bei abweichender Nutzung und abweichender Konditionierung einer anderen Zone zuzuschlagen (z.B. Kühlräume) [20].
- Flächen der Nutzung Nr. 19 (Verkehrsflächen) und der Nr. 20 (Lager, Technik, Archiv) dürfen auch der Nutzung Nr. 18 (Nebenflächen ohne Aufenthaltsräume) zugeordnet werden [21].

Tatsächlich werden nicht alle Räume des Bahnhofes beheizt, gekühlt oder belüftet. Es ist trotzdem unumgänglich gewesen, einige Räume gemäß den oben gelisteten Regeln in die entsprechenden Zonen mit aufzunehmen, wohlwissend, dass das Modell an dieser Stelle von den Gegebenheiten vor Ort abweicht.

Für das Berechnungsmodell wurden folgende Nutzungszonen anhand der Flächennutzung festgelegt:

Tabelle 3.5 Zonierung gemäß DIN V 18599-10

Nr.	Nutzung	Beschreibung
3	Großraumbüro	ab 7 Arbeitsplätzen (da größtenteils mehr als 2-6 Arbeitsplätze vorhanden sind)
5	Schalterhalle	-
7	Einzelhandel/Kaufhaus (mit Kühlprodukten)	Supermärkte und Shops mit Kühlprodukten (Getränke Lebensmittel)
13	Restaurant	-
16	WC und Sanitärräume in NWG	auch Waschräume
18 (incl. 19+20)	Nebenflächen (ohne Aufenthaltsräume)	Umkleiden, Teeküchen, Kopierräume, Treppenräume, Flure, Materiallager, Geräteräume, Technikräume, Heizungsraum

Sind alle Räume einer Nutzungszone zugewiesen, wird den jeweiligen Bauteilen der vorgesehene U-Wert zugewiesen.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

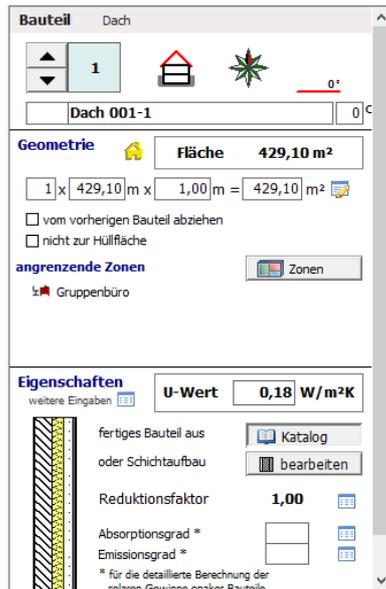


Abbildung 3.16 Zuordnung des U-Wertes für ein einzelnes Bauteil

In Abbildung 3.15 ist die Maske zur Festlegung des U-Wertes für ein Bauteil abgebildet. Neben den geometrischen Daten im oberen Bereich der Maske können auch Eigenschaften eines Bauteils festgelegt werden. Die Eingabe der U-Werte kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen: durch Direkteingabe in das Modell oder durch Auswahl eines Bauteils im integrierten Bauteilkatalog. Zur Auswahl stehen unterschiedliche Schichtaufbauten mit ihren jeweiligen U-Werten. Für die Bauteile, bei denen der U-Wert unter zur Hilfenahme von [15] ermittelt wurde, sind die U-Werte direkt eingegeben worden. Für die Außen- und Innenbauteile des Neubaus ist beispielsweise der Katalog genutzt worden. Die Auflistung der verwendeten U-Werte für das Gebäude sind Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4 zu entnehmen. Sind alle U-Werte für die einzelnen Bauteile des Gebäudes eingepflegt worden, kann in der Bauteilübersicht des Programms die jeweilige Zuordnung entnommen werden (vgl. Abbildung 3.17).

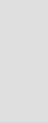
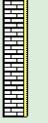
 7 x DA 771,49 m <sup>2</sup>  0,18 W/m <sup>2</sup> K	 44 x WA 656,97 m <sup>2</sup>  0,23 W/m <sup>2</sup> K	 100 x FA 1.196,40 m <sup>2</sup> ohne detaillierte Bauteilerfassung U-Wert 0,70 W/m <sup>2</sup> K	 40 x WI 1.130,68 m <sup>2</sup>  0,44 W/m <sup>2</sup> K	 21 x TI 40,11 m <sup>2</sup>  0,77 W/m <sup>2</sup> K	 4 x TA 7,56 m <sup>2</sup> ohne detaillierte Bauteilerfassung U-Wert 1,10 W/m <sup>2</sup> K	 15 x WI 2.068,90 m <sup>2</sup>  0,33 W/m <sup>2</sup> K	 15 x BK 580,57 m <sup>2</sup>  0,33 W/m <sup>2</sup> K
 3 x BA 101,30 m <sup>2</sup>  0,27 W/m <sup>2</sup> K	 14 x WK 266,89 m <sup>2</sup>  0,44 W/m <sup>2</sup> K	 12 x WE 440,13 m <sup>2</sup>  0,33 W/m <sup>2</sup> K	 6 x BE 664,62 m <sup>2</sup>  0,27 W/m <sup>2</sup> K				

Abbildung 3.17 Zuordnung des U-Wertes in der Bauteilübersicht

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Nach der Erfassung des Gebäudes und Zuordnung der relevanten Parameter erfolgt im nächsten Schritt die Aufnahme und Erfassung der Anlagentechnik. Der Bahnhofskomplex wird über das Fernwärmenetz der Stadtwerke Heidelberg versorgt. Die Kältebereitstellung für den Sommer erfolgt dezentral über elektrisch betriebene Klima-Splitgeräte. Die Nutzungszone „Restaurant“ ist die einzige Zone, bei der eine separate Möglichkeit zur Warmwasserbereitstellung benötigt wird. In den anderen Zonen darf der Warmwasserbedarf vernachlässigt werden, sofern der Bedarf unterhalb von 5 Litern Warmwasser pro Tag liegt [21].

Die Darstellung der Anlagentechnik im System erfolgt wie in Abbildung 3.18 gezeigt. Den Bedarfen der einzelnen Zonen können ein oder auch mehrere Erzeuger zugeordnet werden. So wird beispielsweise die notwendige Heizungsenergie über Fernwärme bereitgestellt. Dem „Erzeuger 1“ für die Kühlung sind Klima-Splitgeräte zugewiesen.

Mit dem Anlegen der Anlagentechnik ist der letzte Erfassungsschritt im Programm durchgeführt und die Berechnung kann erfolgen.

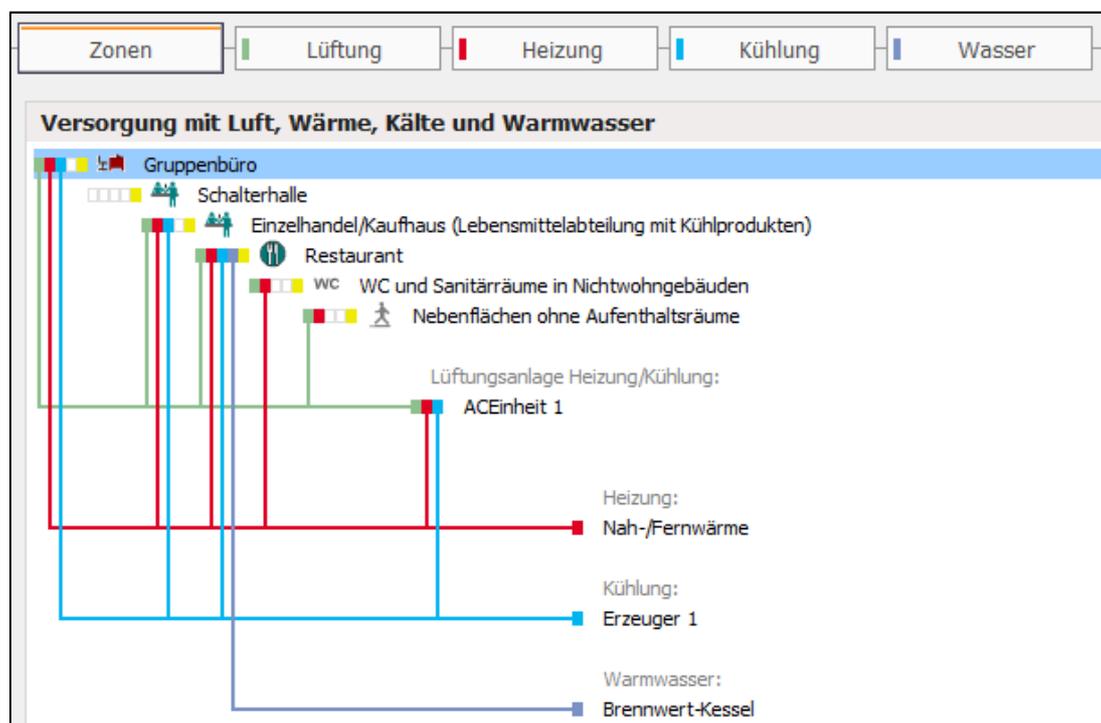


Abbildung 3.18 Darstellung der Anlagentechnik im Simulationsmodell

#### 3.4.2 Simulationsergebnisse

Die Simulationssoftware liefert als Grundlage und Vergleichswert für spätere Maßnahmen folgende Ergebnisse für 1. den Neubau und 2. das gesamte Modell von Neubau und Bestandsgebäude. Die farbliche Kennzeichnung gibt Auskunft über die Erfüllung der EnEV Anforderungen (grün) oder deren Nichterfüllung (rot). Sofern keine farbliche Kennzeichnung vorliegt sind keine Anforderungen an diesen Wert gestellt.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Tabelle 3.6 Simulationsergebnisse des Ist-Zustandes

		Neubau (separates Modell)		Bestandsgebäude + Neubau	
		Ist-Wert	zulässiger Höchstwert EnEV	Ist-Wert	zulässiger Höchstwert EnEV
Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]		41,01	74,76	125,2	155,85
Endenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]		62,10	-	190,5	-
Transmissionswärmeverlust $H'_T$ [W/m <sup>2</sup> K]		0,434	0,674	1,24	0,475
Zusatzanforderung an den „mittleren U-Wert“ [kWh/m <sup>2</sup> ]	opake Außenbauteile	0,20	0,28	1,046	0,49
	transparente Außenbauteile	0,70	1,5	1,297	2,66

Für den Neubau ergeben sich mit den in Tabelle 3.4 festgelegten Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile die in Tabelle 3.5 dargestellten Ergebnisse. Die Anforderungen der EnEV werden für den Neubau hinsichtlich des Jahres-Primärenergiebedarfs mit  $Q_P = 41,01 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} < Q_{P,\text{ref}} = 74,76 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$  erfüllt. Die Zusatzanforderungen an die opaken und transparenten Bauteile werden in der geplanten Ausführung ebenfalls erfüllt. Die Berechnungsergebnisse für das Modell von Bestandsgebäude + Neubau sind in Tabelle 3.6 dargestellt. Während der Jahresprimärenergiebedarf den Anforderungen der EnEV für Bestandsgebäude bereits entspricht, sind die Zusatzanforderungen an die opaken Bauteile nicht erfüllt. Das gute Abschneiden beim Jahres-Primärenergiebedarf lässt sich unter anderem mit der bestehenden Fernwärmeversorgung durch die Stadtwerke Heidelberg mit einem Primärenergiefaktor  $f_{P,FW} = 0,5$  [22] begründen.

Zusätzlich bewirkt eine geplante und in das Modell integrierte Photovoltaikanlage (nachfolgend PV-Anlage 1) auf dem Dach des Neubaus einen positiven Einfluss auf das Gesamtergebnis. Der Ertrag der PV-Anlage 1 wurde mit Hilfe der PV-Simulationssoftware der Hottgenroth Software GmbH ermittelt [23]. Durch den Primärenergiefaktor von  $f_{P,PV} = 0,0$  für Umweltenergien [10] und der Möglichkeit, dass PV-Strom unter bestimmten Voraussetzungen vom „Gesamtendenergiebedarf Strom“ abgezogen werden darf, wirkt sich eine PV-Anlage positiv auf das Gesamtergebnis aus. Zur Anrechnung muss §5 der EnEV erfüllt sein und die PV-Anlage muss in unmittelbarem, räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude stehen. Zusätzlich muss der erzeugte Strom vorrangig selbst genutzt werden (Eigenenergiebedarf für beispielsweise Beleuchtung). Der monatliche Ertrag dieser Anlage ist nach DIN V 18599-9: 2011-12 zu bestimmen.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Der Stromertrag der PV-Anlage 1 und ihr nach §5 der EnEV anrechenbarer Teil kann Abbildung 3.19 entnommen werden. Der Strombedarf des Neubaus wird dadurch zu circa 68% gedeckt. Die Module stehen unter einem Neigungswinkel von 33° in südlicher Ausrichtung auf dem Dach. Es werden insgesamt 294 PV-Module vom Typ Luxra PV 72 (195 W) installiert. Diese bedecken eine Gesamtdachfläche von 375,3 m<sup>2</sup> und bringen einen jährlichen anrechenbaren Ertrag von 51.832 kWh bei einem Gebäude-Strombedarf von 75.812 kWh.

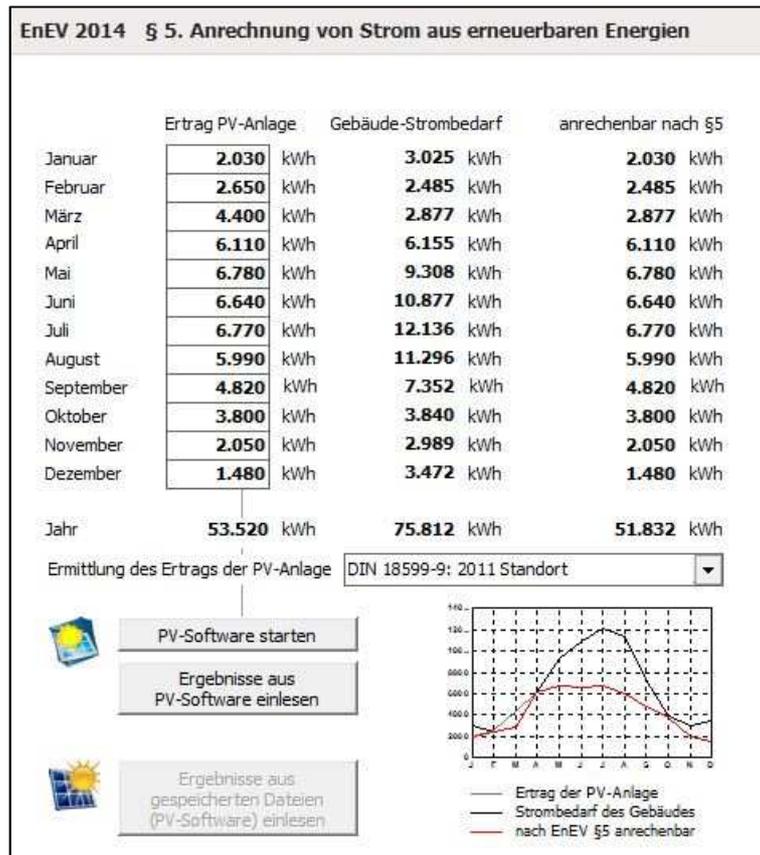


Abbildung 3.19 Ertrag der PV-Anlage 1 (Neubau)

#### 3.4.3 Überprüfung der Simulationsergebnisse

Da im Allgemeinen die Überprüfung von Simulationsergebnissen auf ihre Richtigkeit nur überschlägig erfolgen kann und der Berechnungsgang des Programmes im Hintergrund abläuft, sind zur Überprüfung die zur Verfügung stehenden Heiznebenkostenabrechnungen aus den Jahren 2011-2014 herangezogen worden. In einem separaten Berechnungsmodell wurde der Ist-Zustand des Heidelberger Hauptbahnhofs (ohne Neubau) aufgenommen und die Energiebedarfe berechnet. Aus den Heizkostenabrechnungen konnte die gelieferte Wärmemenge der vergangenen Jahre entnommen werden, sodass hinsichtlich des Heizbedarfes zwischen dem Modell und der Realität ein Vergleich gezogen werden konnte.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Die durch die Stadtwerke Heidelberg GmbH bereitgestellte Fernwärme (siehe Anhang 1) betrug im schlechtesten Fall 1455,35 MWh. Die entspricht bei einer abgerechneten Grundfläche 8503,88 m<sup>2</sup> einem Endenergiebedarf von 171,10 kWh/m<sup>2</sup>a. Das erstellte Simulationsmodell besitzt einen Endenergiebedarf von 1701,95 MWh für die Heizungswärme, welches bei 9382 m<sup>2</sup> berücksichtigter Grundfläche einen Endenergiebedarf von 181,41 kWh/m<sup>2</sup>a ergibt. Die Endenergiebedarfe für das Modell und den realen Zustand liegen in etwa in der gleichen Größenordnung, was den Rückschluss auf die Richtigkeit des erstellten Modells zulässt (vgl. Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7 Vergleich des Wärmebedarfes zum Heizen zwischen Modell und Realität

	berücksichtigte Grundfläche in [m <sup>2</sup> ]	Endenergiebedarf in [kWh/m <sup>2</sup> a]
Heizkostenabrechnung	8503,9	171,10
Simulationsmodell	9382,0	181,41

Die Differenz von ca. 880 m<sup>2</sup> beheizter Grundfläche zwischen dem Simulationsmodell und der Heizkostenabrechnung der Firma „ista Deutschland GmbH“ resultiert aus der Zusammenlegungen der Räume zu Nutzungszonen.

Die oben beschriebenen Abweichungen zwischen den Berechnungsergebnissen und den tatsächlichen Verbrauchswerten zur Deckung des Wärmebedarfs können verschiedene Ursachen haben und können nicht abschließend geklärt werden. Mögliche Ursachen können sein:

- Abweichung von Heiztagen und der Außentemperatur
- Abweichungen im Nutzungsverhalten der Kunden
- Erhöhte Transmissionswärmeverluste durch offen stehende Türen und Fenster
- Anderes Nutzungsverhalten innerhalb einer Zone.

#### 3.4.4 Berechnungsbeispiel U-Wert und Transmissionswärmeverlust

Zur Veranschaulichung der im Hintergrund der Simulationssoftware ablaufenden Berechnungen wird nachfolgend anhand von zwei Beispielen die manuelle Berechnung der U-Werte und der Transmissionswärmeverluste dargestellt. In der ersten Beispielberechnung wird der U-Wert für das Dach des Neubaus und im zweiten Beispiel werden für einen Büroraum im Neubau die Transmissionswärmeverluste berechnet.

Der spezifische Transmissionswärmeverlust  $H_T \left[ \frac{W}{K} \right]$  umfasst die gesamte Wärmemenge des betrachteten Zeitraums, die durch alle Bauteile fließt. Er ist abhängig von der Bauteilgeometrie, dem Wärmedurchgangskoeffizienten  $U \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$  und dem jeweiligen

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Temperaturkorrekturfaktor  $F_{xi}$  [–]. Außerdem geht in die Berechnung die Fläche der gesamten Gebäudehülle mit ein.

In der Simulationssoftware kann der Schichtaufbau der Bauteile mit ihren jeweiligen Eigenschaften festgelegt werden. Als Ergebnis wird ein Gesamt-U-Wert für das jeweilige Bauteil errechnet. Der Schichtaufbau und die Eigenschaften des Daches werden in Tabelle 3.8 dargestellt. Die Berechnung erfolgt manuell und wird anschließend mit dem Ergebnis der Software verglichen.

Die Berechnung des U-Wertes erfolgt auf der Grundlage:

$$U_{Bauteil} = \frac{1}{R_{ges}} \quad (1)$$

Dabei ist  $R_{ges}$  der Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils. Er kann über Formel (2) und den in Tabelle 3.5 gelisteten Bauteileigenschaften bestimmt werden.

$R_{ges}$  kann aus den Einzelwiderständen der verschiedenen Bauteilschichten berechnet werden.

$$R_{ges} = R_{PM} + R_{BT} + R_{PE} + R_{HS} + R_{LS} + R_{KH} + R_{BB} \quad (2)$$

Der Wärmedurchlasswiderstand jeder Schicht kann mit Hilfe der folgenden Formel ermittelt werden:

$$R_i = \frac{s_i}{\lambda_i} \quad (3)$$

Die Ergebnisse für die einzelnen Wärmedurchlasswiderstände können ebenfalls Tabelle 3.8 entnommen werden.

Tabelle 3.8 Schichtaufbau Dach (Neubau)

Schichtaufbau von innen nach außen	Schichtdicke $s$ [cm]	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/m · k]	Wärmedurchlasswiderstand $R$ [m <sup>2</sup> · K/W]
Putzmörtel (PM)	1,5	0,700	0,0214
Beton (BT)	18,0	2,500	0,072
Polyethylenfolie (PE)	0,02	0,200	0,001
PUR/PIR-Hartschaum (HS)	12,0	0,024	5
schwach belüftete Luftschicht (LS)	10,0	1,250	0,08
Konstruktionsholz (KH)	2,4	0,130	0,1846
Bitumenbahnen (BB)	0,9	0,170	0,0529

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

---

Gemäß Formel (2) ergibt sich damit der Gesamtwärmeleitwiderstand zu:

$$R_{ges} = 5,4119 \frac{m^2K}{W}$$

Der U-Wert für das Bauteil ist der Kehrwert des Wärmedurchlasswiderstandes, sodass sich folgender U-Wert für den oben beschriebenen Schichtaufbau für das Dach berechnen lässt:

$$U_{Dach} = \frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{5,4119} \frac{W}{m^2K} = 0,185 \frac{W}{m^2K}$$

Die Simulationssoftware gibt für den gesamten U-Wert des Daches einen Wert von  $U_{Dach} = 0,18 \frac{W}{m^2K}$  an, sodass von einer Übereinstimmung zwischen der manuellen Berechnung und der des Computerprogramms gesprochen werden kann.

Auf den U-Werten des gesamten Gebäudes aufbauend werden die Transmissionswärmeverluste berechnet. Für die Ermittlung setzt die EnEV das Heizperiodenverfahren an. Dabei wird ein Gebäude virtuell in seine Bauteile zerlegt, sodass alle Flächen der Fenster, der Wände, des Daches, des Bodens separat betrachtet werden. Jedem Bauteil wird dabei ein bestimmter U-Wert sowie ein bestimmter Temperatur-Korrekturfaktor  $F_{xi}$  zugewiesen. Die Berechnung der Transmissionswärmeverluste erfolgt auf Basis der Gleichung (4):

$$H_T = \sum (F_{xi} * U_i * A_i) + \Delta U_{WB} * A \quad (4)$$

- $F_{xi}$ : Temperatur-Korrekturfaktor für das jeweilige Bauteil
- $U_i$ : Wärmedurchgangskoeffizient des jeweiligen Bauteils
- $A_i$ : wärmeübertragende Fläche des jeweiligen Bauteils
- $\Delta U_{WB}$ : Wärmebrückenzuschlag (0,05 W/m<sup>2</sup>K; siehe. EnEV Anhang 2, Tabelle 1)
- $A$ : gesamte wärmeübertragende Fläche des Gebäudes

Als Berechnungsbeispiel soll ein Büroraum im 3. Obergeschoss des Neubaus herangezogen werden. Es wird angenommen, dass dieser Büroraum das gesamte Gebäude darstellt, da die Komplexität der Berechnung mit der Anzahl der Räume und der gesamten wärmeübertragenden Fläche stark zunimmt.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Die Bauteile des Raumes besitzen folgende Eigenschaften:

Tabelle 3.9 Kennwerte zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste

Bauteil	$F_{xi}$ [-]	$U_i$ [ $\frac{W}{m^2K}$ ]	$A_i$ [ $m^2$ ]
Wand	1,0*	0,23	181
Fenster	1,0*	0,7	52
Dach	1,0*	0,18	91
Boden	0,5*	0,33	80
<b>Gesamtfläche</b>			<b>404</b>
(*) : Quelle: DIN 4108-6			

Mit den in Tabelle 3.9 dargestellten Werten kann die Berechnung nach Formel (4) für dieses Beispiel ausgeführt werden.

$$H_T = \sum (F_{xi} * U_i * A_i) + \Delta U_{WB} * A$$

Wände  $= 1,0 \cdot 181m^2 \cdot 0,23 W/m^2K$   
 Fenster  $+ 1,0 \cdot 52m^2 \cdot 0,7 W/m^2K$   
 Dach  $+ 1,0 \cdot 91m^2 \cdot 0,18 W/m^2K$   
 Boden  $+ 0,5 \cdot 80m^2 \cdot 0,33 W/m^2K$   
 Wärmebrücke  $+ 0,05 W/m^2K \cdot 404m^2$   
 $= 41,63 + 36,4 + 16,38 + 13,2 + 20,2$   
 **$H_T = 127,81 W/K$**

Die Berechnung für den U-Wert von Bauteilen sowie die Berechnung von Transmissionswärmeverlusten wurden beispielhaft durchgeführt. Der Heidelberger Hauptbahnhof besteht aus mehreren Geschossen, vielen Räumen und einer Vielzahl von Bauteilen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Der Einsatz einer Simulationssoftware ist für das betrachtete Projekt aufgrund des hohen Rechenaufwandes unverzichtbar.

### 3.5 Zusammenfassung

In Kapitel 3 wurde das Planungsobjekt vollständig vorgestellt. Es wurde auf die Nutzung der Flächen sowie auf die Raumaufteilung eingegangen. Der geplante Neubau wurde vorgestellt und die notwendigen Schritte für die Ermittlung der Gebäudeparameter von Bestand und Neubau wurden aufgezeigt. Der Auswahlprozess für die Simulationssoftware mit dem notwendigen Vorgehen zum Erstellen des 3D-Berechnungsmodells wurde vorgestellt. Anschließend wurde die Berechnung für den aktuellen Zustand durchgeführt und die Energiebedarfe und –verluste wurden ermittelt.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

Ergänzend zu der EnEV Bewertung werden in Tabelle 3.10 die Simulationsergebnisse detaillierter dargestellt:

Tabelle 3.10 Zusammenfassung Berechnung Ist-Zustand

		Neubau (separates Modell)		Bestandsgebäude + Neubau	
		Ist-Wert	zulässiger Höchstwert EnEV	Ist-Wert	zulässiger Höchstwert EnEV
Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]		41,01	74,76	125,2	155,85
Endenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]		62,10	-	190,5	-
Transmissionswärmeverlust $H'_T$ [W/m <sup>2</sup> K]		0,434	0,674	1,24	0,475
CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/m <sup>2</sup> ]		17	-	41	-
Zusatzanforderung an den „mittleren U-Wert“ [kWh/m <sup>2</sup> ]	opake Außenbauteile	0,20	0,28	1,046	0,49
	transparente Außenbauteile	0,70	1,5	1,297	2,66
				Bedarf [kWh/a]	
Energieträger	Erdgas E			232.200	
	Strom-Mix			34.248	
	Fernwärme (Wärme)			2.179.777	
	Strom (Hilfsenergie)			179.806	

Gemäß der EnEV erfüllen der Neubau für sich sowie der Neubau in Kombination mit dem Bestandsgebäude die Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf.

Die weiteren Kriterien werden nicht erfüllt. Hier besteht Modernisierungsbedarf. Beispielweise sind die Transmissionswärmeverluste mit  $H'_T = 1,24 \frac{W}{m^2K}$  etwa 2,5-mal höher als der maximal zulässige Wert des Referenzgebäudes. Die Verluste resultieren aus der Wärmeleitung der transparenten und opaken Bauteile des Gebäudes an die Umgebung. Fehlende bzw. unzureichende Dämmung der opaken Gebäudehülle und Fenster ist in diesem Fall die Ursache. Bestätigt wird dieses dadurch, dass die Zusatzanforderung an den mittleren U-Wert der opaken Bauteile nicht erfüllt wird.

Bei einem Vergleich der einzelnen Energiebedarfe zeigt sich, dass der Großteil (ca. 84%) der benötigten Energie für Heizzwecke eingesetzt wird. Eine bessere Gebäudedämmung sowie eine effektivere Energienutzung der Anlagentechnik zur Bereitstellung der Wärme und Kälte bieten ein erhebliches Energieeinsparpotential. Beide Ansätze führen zu einer Verringerung der laufenden Betriebs- und Brennstoffkosten.

### 3 Planungsobjekt – Heidelberger Hauptbahnhof

---

Die Betrachtung und Bewertung der Simulationsergebnisse ergibt folgende Überlegungen und zeigt die Handlungsbedarfe auf:

- Verringerung der Transmissionswärmeverluste durch Dämmung der Gebäudehülle
- Verringerung der Transmissionswärmeverluste durch Modernisierung der Fenster und Türen
- Modernisierung der Anlagentechnik zur effizienteren Wärme- und Kältebereitstellung

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Die Bewertung der Simulationsergebnisse in Kapitel 3 hat nachfolgenden Handlungsbedarf zur Optimierung des Heidelberger Hauptbahnhofes aufgezeigt.

- Sanierung der Gebäudeaußenhülle
- Modernisierung der Anlagentechnik

### 4.1 Maßnahmen zur Sanierung der Gebäudeaußenhülle

Für die Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäudehülle werden im Simulationsmodell drei gängige Sanierungsmaßnahmen betrachtet und verglichen:

- Maßnahme 1 - Sanierung der opaken Außenbauteile durch Anbringung von Dämmung an Außenwänden, Decken, dem Kellerboden und dem Dach
- Maßnahme 2 - Sanierung der transparenten Außenbauteile und Dämmung des Daches
- Maßnahme 3 - Sanierung von opaken und transparenten Außenbauteilen und des Daches

Da sich die Maßnahmen 1 - 3 auf den gesamten Bahnhof beziehen und in diesem Zuge jeweils mehr als 10% der betroffenen Bauteile erneuert werden, müssen gemäß Anlage 3 der EnEV die Anforderungen aus Tabelle 1, Zeile 1 eingehalten werden. Für die Werte der Wärmedurchgangskoeffizienten beim erstmaligen Einbau, Ersatz und Erneuerung von Bauteilen sind darin einzuhaltende Höchstwerte definiert [19]. Anhand dieser Vorgaben sind die Bauteile im Simulationsmodell angepasst worden, um die Auswirkungen auf die Energiebedarfe, Verluste und Emissionen vorher / nachher zu vergleichen.

Die Maßnahmen 1 - 3 entstammen dem Planungsleitfaden für Sanierungsmaßnahmen der Deutschen Energie Agentur, mit dem Titel „EnEV minus 30%“. Dieser Leitfaden zählt zu den zugelassenen Standardmaßnahmenkatalogen der EnEV.

Häufig sind auch Dachflächen ungenügend oder gar nicht gedämmt. Dennoch existieren derzeit keine Vorschriften, dass Dachflächen verpflichtend saniert oder energetisch optimiert werden müssen, obwohl bekannt ist, dass die Dämmung von Außenbauteilen grundsätzlich das größte Einsparpotential liefert [24].

Die Auswahl der Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgte auf Grundlage der Vorgaben der EnEV. In Tabelle 4.1 sind die aktuellen und die maximal zugelassenen U-Werte für die einzelnen Bauteile aufgelistet. In der letzten Spalte der Tabelle sind die neuen U-Werte dargestellt, wie sie sich nach dem Anbringen des Dämmstoffes einstellen.

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Tabelle 4.1 Vergleich der Wärmedurchgangskoeffizienten [19]

Bauteil	Wärmedurchgangskoeffizient $U_{\max} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$ , gem. EnEV		$U_{\text{Ist}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	$U_{\text{neu}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
	Wohngebäude und Zonen von NWG mit Innentemperatur > 19 °C (maximal)	Wohngebäude und Zonen von NWG mit Innentemperatur < 19 °C (maximal)	aktueller Zustand	nach Moderni- sierung
Außenwände	0,24	0,35	1,4	0,24
Fenster, Fenstertüren	1,3	1,9	5,5 (EVG) 2,5 (DVG)	1,1
Fenstertüren mit Klapp-, Falt- oder Schiebemechanismus	1,6	1,9	2,5 (AT) 1,4 (IT)	1,1 (AT) 1,1 (IT)
Dachflächen, Wände gegen unbeheizt, oberste Geschossdecke	0,24	0,35	1,5	0,23
Wände und Decken gegen Erdreich und unbeheizte Räume	0,3	keine Anforderung	1,4	0,27
EVG: 1-Scheiben-Verglasung; DVG: 2-Scheiben-Verglasung; AT: Außentüren; IT: Innentüren				

### 4.1.1 Maßnahme 1 - Sanierung der opaken Außenbauteile

Die vorhandenen Wände gegen Außenluft sind verputzt und besitzen ein einschaliges Mauerwerk mit einer circa 1 cm dicken Dämmschicht. Sie haben einen gesamten Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  (vgl. Tabelle 3.3). Ähnlich setzt sich der Aufbau der Wände gegen das Erdreich zusammen, der ebenfalls  $U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  ist und unter zur Hilfenahme von [15] ermittelt wurde. Die Geschossdecken bestehen aus Stahlbeton und Estrich mit einem gesamt U-Wert von  $U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Die gesamte Dachfläche des Gebäudes ist eine Flachdachkonstruktion, mit  $U = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Mit diesen Gebäudeparametern werden die EnEV Zusatzanforderungen an den „mittleren U-Wert für opake Bauteile“ nicht erfüllt (siehe Tabelle 3.6).

Als Maßnahme zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste werden zusätzliche Dämmschichten in Form von Innendämmplatten aus Polystyrol-Partikelschaum angebracht. Der Dämmstoff wird in einer Stärke von 15 cm bei den Dachflächen sowie einer Stärke von 14 cm bei Außenwänden und Böden angebracht und besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,040 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Der U-Wert der Außenwände sinkt dadurch

#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

auf  $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ , der Wert der Dachflächen auf  $U = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Der U-Wert für die Wände und Decken gegen das Erdreich und unbeheizte Zonen auf  $U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Im Simulationsprogramm werden nach Eingabe der Verbesserungsmaßnahmen unmittelbar die Auswirkungen auf den Jahres-Primärenergiebedarf sowie die Zusatzanforderungen an den „mittleren U-Wert“ ausgewiesen. Abbildung 4.1 zeigt mit dem „Energie-label“ eines der möglichen Ausgabeformate des Simulationsprogramms. Neben den Angaben über die Gebäudegeometrie, den Jahres-Primärenergiebedarf und der energetischen Einordnung des Planungsobjektes bietet dieses Ausgabeformat einen Überblick über relevante Veränderungen im Vergleich zur ursprünglichen Variante des Modells.

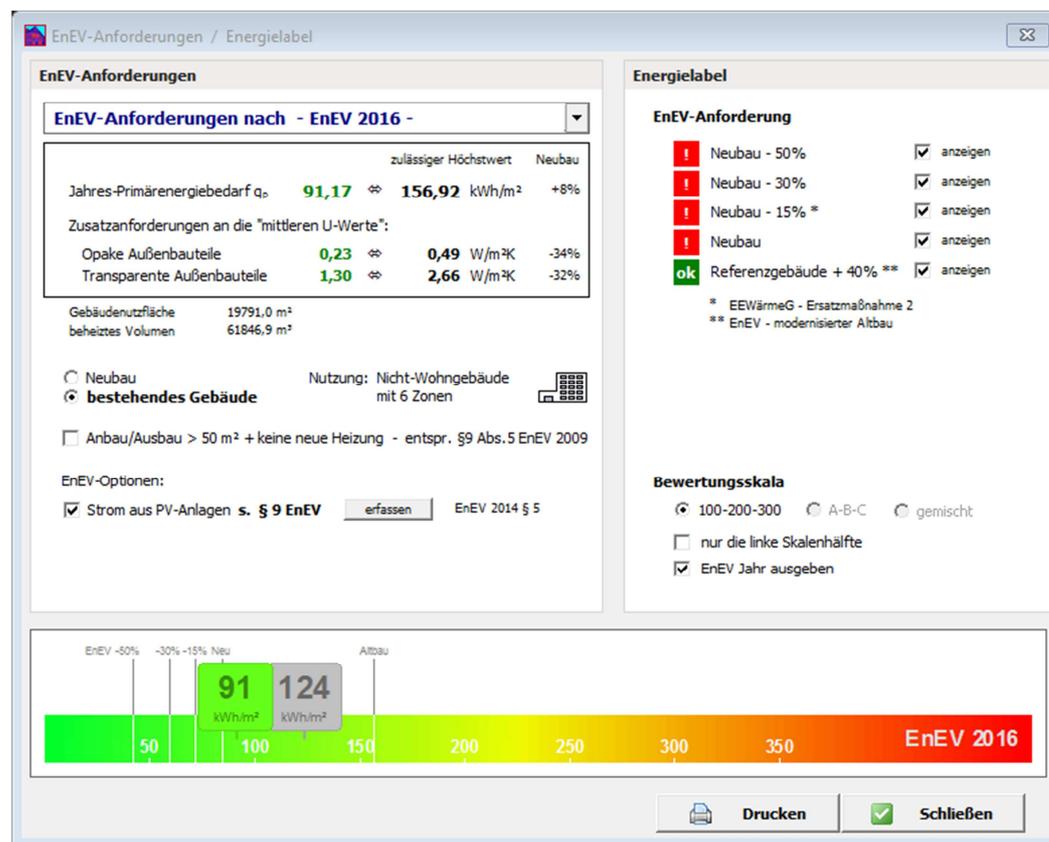


Abbildung 4.1 Energielabel für Maßnahme 1

In Tabelle 4.2 sind die Simulationsergebnisse zusammengefasst und zum Vergleich dem Ist-Zustand und den maximal zulässigen Werten gegenübergestellt. Die Transmissionswärmeverluste und der Jahres-Primär- und Endenergiebedarf des Gebäudes werden signifikant gesenkt. Die Verbesserung der Transmissionswärmeverluste von  $H_T^l = 1,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf  $0,493 \text{ W/m}^2\text{K}$  (siehe Anhang 2) bestätigt die Wirksamkeit der Maßnahme. Dennoch reicht die Sanierung der opaken Außenbauteile nicht aus, um die Verluste den Anforderungen der EnEV entsprechend zu verringern.

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Tabelle 4.2 Simulationsergebnisse - Maßnahme 1

		Ist-Wert	maximal zulässiger Wert nach EnEV	sanierter Zustand
Jahres-Primärenergiebedarf [ $kWh/m^2$ ]		125,2	155,85	91,2
Endenergiebedarf [ $kWh/m^2$ ]		190,5	-	123,0
Transmissionswärmeverlust $H'_T$ [ $W/m^2K$ ]		1,24	0,475	0,493
CO <sub>2</sub> -Emissionen [ $kg/m^2$ ]		41	-	35
Zusatzanforderung an den „mittleren U-Wert“ [ $kWh/m^2$ ]	transparente Außenbauteile	1,297	2,66	1,297
	opake Außenbauteile	1,046	0,49	0,23

Hinsichtlich des Endenergiebedarfs zeigt sich durch die Sanierungsmaßnahme eine starke Verbesserung. Er kann auf circa 65% des ursprünglichen Bedarfes reduziert werden. Die Transmissionswärmeverluste haben sich mehr als halbiert und die Zusatzanforderungen an den mittleren U-Wert der opaken Bauteile werden durch diese Maßnahme erfüllt.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit die Dämmstoffstärken so weit zu erhöhen, bis die Simulation ein entsprechendes Ergebnis aufweist und die Transmissionswärmeverluste ausreichend reduziert werden. Dies ist aus wirtschaftlichen und baulichen Gründen nicht zu empfehlen. Die Wirkung der Dämmstoffstärke auf den gesamten U-Wert eines Bauteils nimmt mit steigender Dicke stark ab [25]. Eine weitere Möglichkeit wäre die Kombination verschiedener Dämmstoffe mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten.

### 4.1.2 Maßnahme 2 - Sanierung der transparenten Außenbauteile

Fenster und Türen setzen sich für die Berechnung des gesamt U-Wertes ( $U_w$ ) aus zwei Komponenten zusammen, dem Anteil des Glases ( $U_G$ ) und des Rahmens ( $U_f$ ). Beide Komponenten gehen in die Berechnung für die „mittleren U-Werte“ ein, sodass sich ein Fenster- und Türentausch sowohl auf den U-Wert der transparenten, als auch den der opaken Bauteile auswirkt.

Zusätzlich haben Fenster und Türen maßgeblich Einfluss darauf, wie Wärme (zum Beispiel durch Sonneneinstrahlung) in das Gebäude eingetragen wird. Der nachzuweisende sommerliche Wärmeschutz ist nicht Bestandteil dieser Masterarbeit.

Seit einigen Jahrzehnten werden standardmäßig doppelt verglaste Fenster verbaut. Diese besitzen, je nach Bauart und Alter, einen Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U = 2,5$  bis  $1,1 W/m^2K$ . Bis auf die Empfangshalle und die Zugangsbereiche sind alle Gebäudeteile mit einer solchen Verglasung ausgestattet. Die verbauten Fenster in der

#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Empfangshalle sind einfach verglast und besitzen einen überschlägigen U-Wert von  $U = 5,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; die übrigen Fenster sind aufgrund fehlender Angaben mit einem  $U = 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  angenommen worden [15]. Die transparenten Außenbauteile des Neubaus entsprechen mit einer 3-Scheiben Wärmeschutzverglasung der Fenster und Türen mit  $U_{\text{W}} = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  den aktuellen EnEV Anforderungen für zu errichtende NWG gemäß § 4.

Die Parameter der Zone „Schalterhalle“ wurden dem realen Zustand angepasst. Sie wird weder beheizt noch mit Kälte versorgt. Derartige Zonen werden als unkonditioniert bezeichnet. Die Innentemperatur ergibt sich aus den internen Lasten (Technik, Personen, Beleuchtung), den solaren Gewinnen durch Außenbauteile und dem Wärmestrom aus den angrenzenden Zonen. Für die Berechnung bedeutet dies geringere Wärmeverluste im Vergleich zu den konditionierten Zonen des Modells. In der Gesamtbilanz wird keine Energie für eine gezielte Klimatisierung aufgewendet. Somit wirken sich schlecht isolierte Bauteile der Schalterhalle weniger stark auf die Gesamtbilanz aus.

Wie Tabelle 3.10 zu entnehmen ist, besteht bei den transparenten Bauteilen grundsätzlich kein Handlungsbedarf, da die Zusatzanforderung an den mittleren U-Wert für transparente Bauteile erfüllt ist. Um das mögliche Einsparungspotential aufzuzeigen wird diese Maßnahme dennoch simuliert. Die transparenten Bauteile des Bestandsgebäudes werden einheitlich durch 3-Scheiben Wärmeschutzverglasung mit einem gesamt U-Wert von  $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  ersetzt. Die Außentüren mit einem U-Wert von  $U = 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik und werden ebenfalls durch Türen mit  $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  ersetzt.

Zusätzlich wird die Sanierung des Daches unverändert aus der vorigen Maßnahme 1 mit einbezogen. Die Simulationsergebnisse werden in Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.3 Simulationsergebnisse - Maßnahme 2

		Ist-Wert	maximal zulässiger Wert nach EnEV	sanierter Zustand
Jahres-Primärenergiebedarf [ $\text{kWh/m}^2$ ]		125,2	155,85	105,1
Endenergiebedarf [ $\text{kWh/m}^2$ ]		190,5	-	151,6
Transmissionswärmeverlust $H'_T$ [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]		1,24	0,475	0,806
CO <sub>2</sub> -Emissionen [ $\text{kg/m}^2$ ]		41	-	35
Zusatzanforderung an den „mittleren U-Wert“ [ $\text{kWh/m}^2$ ]	transparente Außenbauteile	1,297	2,66	0,83
	opake Außenbauteile	1,046	0,49	0,68

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Es sind Verbesserungen in allen gelisteten Anforderungen zu erkennen, jedoch werden durch diese alleinige Maßnahme, ohne Maßnahme 1, keine weiteren Anforderungen gegenüber dem Ausgangsmodell erfüllt.

Der Jahres-Primärenergiebedarf und der Endenergiebedarf des Gebäudes werden gesenkt, was für die Wirksamkeit der Maßnahme spricht. Dennoch ist der Nutzen der Maßnahme zu gering, da die Transmissionswärmeverluste nur in einem nicht ausreichenden Maße gesenkt werden. Eine Umsetzung dieser alleinigen Maßnahme ist daher als nicht realistisch einzustufen.

### 4.1.3 Maßnahme 3 - Kombination von Maßnahme 1 + 2

Etwa 50 bis 75 Prozent der Wärmeverluste eines Gebäudes entstehen aus den Transmissionswärmeverlusten über die Gebäudehülle (opake und transparente Außenbauteile) [26]. Insgesamt werden Maßnahmen an der wärmedämmenden Außenhülle eines Gebäudes als eine der verlässlichsten Methoden zum Einsparen von Energie angesehen. Zur Erreichung der erforderlichen Zielvorgaben ist häufig eine Kombination aus den beiden dargestellten Maßnahmen sinnvoll. Durch das Zusammenfügen der Maßnahmen 1 und 2 ergeben sich die in Tabelle 4.4 gelisteten Ergebnisse.

Tabelle 4.4 Simulationsergebnisse - Maßnahme 3

	Ist-Wert	maximal zulässiger Wert nach EnEV	saniertes Zustand	
Jahres-Primärenergiebedarf [ $kWh/m^2$ ]	125,2	155,85	89,2	
Endenergiebedarf [ $kWh/m^2$ ]	190,5	-	118,5	
Transmissionswärmeverlust $H'_T$ [ $W/m^2K$ ]	1,240	0,475	0,440	
CO <sub>2</sub> -Emissionen [ $kg/m^2$ ]	41	-	29	
Zusatzanforderung an den „mittleren U-Wert“ [ $kWh/m^2$ ]	transparente Außenbauteile	1,297	2,66	0,83
	opake Außenbauteile	1,046	0,49	0,23

Die beiden in den Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 dargestellten Maßnahmen haben den Anforderungen an die EnEV jeweils nicht entsprochen. Erst die Kombination beider erfüllt diese vollständig. Darüber hinaus können die Anforderungen der KfW zur Förderung von Sanierungen „KfW 100“ und „KfW Denkmal“ erfüllt werden.

Der Primärenergiebedarf wird von  $125,2 W/m^2K$  auf  $89,2 W/m^2K$  gesenkt. Die Erneuerung der Außenverglasung und der Außentüren des Bahnhofs senkt den „mittleren U-Wert“ für die transparenten Bauteile von  $1,297 kWh/m^2$  auf  $0,83 kWh/m^2$ . Das Anbringen der Dämmstoffe an den Außenwänden, den Dachflächen sowie den

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Erdreich berührenden Flächen senkt den „mittleren U-Wert“ der opaken Bauteile von  $1,046 \text{ kWh/m}^2$  auf  $0,23 \text{ kWh/m}^2$ , womit allen Anforderungen an ein saniertes Bestandsgebäude entsprochen wird.

Darüber hinaus sinkt der Endenergiebedarf um ca. 40%, von  $190,5 \text{ kWh/m}^2$  auf  $118,5 \text{ kWh/m}^2$ . Auch die Anforderung an die Transmissionswärmeverluste ist durch die Reduzierung von  $H'_T = 1,240 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf  $0,440 \text{ W/m}^2\text{K}$  abgesenkt und somit erfüllt.

### 4.1.4 Zusammenfassung der Maßnahmen 1 - 3

Zum Vergleich der simulierten Maßnahmen an der Gebäudehülle mit dem Ist-Zustand, sind die Ergebnisse in Tabelle 4.5 zusammengefasst dargestellt. Aus Sicht der energetischen Bewertung zeigt sich, dass erst durch die kombinierte Sanierung der Außenhülle in Maßnahme 3 die Zusatzanforderungen an den mittleren U-Wert und die Transmissionswärmeverluste vollständig erfüllt werden, während die einzelnen Maßnahmen 1 und 2 den Anforderungen nur teilweise entsprechen.

Tabelle 4.5 Übersicht der Simulationsergebnisse - Maßnahmen 1 - 3

	Ist-Zustand		Maßnahme 1	Maßnahme 2	Maßnahme 3
	Ist-Wert	zulässiger Höchstwert EnEV 2016			
Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]	125,2	155,85	91,2	105,1	89,2
Endenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]	190,5	-	123,0	151,6	118,5
Transmissionswärmeverlust $H'_T$ [W/m <sup>2</sup> K]	1,24	0,475	0,493	0,806	0,440
CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/m <sup>2</sup> ]	41	-	35	35	29
Zusatzanforderung an den „mittleren U-Wert“ [kWh/m <sup>2</sup> ]	transparente Außenbauteile	2,66	1,297	0,83	0,83
	opake Außenbauteile	1,046	0,23	0,68	0,23

Es zeigt sich ebenfalls, dass der Unterschied von Maßnahme 3 gegenüber Maßnahme 1 nur geringfügig mehr Energieeinsparpotential bietet. Es ist zu prüfen, ob sich Maßnahme 3 trotz der höheren Investitionskosten gegenüber den einzelnen Maßnahmen als wirtschaftlich erweist. Anderenfalls ist bei einer Umsetzung von Maßnahme 1 darauf zu achten, dass die maximalen Transmissionswärmeverluste gegebenenfalls durch zusätzliche Maßnahmen, die nicht in dieser Masterarbeit untersucht werden, eingehalten werden können. Dies könnte beispielsweise durch alternative Dämmmaterialien mit niedrigeren Wärmeleitkoeffizienten erreicht werden.

Die nachfolgende Tabelle 4.6 soll die Verbesserungen und den Effekt auf die Energiebedarfe noch einmal verdeutlichen. Aufgetragen sind die prozentualen Verbesserungen gegenüber dem Ursprungswert. Die farbliche Kennzeichnung stellt in

#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

diesem Fall eine Bewertung von der stärksten Verbesserung bis hin zu schlechtesten Verbesserung dar.

Tabelle 4.6 Prozentuale Veränderung Simulationsergebnisse

		Ist-Wert	Maßnahme 1	Maßnahme 2	Maßnahme 3
Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]		125,2	- 26 %	- 15, %	- 29 %
Endenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]		190,5	- 35 %	- 20 %	- 38 %
Transmissionswärmeverlust $H'_T$ [W/m <sup>2</sup> K]		1,24	- 60 %	- 35 %	- 65 %
CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/m <sup>2</sup> ]		41	- 15 %	- 15 %	- 29 %
Zusatzanforderung an den „mittleren U-Wert“ [kWh/m <sup>2</sup> ]	transparente Außenbauteile	1,297	0 %	- 36 %	- 36 %
	opake Außenbauteile	1,046	- 78 %	-35,0 %	- 78 %

Wie sich die einzelnen Energiebedarfe (Strom, Erdgas, Wärme) im Zuge der simulierten Maßnahmen verändert haben, kann Tabelle 4.7 entnommen werden.

Tabelle 4.7 Vergleich des Brennstoffbedarfs

Bezeichnung	Energiebedarf in [kWh/a]			
	Ist-Zustand	Maßnahme 1	Maßnahme 2	Maßnahme 3
Erdgas E	209.192	214.756	214.902	214.756
Strom-Mix	34.248	45.607	41.496	48.095
Fernwärme	2.179.777	1.233.722	1.630.588	1.167.805
Strom (Hilfsenergie)	179.874	178.806	179.209	179.183

Die Heizungswärme (Fernwärme) nimmt den größten Anteil des Gebäudeenergiebedarfes ein und bietet damit das größte Einsparpotential. Die Bedarfe der anderen Energieträger bleiben nahezu konstant oder steigen sogar an, was darauf schließen lässt, dass sie sich vorwiegend durch eine Änderung der Anlagentechnik beeinflussen lassen.

Maßnahme 3 zeigt die deutlichste Verbesserung im Bereich des Verbrauches an Fernwärme auf. Die Einsparung gegenüber dem Ist-Zustand beträgt etwa 45%, sodass die dadurch eingesparten Brennstoffkosten ein wichtiges Merkmal für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kapitel 5 darstellen.

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

---

Eine genauere Betrachtung der entstehenden Investitionskosten und den daraus resultierenden verringerten Energiekosten, den neu berechneten Energieverlusten und Emissionen, erfolgt in Kapitel 5.

### 4.2 Konzepte zur Modernisierung der Anlagentechnik

Das Beheizen der Räume des Heidelberger Hauptbahnhofs erfolgt mit Fernwärme der Stadtwerke Heidelberg. Die gelieferte Fernwärme wird bereits heute mit einem Primärenergiefaktor von  $f_{P,FW} = 0,5$  erzeugt [22] und liegt damit unterhalb des durch die DIN V 18599-1 bezifferten Wertes von  $f_{P,FW} = 0,7$ . Die Fernwärme wird mittels Kraft-Wärme-Kopplung gewonnen und besitzt einen regenerativen Anteil von 19,8% [27]. Ziel der Stadtwerke ist es, den Anteil an erneuerbaren Energien durch Holz-Heizkraftwerke und Biomethan-Blockheizkraftwerke weiter zu steigern.

Die Klimatisierung des Gebäudes erfolgt derzeit über ein dezentrales System mittels Klima-Split-Geräten. Diese Variante ist unwirtschaftlich und kostenintensiv, da der Energieträger Strom dafür notwendig ist.

Im Folgenden werden alternative Anlagenkonstellationen vorgestellt, mit denen effizient Wärme und Kälte erzeugt werden kann. Ziel ist es, den jährliche Primärenergiebedarf von  $Q_P = 125,2 \text{ kWh/m}^2$  und die ausgestoßenen Emissionen zu reduzieren. Randbedingung bei Veränderungen der Anlagentechnik ist das Einhalten von § 11 der EnEV „Aufrechterhaltung der energetischen Qualität“. Es wird vorgeschrieben, dass Außenbauteile und energiebedarfssenkende Einrichtungen in Anlagen nur dahingehend getauscht werden dürfen, dass sich die energetische Qualität des Gebäudes nicht verschlechtert.

Durch die nachfolgend aufgezeigten Maßnahmen sollen die Energiebedarfe zum Betreiben des Gebäudes möglichst effizient und mit einem guten Jahres-Primärenergiebedarf bereitgestellt werden. Durch effizientere Nutzung der Rohstoffe und der daraus resultierenden Verringerung des Brennstoffbedarfs fallen weitaus weniger Brennstoffkosten und Schadstoffemissionen an.

Zur Optimierung der bisherigen ineffizienten, dezentralen Kälteversorgung soll für den gesamten Gebäudekomplex auf eine deutlich effizientere, kombinierte Wärme- und Kälteversorgung umgestellt werden. Hierdurch wird der Strombedarf für die Klima-Split-Geräte weitestgehend entfallen und der Strombedarf insgesamt auf ein niedrigeres Niveau gebracht. Für das neue Konzept zur Kältebereitstellung sind Absorptions- oder Kompressionskältemaschinen denkbar. Ebenso wird die Installation einer weiteren PV-Anlage auf dem Dach des Bestandsgebäudes als realistisch angesehen, mit dem Ziel den Eigenstrombedarf des Gebäudes größtenteils abzudecken.

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Nachfolgend werden drei Anlagenkonzepte aus der Kombination verschiedener Technologien mit unterschiedlichen Stärken vorgestellt und in der Simulationssoftware abgebildet. Im Vordergrund steht die Bewertung nach EnEV und den damit verbundenen Betriebs-, Brennstoff- und überschlägigen Investitionskosten. Die Planung durch eine Fachfirma kann diese Masterarbeit nicht ersetzen. Die Dimensionierung der Anlagen erfolgt anhand der ermittelten Werte der Simulationssoftware.

### 4.2.1 Anlagenkonzept 1 - Blockheizkraftwerk + Spitzenlastkessel + Absorptionskältemaschine

Die gekoppelte Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie ist im Hinblick auf Ressourcenschonung und Umweltschutz eine Möglichkeit Energie bereitzustellen. Der Hauptvorteil des Prinzips Kraft-Wärme-Kopplung besteht in der systematischen Nutzung der im Brennstoff enthaltenen Exergie, also dem nutzbaren Teil der Energie. Bei einer optimalen Konzeption und optimalem Betrieb einer KWK-Anlage lässt sich gegenüber einer getrennten Erzeugung von Strom und Wärme etwa bis zu einem Drittel der Primärenergie einsparen (siehe Abbildung 4.2).

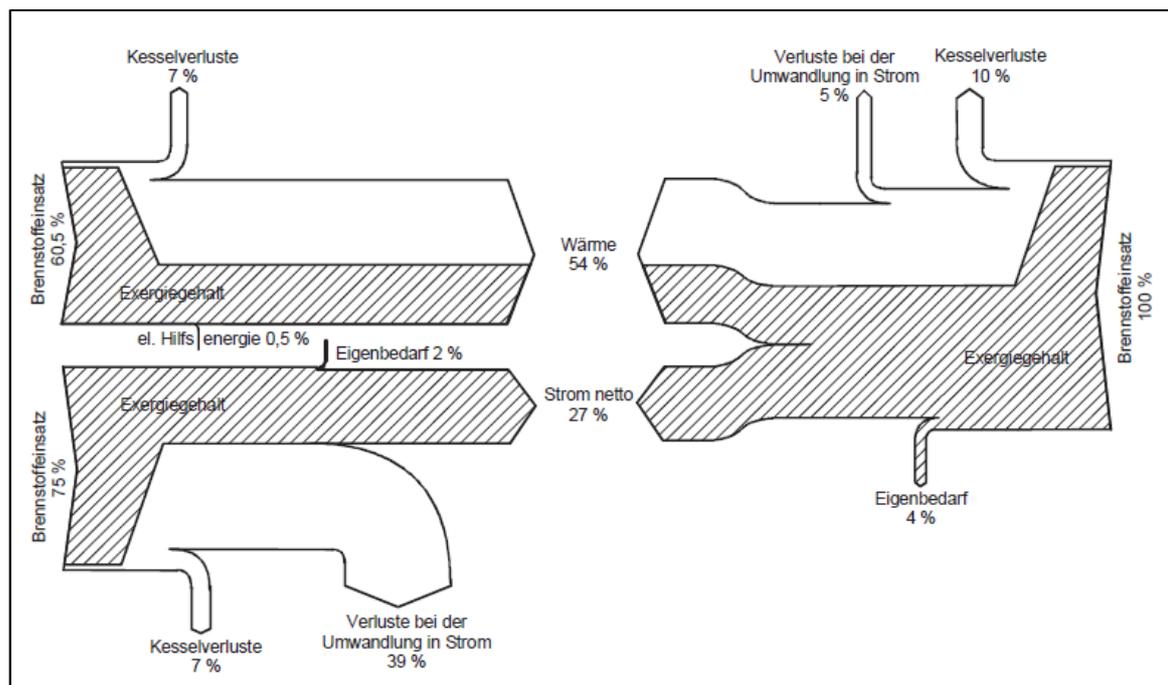


Abbildung 4.2 Energie-/Exergiefluss für Strom- und Wärmeerzeugung [28]

Das Prinzip hinter dem Begriff Kraft-Wärme-Kopplung ist das direkte und gekoppelte Erzeugen von Wärme und Strom vor Ort, sodass weitere Umwandlungs- und Verteilungsverluste minimiert werden. KWK-Aggregate werden direkt mit einem Brennstoff (Öl oder Gas) befeuert. Diese Aggregate können beispielsweise aus einem Verbrennungsmotor + Generator, einer Gas-/Dampfturbine + Generator oder einer Brennstoffzelle bestehen. Dabei erzeugt der Generator den nutzbaren Strom und die bei



#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

---

Gerade in den Sommermonaten, bei geringem Wärmebedarf des Gebäudes, besteht zur Verbesserung der Auslastung des BHKW die Möglichkeit, eine Kompressions- oder Absorptionskältemaschine in das System zu integrieren. Kälteversorgungsanlagen zur Klimatisierung des Gebäudes haben gerade in den Sommermonaten ihren Maximalbedarf an elektrischer Energie. Zur Reduzierung des elektrischen Energiebedarfes vom städtischen Stromanbieter sowie zur Verbesserung der Auslastung des Wärmenetzes werden die Kälteanlagen mit der nicht zu Heizzwecken benötigten Abwärme des BHKWs beschickt.

Die Konzeption, Auslegung und Betriebsweise eines BHKW ist ein sehr komplexes Thema und kann in dieser Masterarbeit nur oberflächlich betrachtet werden. Grundsätzlich kann die Betriebsweise eines Blockheizkraftwerks nach der Heizlast, also wärmegeführt, oder nach der Stromenergiebilanz, also stromgeführt, erfolgen. Ein kombinierter Betrieb ist ebenfalls möglich. Die Festlegung der Betriebsweise erfolgt durch den Anlagenplaner und beruht auf den Energiebedarfen des Gebäudes sowie deren Schwankung zwischen Tages- und Jahresgang, da sich die Bedarfe erheblich unterscheiden können.

Die Anlagendimensionierung erfolgt anhand der Betriebsweise. Oftmals werden BHKW-Anlagen wärmegeführt betrieben, um den eigenen Wärmebedarf weitestgehend zu decken. Für einen wirtschaftlichen Betrieb sollte ein BHKW so ausgelegt sein, dass es zwischen 4000 und 5000 Volllaststunden im Jahr in Betrieb ist und zwischen 10 und 40 Prozent der Spitzenheizlast abdeckt [31] [32]. In anderen Quellen wiederum finden sich Angaben, dass ein herkömmlich ausgelegtes BHKW zwischen 50 % bis maximal 70% des Wärmebedarfes decken und trotzdem wirtschaftlich betrieben werden kann. Im Einzelfall können die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen so gut sein, dass die BHKW-Anlage alleine zwischen 90...100% des Wärmebedarfes decken kann und dabei wirtschaftliche Ergebnisse erreicht [33]

Um den Einsatz von BHKW-Anlagen zu forcieren gibt es verschiedene Anreizprogramme der Bundesregierung, bei denen der Betreiber Fördermitteln z.B.: in Form von Einspeisevergütung erhält oder eine Vergütung für die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Ausstoß [34]. Sollten beispielsweise im Sommer für Wärme oder Strom nicht ausreichend Abnehmer vorhanden sein, können Überschüsse ins lokale Versorgungsnetz eingespeist oder zum Betrieb der Absorptionskältemaschinen verwendet werden.

Als Antriebskraft für Absorptionskältemaschinen dient ein thermischer Kompressor, der durch eine Wärmequelle angetrieben wird (BHKW-Abwärme). Das Funktionsprinzip von Absorptionskältemaschinen beruht auf der physikalischen Tatsache, dass der Kältemittel-Dampfdruck von Zweistoffgemischen mit gegebener Temperatur bei zunehmender Konzentration des Lösungsmittels abnimmt. Im Vergleich dazu werden

#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

---

Kompressionskältemaschinen mit einem elektrisch angetriebenen Kompressor betrieben.

Im Wesentlichen besteht eine Absorptionskältemaschine aus den folgenden Komponenten:

- **Austreiber:** Im Austreiber wird durch Zuführung der Wärme aus einer schwachen Lithiumbromid-Lösung Wasser ausgekocht. Das Auskochen konzentriert die Lösung. Der erzeugte Dampf strömt in den Verflüssiger.
- **Verflüssiger:** Im Verflüssiger wird dem aus dem Austreiber zuströmenden Dampf mittels Kühlwasser Wärme entzogen. Dadurch wird der Dampf verflüssigt.
- **Verdampfer:** Hier wird bei sehr niedrigem Druck das Kältemittel über die Rohre des eingebauten Wärmetauschers gesprüht. In den Rohren fließt das Wasser des Kaltwassernetzes (Nutzenergie). Durch das Verdampfen des Kältemittels wird dem Kaltwasser Wärme entzogen.
- **Absorber:** Der Kältemitteldampf strömt vom Verdampfer in den Absorber. Dort wird der zuströmende Kältemitteldampf durch die im Absorber versprühte starke Lösung absorbiert. Die entstehende Wärme wird mittels Wärmetauscher über das Kühlmittel abgeführt. Durch Absorbieren von Kältemitteldampf wird die Lösung im Absorber schwächer. Ein Teil der Lösung wird daher ständig zurück zum Austreiber gepumpt, um den Kreislauf aufrecht zu erhalten.
- **Wärmetauscher:** Der Wärmetauscher ist zwischen Absorber und Austreiber eingebunden und hat die Aufgabe die Wärmeenergie der heißen, starken Lösung auf dem Austreiber an die kalte, schwache Lösung, die dem Absorber zuströmt, abzugeben, um so den Gesamtenergieverbrauch zu verringern [28].

Ein wesentlicher Vorteil von Absorptionskälteanlagen gegenüber Kompressionskälteanlagen ist der deutlich niedrigere elektrische Energieverbrauch. Des Weiteren ist der Aufwand für Wartung und Instandhaltung deutlich niedriger, da es nur wenige bewegliche Teile gibt [28].

In der nachfolgenden Abbildung 4.4 ist der Aufbau einer Absorptionskältemaschine dargestellt und die beschriebenen Bauteile und Prozessschritte können dem Bild entnommen werden.

#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

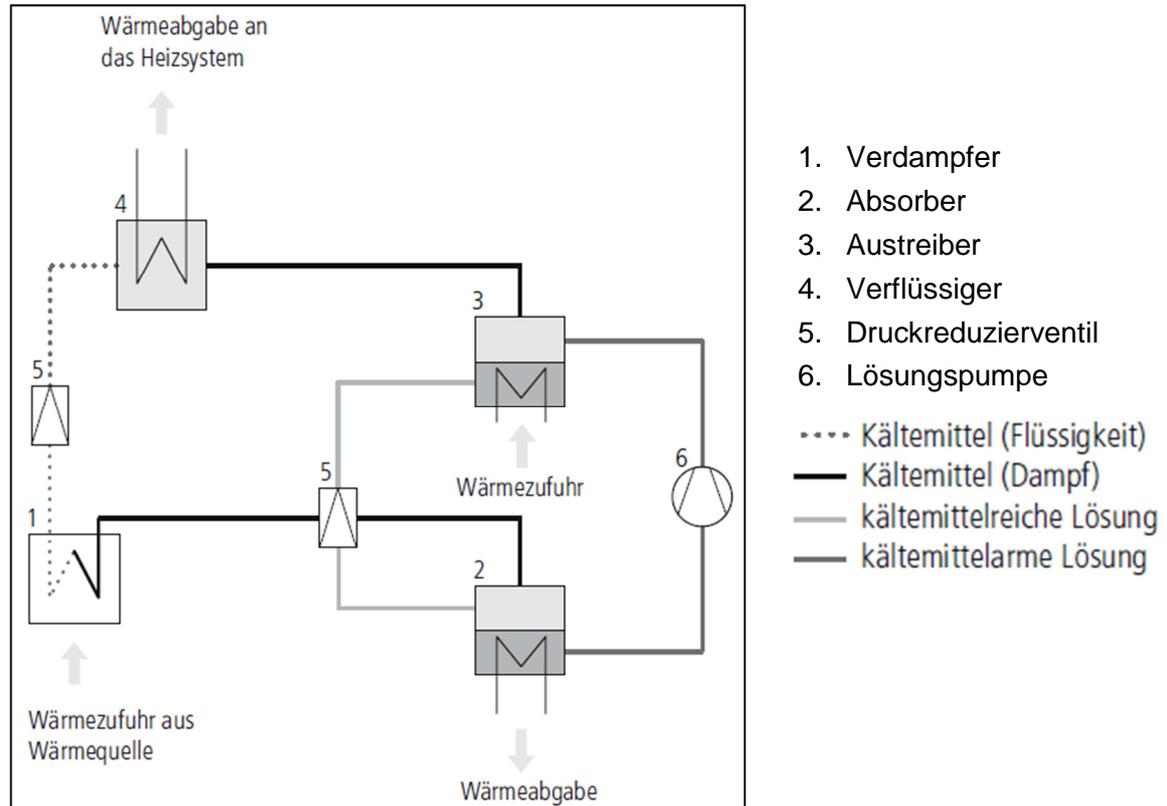


Abbildung 4.4 Aufbau einer Absorptionswärmepumpe [31]

Ein weiteres Teilprojekt innerhalb dieses Konzeptes ist der Umbau der Kesselanlage zur Warmwasserbereitung. Die bisherige Anlage wird durch einen Brennwertkessel vom Typ „Buderus - Logano plus GE615 645 kW“ und mehrere Pufferspeicher vom Typ „Logalux LTN950“, der Firma Buderus, ersetzt. Die Pufferspeicher sind in dieser Anlagenkonstellation wichtig, um An- und Abschaltzeiten von Kessel und BHKW zu minimieren und deren Lebensdauer zu verlängern.

Der Brennwertkessel wird zusätzlich zur Brauchwassererwärmung auch als Spitzenlastkessel für das BHKW, welches die Grundlast abdeckt, genutzt. Das BHKW deckt 60% des maximalen Wärmebedarfs ab. 40% des maximalen Wärmebedarfs übernimmt der Spitzenlastkessel, der diese kurzfristig zur Verfügung stellen kann. Die Maßnahme stellt sich im Simulationsprogramm wie in Abbildung 4.5 gezeigt dar. Der Kessel arbeitet nach der Brennwert-Kessel-Technologie und mit einem höheren Wirkungsgrad gegenüber anderen Kesselarten. Dies resultiert aus der starken Abkühlung der Abgase, sodass der darin befindliche Wasserdampf an der Kesselwand auskondensiert. Durch den Wechsel des Aggregatzustandes von Dampf zu Wasser wird zusätzlich zum Heizwert noch die Kondensationswärme nutzbar. Es können Wirkungsgrade oberhalb von 100% realisiert werden [35].

#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

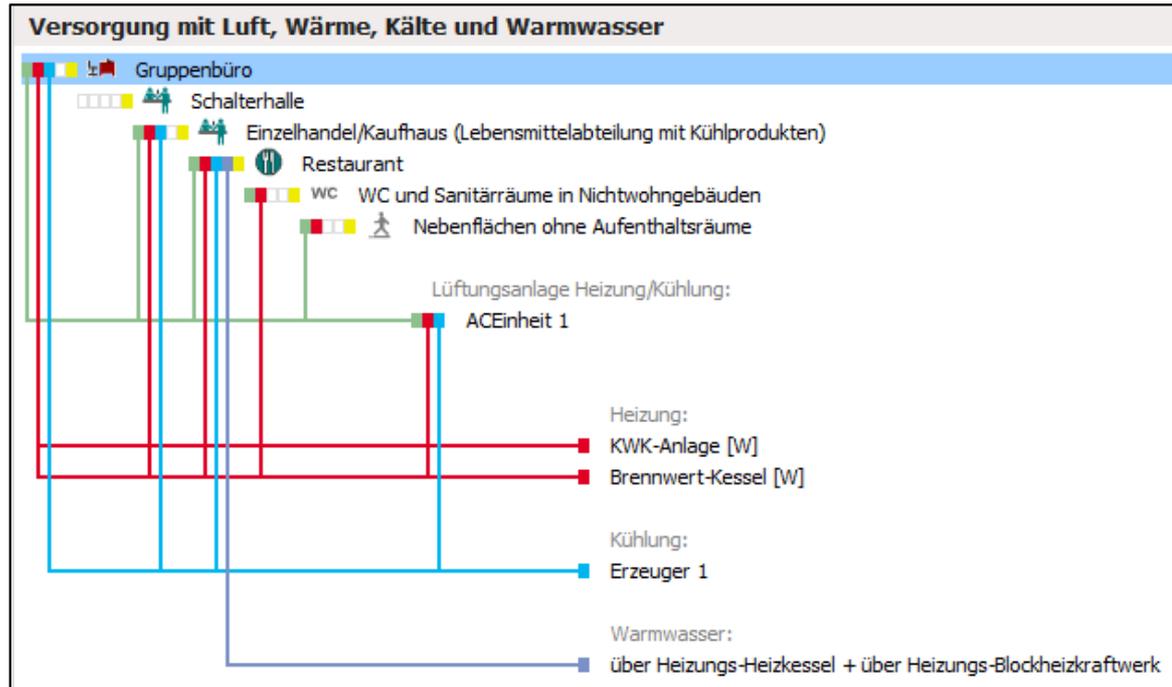


Abbildung 4.5 Übersicht Anlagentechnik – Konzept 1

Die Kesselgröße sowie die notwendige BHKW Größe wurden mit Hilfe eines Excel Programmes [36] und der Ausgabedaten des Simulationsprogrammes ermittelt. Anhand des jährlichen Wärmeenergie- und Strombedarfs ist es möglich die Größe des BHKW zu bestimmen. Weitere Details der Anlagen können den Planungsunterlagen der Anlagenhersteller entnommen werden. Die Anlagentypen und Hersteller sind als Beispiele für die Berechnungsgrundlage angenommen und als Einstellparameter in das Programm übernommen worden.

Tabelle 4.8 Anlagenkennwerte Konzept 1

Brennwertkessel	Hersteller / Typ:	Buderus - Logano plus GE615
	Nennleistung:	645 kW
	Wirkungsgrad (max.):	106,2%
BHKW	Hersteller / Typ:	Viessmann – VITOBLOC 200
	Leistung:	207 kW Wärmeleistung 140 kW elektrisch
	Wirkungsgrad (ges., max.):	90,4%
Kältemaschine	Hersteller / Typ:	ENGIE Refrigeration – Spectrum 025
	Kälteleistung (max.):	bis 300 kW
	Energy Efficiency Ratio (max.):	4,4

Für die vorgestellte Anlagenkonstellation einer KWK-Anlage (BHKW) in Kombination mit Absorptionskältemaschinen und Spitzenlastkesseln ergeben sich folgende Berechnungsergebnisse:

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Tabelle 4.9 Simulationsergebnisse - Konzept 1

		Ist-Wert	maximal zulässiger Wert nach EnEV	nach Umsetzung des Konzeptes 1
Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]		125,2	155,85	124,1
Endenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]		190,5	-	163,4
CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/m <sup>2</sup> ]		41	-	31
Brennstoffbedarf [kWh]	Erdgas E	232.200	-	1.989.306
	Strom-Mix (*)	34.248	-	0
	Fernwärme	2.179.777	-	0
	Strom (*) (Hilfsenergie)	179.806	-	264.170
(*) : inklusive Zugewinne durch PV-Strom				

Durch dieses Anlagenkonzept verringert sich der rechnerische Jahres-Primärenergiebedarf nur geringfügig von 125,2 kWh/m<sup>2</sup> auf 124,1 kWh/m<sup>2</sup>.

Die Brennstoffbedarfe verschieben sich hin zu anderen Energieträgern. Das erdgasbetriebene BHKW stellt die Heizungswärme deutlich effizienter als das bisherige Fernwärmesystem zur Verfügung, jedoch wird dieser positive Effekt durch den Spitzenlastkessel und auch durch die Verwendung von Erdgas als einzigen Energieträger statt der Fernwärme negiert. Die notwendige Menge elektrischer Energie (Strom-Mix) wird von der PV-Anlage 1 vollständig abgedeckt. Der Hilfsenergiebedarf (Strom) steigt beim Umsetzen dieser Maßnahme an. Zusätzliche Pumpen zum Umwälzen der Kühlkreise der Absorptionskältemaschinen sind beispielsweise eine Ursache dafür.

In Summe kann der Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Emissionen um 24%, von 41 kg/m<sup>2</sup> auf 31 kg/m<sup>2</sup> gesenkt werden. Eine detailliertere Betrachtung der ökonomischen und ökologischen Faktoren erfolgt in Kapitel 5.

### 4.2.2 Anlagenkonzept 2 –Fernwärmeversorgung + Absorptionskältemaschine

Die Stadt Heidelberg versorgt den Heidelberger Hauptbahnhof mit Fernwärme, welche auf Grund des hohen Anteils an regenerativen Energien mit einem Primärenergiefaktor von  $f_{P,FW} = 0,5$  zertifiziert ist. Im Vergleich dazu besitzen fossile Brennstoffe wie Erdgas E oder Flüssiggas einen Primärenergiefaktor von  $f_{P,Gas} = 1,1$ , Strom von  $f_{P,Strom} = 1,8$ .

In Anlagenkonzept 2 bleibt die vorhandene Fernwärmeversorgung für eine kombinierte Wärme- und Kälteversorgung bestehen. Lediglich die Anlagentechnik für die bisher ineffiziente, dezentrale Kühlung mittels Klima-Split-Geräten während der Sommermonate wird neu konzipiert.

Die technischen Möglichkeiten zum Betreiben von Absorptionskältemaschinen an einem Fernwärmenetz sind vorhanden und wurden deutschlandweit bereits in einigen Projekten

#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

umgesetzt [37] [38]. Die Modernisierung der Fernwärmeübergabestation am Heidelberger Hauptbahnhof durch die Installation von zusätzlichen Komponenten wie Pumpen, Rohrleitungen, Wärmetauschern und den Absorptionskältemaschinen ist theoretisch und technisch in den Heizungsräumen des Gebäudes umsetzbar. Das Funktionsprinzip der Kältemaschinen wurde bereits in Kapitel 4.2.1 beschrieben.

Der Vorteil des Einsatzes von Absorptionskältemaschinen, der auch zur Reduzierung des elektrischen Energiebedarfes sowie zur Verbesserung der Auslastung des Wärmenetzes führt, ergibt sich aus der Möglichkeit die Kälteanlagen mit der Wärme des Fernwärmenetzes zu betreiben. Dadurch erhöht sich im Sommer der Nutzungsgrad des gesamten Wärmenetzes, was ebenfalls im Interesse des Fernwärmenetzbetreibers liegt.

Der Rückbau der Kesselanlage zur Bereitstellung des Brauchwassers kann in diesem Zuge mit vorgenommen werden, da die Fernwärmeversorgung auch im Sommer ein ausreichendes Temperaturniveau liefert, um das Brauchwasser zu erwärmen. Dazu muss eine Übergabestation zwischen Fernwärmenetz und dem Brauchwasserversorgungsnetz des Bahnhofs mit Hilfe von entsprechenden Wärmetauschern hergestellt werden. In den Ergebnissen spiegelt sich diese Anlagenkonstellation wie folgt wieder:

Tabelle 4.10 Simulationsergebnisse - Konzept 2

	Ist-Wert	maximal zulässiger Wert nach EnEV	nach Umsetzung des Konzeptes 2
Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]	125,2	155,85	102,9
Endenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]	190,5	-	167,2
CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/m <sup>2</sup> ]	41	-	36
Brennstoffbedarf [kWh]	Erdgas E	232.200	0
	Strom-Mix (*)	34.248	0
	Fernwärme	2.179.777	2.269.853
	Strom (*) (Hilfsenergie)	179.806	230.565
(*) : inklusive Zugewinne durch PV-Strom			

Das vorgestellte Anlagenkonzept 2 weist eine Verbesserung des Jahres-Primärenergiebedarfes auf. Dieser verbessert sich um 17%, auf 102,9 kWh/m<sup>2</sup>. Der Verzicht auf einen Kessel zur Brauchwasserbereitung senkt den Bedarf an Erdgas auf 0 kWh.

Über die PV-Anlage 1 auf dem Dach des Neubaus wird der Eigenbedarf an Strom-Mix vollständig abgedeckt, sodass lediglich elektrische Energie als Hilfsenergie für den Betrieb der Beleuchtung, Pumpen, Ventilatoren, etc. benötigt wird.

Der Bedarf an Fernwärme steigt um etwa 4% im Vergleich zum Ist-Wert an. Dieser Mehrverbrauch ergibt sich aus dem zusätzlichen Wärmebedarf zum Betreiben der

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

---

Absorptionskältemaschine, abzüglich der Minderverbräuche durch eine Modernisierung der Isolation der Rohrleitungen und Übergabestationen.

### 4.2.3 Anlagenkonzept 3 –Erdgas Wärmepumpe + PV-Anlage + Kompressionskältemaschine

Ein in der Gebäudetechnik verbreitetes Konzept zum Heizen und Kühlen ist eine Versorgung über erdgasbetriebene Sole-Wasser-Wärmepumpen in monovalenter Betriebsweise. Hierbei könnte auf die aktuelle Fernwärmeversorgung komplett verzichtet werden. Für die Kühlung wird eine stromgetriebene, geothermische Kältemaschine eingesetzt. Das Wirkprinzip von Wärmepumpen und Kältemaschinen beruht auf demselben thermodynamischen Kreisprozess, dem linksdrehenden Carnot-Prozess. Für den Strombedarf soll die zusätzliche Installation einer PV-Anlage (nachfolgend PV-Anlage 2 genannt) auf dem bisher ungenutzten Dach des Bestandsgebäudes einen Teil des Eigenbedarfs an elektrischer Energie abdecken.

#### ***Wärmepumpen und Kältemaschinen***

Mit Wärmepumpen und Kältemaschinen wird die Nutzung von Umweltwärme aus dem Boden, dem Wasser oder der Luft ermöglicht. In dieser Masterarbeit wird als Wärmequelle der Erdboden über Erdsonden genutzt. Der Unterschied zwischen Wärmepumpen und Kältemaschinen liegt lediglich auf der Seite des Nutzens. Wird der Umgebung Wärme entzogen und zu Heizzwecken auf ein höheres Temperaturniveau gebracht, spricht man von einer Wärmepumpe. Eine Kältemaschine entzieht einem zu kühlenden Körper die Wärme, um diese an die Umgebung abzuführen.

Ein praktisches Beispiel für einen vergleichbaren Kreisprozess ist der in Kühl- und Gefrierschränken ablaufende Prozess. Der Nutzen eines Kühlschranks ist die Erzeugung von Kälte durch das Abführen der Wärme. Der Kühlschrank entzieht dem Innenraum die Wärme und nimmt diese über das Kältemittel auf. Anschließend wird die aufgenommene Wärmeenergie über den Verflüssiger an der Rückwand des Gerätes an die Umgebung abgegeben.

Durchschnittlich liegt das Verhältnis von Antriebsenergie zu Umweltenergie von Wärmepumpen bei 1:3. Dieses Verhältnis variiert jedoch von Anlagenart und Einsatzbedingungen und wird über den Jahresnutzungsgrad oder die Aufwandszahl (Kehrwert des Jahresnutzungsgrades) beschrieben. Der Jahresnutzungsgrad eines Wärmeerzeugers ist ein dimensionsloser Kennwert, der das Verhältnis der abgegebenen Energie (Nutzen) zu der aufzubringenden Energie (Aufwand) angibt [38]. In Tabelle 4.11 sind Aufwandszahlen für Wärmepumpen aufgelistet.

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Tabelle 4.11 Aufwandszahlen für Wärmepumpen [39]

Wärmerzeuger		Aufwandszahl [-]
Elektro-Wärmepumpen	Wasser-Wasser	0,22...0,33
	Sole-Wasser	0,26...0,38
	Luft-Wasser	0,32...0,45
	Luft-Luft	0,28...0,34
Brennstoffbetriebene Wärmepumpen	Wasser-Wasser	0,56...0,63
	Sole-Wasser	0,56...0,67
	Luft-Wasser	0,63...0,73

Die Wärmepumpenbezeichnung in Tabelle 4.11 Spalte 2 richtet sich dabei nach dem Medium das zur Aufnahme der Energie von der Wärmequelle genutzt wird und dem Medium, an das es die erzeugte Wärme abgibt. So wird unterschieden zwischen:

- Luft/Luft-Wärmepumpe
- Luft/Wasser-Wärmepumpe
- Sole/Wasser-Wärmepumpe
- Wasser/Wasser-Wärmepumpe

Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist die Wahl des Wärmepumpenantriebs. Wärmepumpen und Kältemaschinen können mittels Strom oder eines Brennstoffs betrieben werden. Auch die Technologie der Wärmepumpe spielt bei der Unterscheidung eine wichtige Rolle. Wärmepumpen lassen sich in folgende Gliederung überführt:

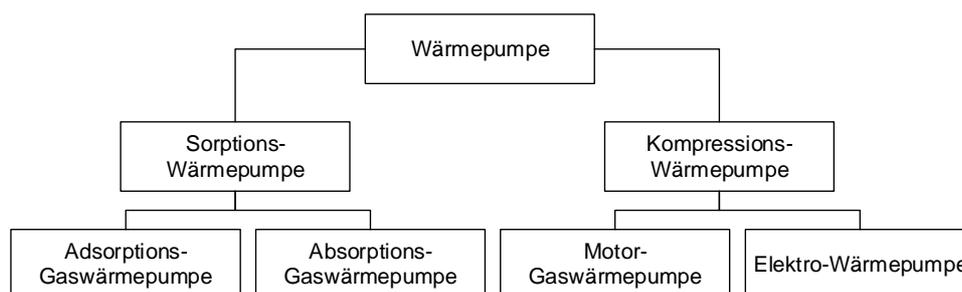


Abbildung 4.6 Technologische Einteilung von Wärmepumpen

Das Funktionsprinzip einer Wärmepumpe ist dem einer Kältemaschine sehr ähnlich und ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Geräte, die auf diesem Prozess aufbauen werden nach Art und Nutzung unterschieden. Liegt der Nutzen auf der Seite der Verflüssigung, also der Abgabe von Wärme in einen Raum oder ein Heizsystem, so handelt es sich um eine Wärmepumpe. Liegt der Nutzen des Gerätes bei der Verdampfung, also dem Entzug von Wärme, ist die Maschine eine Kältemaschine (z.B. Kühlschrank).

#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Grundsätzlich kann jede Wärmepumpe kühlen und jede Kältemaschine heizen. Bei der Installation von parallel geschalteten Wärmepumpen kann je nach Steuerung beides zeitgleich erfolgen [40].

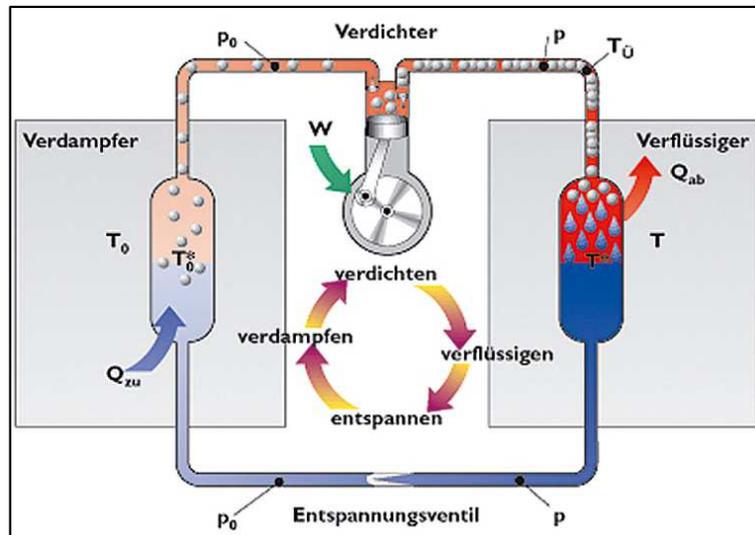


Abbildung 4.7 Funktionsprinzip einer Wärmepumpe [38]

Der dargestellte Prozess läuft in den nachfolgend beschriebenen 4 wichtigen Schritten ab:

Schritt 1 – Verdampfung: Ein Kältemittel wird durch eine Wärmezufuhr (thermisch oder elektrisch) auf einem niedrigen Temperaturniveau verdampft. Der Phasenwechsel findet isotherm statt, d.h. ohne Temperaturänderung des Kältemittels. Die dafür notwendige Energie wird dem Wärmequellenmedium entzogen.

Schritt 2 – Verdichtung: das verdampfte Kältemittel wird mittels mechanischer Energie verdichtet. Dadurch erhöht sich die Temperatur des Kältemittels. Dieser Vorgang erfolgt idealerweise isentrop, d.h. ohne Entropiezunahme.

Schritt 3 – Kondensation: Im Kondensator erfolgt eine isotherme Kondensation des Kältemittels. Die Temperatur des Wärmesenkenmediums muss dafür niedriger als die des verdampften Kältemittels sein. Über die Kondensationsenthalpie wird an das Wärmesenkenmedium abgegeben.

Schritt 4 – Expansion: Das Kältemittel wird isenthalp, d.h. ohne Änderung der Enthalpie entspannt. Das Expansionsventil dient zur Abgrenzung des Druckniveaus zwischen Kondensator und dem Verdampfer.

In der Praxis ist dieser Prozess mit verschiedenen Verlusten behaftet, sodass der ideale Wärmepumpenkreislauf nicht erreicht werden kann. Es treten unter anderem Verluste im

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

---

Verdampfer auf, Temperaturänderungen bei der Verdampfung und Expansion oder Wärmeverluste durch Wärmeleitung und im Kondensator.

### **Die Erdgas-Wärmepumpe**

Zur Deckung des Heizwärmebedarfs berechnet das Simulationsprogramm eine notwendige Nennleistung der Wärmepumpenanlage von 977 kW. Um die Leistung zu erreichen sind entsprechend viele Erdsonden notwendig. Die *VDI 4640 – Thermische Nutzung des Untergrundes* gibt Rahmenbedingungen und Standardwerte für die Berechnung vor, sodass eine Vorplanung von Anlagen erfolgen kann. Beispielsweise werden allgemeine Richtwerte zur spezifischen Entzugsleistung des Untergrundes angegeben. Sie liegen je nach Qualität des Bodens zwischen 20 ... 70 W/m Sondenlänge. Bei der Berechnung der Entzugsleistung darf beispielsweise mit einer mittleren Sondenleistung von 50 W/m gerechnet werden. Ebenso sind Bohrungstiefen zwischen 50 ... 200 m gängig, wobei es bei Erdsonden-Anlagen der wasserrechtlichen Genehmigung des Wasserwirtschaftsamtes bedarf [40]. Nach Rücksprache mit dem *Amt für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie* ist die Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden am Standort Heidelberg Hauptbahnhof grundsätzlich möglich. Zum Schutz der tiefer nutzbaren Grundwasservorkommen ist die Bohrtiefe in diesem Gebiet auf 68 m begrenzt. Die Berechnung der notwendigen Anzahl an Erdwärmesonden bei einer mittleren Sondenleistung von 50 W/m und einer maximalen Bohrungstiefe von 68 m ergibt, dass 288 Bohrungen getätigt werden müssen, um eine Anlagenleistung von 955 kW zu realisieren. Dieser Wert kann durch Probebohrungen und Messungen der tatsächlichen Entzugsleistung verifiziert werden.

### **Die PV-Anlage 2**

Um den bestehenden Eigenenergiebedarf des Planungsobjektes an elektrischer Energie zu großen Teilen abzudecken, wird eine neue PV-Anlage auf dem Flachdach des Bestandsgebäudes installiert. Umweltenergie besitzt einen Primärenergiefaktor von 0,0 und steht ganzjährig in unterschiedlichem Maße zur Verfügung. Die Kenndaten der PV-Anlage sehen wie folgt aus:

Hersteller:	Solarkauf
Modul:	Luxra PV72 (195W)
Anzahl Module:	1226
Fläche gesamt:	1565,2 m <sup>2</sup>
Leistung Module:	239,07 kW <sub>p</sub>
jährlicher Ertrag:	268.885 kWh
davon nach §5 davon anrechenbar:	237.701 kWh

#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Die PV-Module stehen in südlicher Ausrichtung unter einem Neigungswinkel von 33°, sodass die Einstrahlung der Sonne optimal erfolgen kann. Die errechneten Erträge des Photovoltaik-Systems sowie den nach §5 der EnEV anrechenbaren Teil können dem Anhang 3 entnommen werden. In Abbildung 4.8 ist ein 3D-Modell der Anlage dargestellt, wie es mit dem Simulationsprogramm eingegeben wurde.

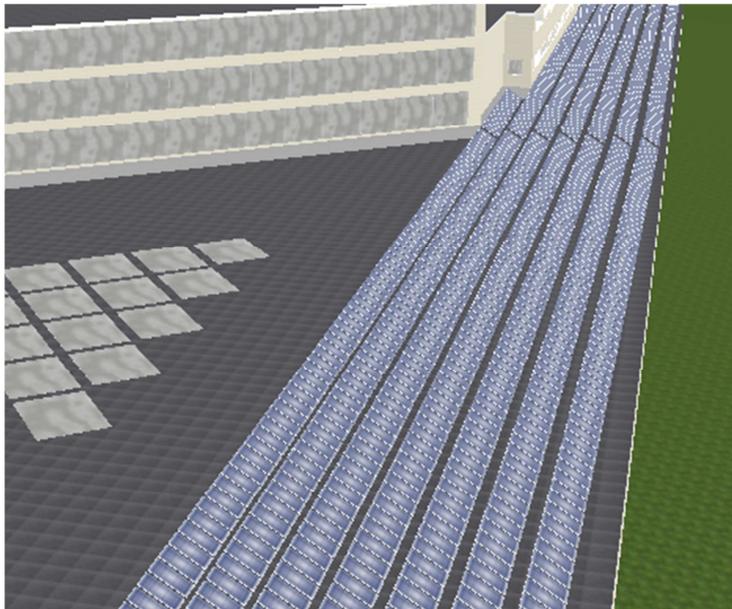


Abbildung 4.8 3D-Modell der PV-Anlage 2 für Konzept 3

Die Kombination aus Wärmepumpen und PV-Anlagen liefert folgende Simulationsergebnisse:

Tabelle 4.12 Simulationsergebnisse – Konzept 3

	Ist-Wert	maximal zulässiger Wert nach EnEV	nach Umsetzung des Konzept 3
Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]	125,2	155,85	58,8
Endenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]	190,5	-	56,6
CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/m <sup>2</sup> ]	41	-	14
Brennstoffbedarf [kWh]	Erdgas E	232.200	738.873
	Strom-Mix (*)	34.248	1.254
	Fernwärme	2.179.777	0
	Strom (*) (Hilfsenergie)	178.806	42.831
(*) : inklusive Zugewinne durch PV-Strom			

Zur Deckung des Wärme- und Kältebedarfes werden Sole-Wasser-Wärmepumpen kombiniert mit einem Erdsondenfeld von 288 Erdsonden eingesetzt, welche zur Brauchwasserbereitung genutzt werden. Zusätzlich wird als Spitzenlastkessel und zur Unterstützung der Brauchwassererwärmung ein Brennwertkessel installiert. Die Wärmepumpe und der Brennwertkessel werden mit Erdgas E betrieben, sodass der Fernwärmebezug auf 0 kWh zurückgeht. Dem entsprechend steigt der Bedarf an Erdgas um etwa den Faktor 3,2 an. Es wird nochmal darauf hingewiesen, dass Wärmepumpen

## 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

---

je nach ihrem Jahresnutzungsgrad z.B. aus 1 kWh Erdgas in Summe bis zu 4 kWh nutzbare Wärme gewinnen können.

Für die Kühlung werden strombetriebene Kompressionskältemaschinen mit einer gesamten Kälteleistung von 248,6 kW eingesetzt.

Insgesamt geht der Bedarf an Strom-Mix und Strom (Hilfsenergie) stark zurück, da der Ertrag der PV-Anlagen auf den Dächern des Neubaus und des Bestandsgebäudes einen Großteil abdeckt. Der anrechenbare Anteil gemäß §5 der EnEV beträgt 236.887 kWh pro Jahr. Damit werden theoretisch etwa 80% des elektrischen Energiebedarfes abgedeckt, sodass lediglich knapp 44.000 kWh für das Verteilsystem, wie zum Beispiel Ventilatoren und Pumpen sowie für die Beleuchtung, vom Energieversorger zusätzlich bezogen werden müssen.

### 4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zwei verschiedene Ansätze zur Reduzierung des Energiebedarfes und der Schadstoffemissionen des Planungsobjektes dargestellt.

- Sanierung der Gebäudehülle zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste und des gesamten Gebäudeenergiebedarfs
- Modernisierung der Anlagentechnik zur Reduzierung der Betriebs- und Brennstoffkosten sowie des gesamten Energiebedarfs

In Kapitel 4.1 wurde die Bausubstanz des Bahnhofs betrachtet, die aktuell mit den vorhandenen U-Werten nicht den Stand der Technik erfüllt. Die U-Werte entsprechen alten Baustandards und führen zu hohen Transmissionswärmeverlusten. Die nachträgliche Dämmung der Außenbauteile und die Modernisierung der Verglasung wirken sich in der Simulation positiv aus. Das Potential wird durch die Simulation aus der Kombination von Modernisierung der opaken und transparenten Außenbauteile sichtbar.

In Kapitel 4.2 wurden alternative Konzepte der Anlagentechnik zur Wärme- und Kälteversorgung des Bahnhofs untersucht. In Tabelle 4.13 werden die Konzepte kurz zusammengefasst, sodass auf einem Blick ersichtlich wird, welche Anlagentechnik für die Bereitstellung der jeweiligen Energie verwendet wird.

#### 4 Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Heidelberger Hbf

Tabelle 4.13 Zusammenfassung der Anlagenkonzepte 1 - 3

Bezeichnung	Ist-Zustand	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Heizung	Fernwärme Stadtwerke Heidelberg	Blockheizkraftwerk + Spitzenlastkessel	Fernwärme Stadtwerke Heidelberg	erdgasbetriebene Sole-Wasser Wärmepumpe
Warmwasser	Brennwertkessel (BJ. 1996)	Blockheizkraftwerk + Brennwertkessel (BJ. 2016)	Fernwärme der Stadtwerke Heidelberg	Brennwertkessel (BJ. 2016) + Heizungswärmepumpe
Kälte	Klima-Splitgeräte	Absorptionskältemaschine	Absorptionskältemaschine	Kompressionskältemaschine
Strom	städtischer Versorger + PV-Anlage 1	städtischer Versorger + BHWK + PV-Anlage 1	städtischer Versorger + PV-Anlage 1	städtischer Versorger + PV-Anlage 1 + 2

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Tabelle 4.14 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4.14 Übersicht der Simulationsergebnisse Anlagenkonzepte 1 - 3

Bezeichnung	Ist-Zustand	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]	125,2	124,1	102,9	58,5
Endenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]	190,5	163,4	167,2	56,6
CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/m <sup>2</sup> ]	41	31	36	14
<b>Brennstoffbedarf</b>				
Erdgas E [kWh]	232.200	1.989.302	0	738.873
Strom-Mix [kWh] (*)	34.248	0	0	1.254
Fernwärme [kWh]	2.179.777	0	2.269.853	0
Strom (Hilfsenergie) [kWh] (*)	179.806	264.170	230.565	42.831
(*): inklusive Zugewinne durch PV-Strom				

Die vorgestellten Konzepte weisen alle drei einen besseren Jahres-Primärenergiebedarf als die aktuelle Anlagenkonstellation auf. Dem entsprechend wird von allen Konzepten § 11 der EnEV erfüllt. Der stark verringerte Endenergiebedarf bei den Konzepten 1 und 3 ergibt sich aus erwirtschafteten Energiegewinnen über die Anlagenkonstellation. Der berechnete Endenergiebedarf ist die Summe aus dem Nutzenergiebedarf und den Anlagenverlusten. Anlagenverluste können beispielsweise durch Wärmerückgewinnung in Abluft und Abwassersystemen über Wärmetauscher in Energiegewinne umgerechnet werden. Die starken Veränderungen im Brennstoffbedarf resultieren aus den veränderten Energieträgern zum Betreiben der Anlagen.

Ob und in welchem Umfang sich die Investitionen als wirtschaftlich erweisen, wird in Kapitel 5 untersucht.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Für einen wirtschaftlichen und ökologischen Vergleich der Maßnahmen werden zunächst die Vergleichskriterien definiert und festgelegt.

### 5.1 Auswahl der Kriterien

#### 5.1.1 Kriterien ökonomischer Vergleich

Als Kriterien für den ökonomischen Vergleich werden die laufenden jährlichen Kosten (Betriebs- und Brennstoffkosten) und die notwendigen Investitionskosten festgelegt. Diese fließen in eine Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätenmethode ein.

Die Annuitätenmethode ist eine dynamische Investitionsrechnung und baut auf der Kapitalwertmethode auf. Bei dieser Methode wird ein Beitrag mittels Formel in gleichbleibende Zahlungen (Annuitäten) umgewandelt. Die Investition wird als vorteilhaft angesehen, wenn die Annuität größer als Null ist [41]. Der Betrachtungszeitraum wird auf 30 Jahre festgelegt.

Die Gesamtkosten setzen sich wie folgt zusammen:

- Investitionskosten (Kosten für Dämmstoffe, Anlagentechnik, Installation, Zubehör, etc.)
- Laufende Kosten
  - Verbrauchsunabhängige Kosten (Wartung/Instandhaltung, Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Anlagenqualität)
  - Verbrauchsabhängige Kosten (Brennstoff, Hilfsenergie)

Folgende Randbedingungen sind für die Vergleichsrechnung definiert worden:

- Kalkulationszinssatz: 2,0 %
- Teuerungsrate Brennstoff: 2,0 %
- Laufzeit: 30 Jahre

Der aktuelle **Kalkulationszinssatz** beträgt 1,0 % p.a. nominal und wurde am 11. Mai 2016 veröffentlicht [42]. Für die Betrachtung wird ein höherer Wert angenommen, um einen eventuellen Anstieg des Zinses auszugleichen.

Die **Teuerungsrate** des Brennstoffes resultiert aus der erwarteten Inflation. Die europäischen Zentralbanken haben ein Inflationsziel festgelegt, welches die Inflation der vergangenen Jahre widerspiegelt.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Sofern eine kostenintensive Maßnahme umgesetzt werden soll, muss davon ausgegangen werden, dass der Bahnhof nach Umsetzung noch eine Laufzeit von mindestens 30-50 Jahre hat.

### 5.1.2 Kriterien ökologischer Vergleich

Während der ökonomische Vergleich auf objektiven Kriterien und kalkulier- und berechenbaren Werten beruht, erfolgt der ökologische Vergleich hingegen subjektiver. Umfang und Gewichtung von Entscheidungskriterien können je nach Ziel und Interessen verschieden angesehen werden.

Tabelle 5.1 Festlegung und Gewichtung der ökologischen Kriterien

Kriterium	Erläuterung	Gewichtung
Treibhausgasausstoß (CO <sub>2</sub> -Ausstoß)	Ausstoß an CO <sub>2</sub> des Energieträgers für die durchgeführte Maßnahme	50%
sonstige Schadstoffe	Ausstoß von Stickoxiden (z.B. NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO)	20%
Nachhaltigkeit der Erzeugung	Umweltbelastung bei der Rohstoffgewinnung, Entsorgung	30%

Die Gewichtung der Kriterien wird wie folgt begründet:

Die Reduzierung von Treibhausgasemissionen ist eines der zentralen Ziele bei der Sanierung von Gebäuden. Diese Auffassung wird durch die geltenden Normen und Gesetze unterstützt und ist ein wichtiger Teil des Kyoto-Protokolls. Diesem Kriterium wird aufgrund seiner zentralen Bedeutung eine Gewichtung von 50% zugesprochen.

Zusätzlich zum CO<sub>2</sub> nehmen weitere Schadstoffe wie zum Beispiel Stickoxide und Schwefeldioxid Einfluss auf den Menschen und die Natur. Diese werden in der Bewertung durch „sonstige Schadstoffe“ berücksichtigt und gehen mit einem Anteil von 20% in die Gesamtbewertung ein.

Die Umweltbelastung durch den Abbau von Rohstoffen zur Energiegewinnung hat eine Beeinflussung oder die Zerstörung von Ökosystemen zur Folge. Um die Beeinflussung der Umwelt durch den Abbau in die Bewertung einzubeziehen und kritisch zu bewerten, wird die Nachhaltigkeit bei der Rohstoffgewinnung mit 30% in der Gesamtbewertung berücksichtigt.

Für die ökologische Bewertung der vorgestellten Maßnahmen und Konzepte wird ein Punktesystem eingeführt. Die Maßnahmen und Konzepte werden in allen Bewertungskriterien individuell und begründet mit einer Punktzahl von 0 (sehr schlecht) bis 10 Punkte (sehr gut) bewertet. Anhand der gewichteten Gesamtpunktzahl lässt sich ein Vergleich durchführen. Das Bewertungssystem wird in Kapitel 5.3 vorgestellt und angewendet.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

### 5.2 Ökonomischer Vergleich

#### *Aufstellung der Kosten für den Ist-Zustand*

In Tabelle 5.2 sind die Betriebs- und Brennstoffkosten für den Ist-Zustand des Bahnhofes dargestellt. Die jeweiligen Gesamtkosten ergeben sich aus dem Grund- und dem Arbeitspreis sowie dem Energiebedarf des Gebäudes. Die Grund- und Arbeitspreise sind dem aktuell gültigen Angebot der Stadtwerke Heidelberg für Geschäftskunden entnommen [43] und werden einheitlich bei den nachfolgenden Berechnungen übernommen. Die Betriebs- und Brennstoffkostenberechnung erfolgt für das erste laufende Jahr nach Umsetzung der Maßnahme. Mögliche Preissteigerungen werden in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt.

Tabelle 5.2 Betriebs- und Brennstoffkosten Ist-Zustand

Bezeichnung		Bedarf [kWh/a]	Grund- preis [€/a]	Arbeitspreis [Cent/kWh]	Gesamt- kosten
Brennstoff- kosten	Erdgas E	232.200	182,52	5,93	13.952 €
	Strom-Mix	34.248	96,36	24,85	8.607 €
	Fernwärme	2.179.777	894,96	6,26	137.131 €
	Strom (Hilfsenergie)	179.806	(*)	24,85	44.681 €
Betriebs- kosten	Wartung				293 € (*2)
(*) : Grundpreis bereits durch Strom-Mix gedeckt (*2) : siehe Anhang 1			Gesamtkosten pro Jahr		<u>204.665 €</u>

#### 5.2.1 Kostenaufstellung für die Maßnahmen an der Außenhülle

Im Folgenden werden die Kosten der Sanierungsmaßnahmen miteinander verglichen. Die Bestimmung der Kosten erfolgte mit Hilfe der Simulationssoftware und die Ergebnisse werden im Text zusammengefasst und in Tabellen dargestellt.

Die Kosten für die geplanten Sanierungsmaßnahmen wurden in Gesprächen mit Händlern, Installateuren und durch eigene Recherche im Internet ermittelt. Zusätzlich ist der „EnEV minus 30%“ Leitfaden zur Anwendung gekommen. Es werden die anfallenden Investitionskosten und die daraus resultierenden veränderten Energiekosten dargestellt. Mit Hilfe der Annuitätenmethode erfolgen die Überprüfung der Wirtschaftlichkeit nach 30 Jahren und die Berechnung ab welchem Jahr die theoretische Amortisation erfolgt.

Dieser Investitionskosten setzen sich aus drei Komponenten zusammen.

$$I_K = E_K + M_K + W_K \quad (5)$$

$I_K$  = anfallende Investitionskosten

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

$E_K$  = ohnehin anfallende Ersatzkosten  
 $M_K$  = Mehrkosten für Maßnahme  
 $W_K$  = zusätzliche Wartungskosten

Dabei berücksichtigen die Investitionskosten  $I_K$  alle für die Sanierungsmaßnahme anfallenden Kosten (Planung, Beschaffung, Installation und sonstige Kosten). Die Ersatzkosten  $E_K$  enthalten alle Aufwendungen, die nicht der Energieeinsparung dienen und bei einer gleichwertigen Sanierung ohnehin angefallen wären. Die Ersatzkosten werden in der Wirtschaftlichkeitsberechnung von den Investitionskosten abgezogen und dienen gleichzeitig als Bezugsgröße zur Berechnung des Restwertes.

Bei den Berechnungen wird nicht die gesamte Investitionssumme  $I_K$  auf die eingesparten Brennstoffkosten umgelegt, sondern es werden nur die spezifisch für die Energiesparmaßnahme aufgewendeten Kosten  $M_K$  angesetzt. Die Wartungskosten  $W_K$  enthalten alle laufenden, jährlichen Kosten für die Wartung und Instandhaltung von Anlagen und Sanierungsmaßnahmen an Gebäudeteilen.

### **Kostenaufstellung: Maßnahme 1 - Sanierung der opaken Außenbauteile**

Die Betriebs- und Brennstoffkosten können Tabelle 5.3 entnommen werden, die Höhe der Investitionskosten sind in Tabelle 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.3 Betriebs- und Brennstoffkosten - Maßnahme 1

Bezeichnung		Bedarf [kWh/a]	Grund- preis [€/a]	Arbeitspreis [Cent/kWh]	Gesamt- kosten
Brennstoff- kosten	Erdgas E	214.756	182,52	5,93	12.917 €
	Strom-Mix	45.607	96,36	24,85	11.429 €
	Fernwärme	1.233.722	894,96	6,26	78.126 €
	Strom (Hilfsenergie)	178.806	(*)	24,85	44.433 €
Betriebs- kosten	Wartung				293 €
(*) : Grundpreis bereits durch Strom-Mix gedeckt			Gesamtkosten pro Jahr		<u>147.198 €</u>

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Tabelle 5.4 Investitionskosten - Maßnahme 1

Maßnahme		Kosten der Sanierungsmaßnahme		
Bezeichnung	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Gesamt-investition $I_K$	ohnehin anfallende Ersatzkosten $E_K$	Mehrkosten für Maßnahme $M_K$
Dämmung der Gebäudesohle	6104,25	427.297,29 €	0 € (*)	427.297,29 €
Kellerwand Dämmung	1423,62	96.806,19 €	35.590 €	61.215,68 €
Flachdach Dämmung	6486,52	525.408,16 €	369.731,67 €	155.676,49 €
Außenwand Dämmung	3959,97	541.838,65 €	331.737,95 €	210.100,70 €
Kellerboden Dämmung	3786,44	416.508,70 €	295.342,54 €	121.166,17 €
Gesamtkosten der Sanierungsmaßnahme		2.007.858,99 €	1.032.402,15 €	975.456,33 €

(\*): Eine Sanierung der Gebäudesohle, nur zum Erhalt der Substanz, wird nicht durchgeführt.

Die ohnehin anfallenden Ersatzkosten  $E_K$  für die Dämmung der Gebäudesohle betragen 0 €. Diese Angabe ist dem Standard Maßnahmenkatalog „EnEV minus 30%“ entnommen.

**Wirtschaftlichkeitsberechnung (Annuitätenmethode)**

Maßnahmen | **Ergebnisse** | Tabelle | Diagramme

---

**Aktuelle Brennstoffkosten pro Jahr**

Ist-Zustand: **203.242,18 €**

saniertes Zustand: **146.906,23 €**

---

**Randbedingungen**

Kalkulationszinssatz: **2,00 %**

Teuerungsrate:

Brennstoff (Ist-Zustand): **2,00 %**

Brennstoff (saniertes Zustand): **2,00 %**

Maßnahme: **3,50 %**

Wartung: **4,50 %**

Investitionssteuersatz für steuerl. Abschreibungen: **32,00 %**

---

**Berechnungsparameter**

Betrachtungszeitraum (Jahre): 30

Annuitätenfaktor: 0,0446

Mittelwertfaktoren:

Brennstoff (Ist-Zustand): 1,3415

Brennstoff (saniertes Zustand): 1,3415

Maßnahme: 1,6931

Wartung: 1,9927

**Ergebnisse**

**Investitionen**

Gesamt-Investitionskosten: **2.008.383 €**

ohnehin erforderliche Kosten (Erhaltungsaufwand): **1.032.854 €**

**Kosten der Energiesparmaßnahmen: 975.529 €**

---

**Mittlere jährl. Kosten (Annuitäten) im Betrachtungszeitraum (30 Jahre)**

Kapitalkosten: **43.557 €/Jahr**

Brennstoffkosten: **197.080 €/Jahr**

Wartungskosten: **0 €/Jahr**

**Gesamtkosten: 240.637 €/Jahr**

mittl. Brennstoffkosten ohne Energiesparmaßnahmen: **272.657 €/Jahr**

**Mittlere Einsparung: 32.020 €/Jahr**

---

**Ausgabe**

Typ:

---

**Weitere Kenngrößen**

Interner Zinsfuß: **6,07%**

*Die Investition ist wirtschaftlich, ihre interne Verzinsung liegt über dem Kalkulationszinssatz.*

Amortisation: **18 Jahre**

Preis der eingesparten Kilowattstunde: **0,0469 €/kWh**

Abbildung 5.1 Berechnungsergebnisse der Wirtschaftlichkeit - Maßnahme 1

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Mit den definierten Randbedingungen und dem Vergleich der Brennstoffkosten vor und nach der Maßnahme ergibt sich eine Amortisationszeit von 18 Jahren. In Anhang 4 ist beispielhaft für diese Sanierungsmaßnahme eine tabellarische Übersicht der Wirtschaftlichkeitsberechnung dargestellt.

### **Kostenaufstellung: Maßnahme 2 - Sanierung der transparenten Außenbauteile**

Die Betriebs- und Brennstoffkosten können Tabelle 5.5 entnommen werden, die Höhe der Investitionskosten ist in Tabelle 5.6 dargestellt.

Tabelle 5.5 Betriebs- und Brennstoffkosten - Maßnahme 2

Bezeichnung		Bedarf [kWh/a]	Grundpreis [€/a]	Arbeitspreis [Cent/kWh]	Gesamtkosten
Brennstoffkosten	Erdgas E	214.902	182,52	5,93	12.926 €
	Strom-Mix	41.496	96,36	24,85	10.408 €
	Fernwärme	1.630.588	894,96	6,26	102.970 €
	Strom (Hilfsenergie)	179.209	(*)	24,85	44.533 €
Betriebskosten	Wartung				293 €
(*) : Grundpreis bereits durch Strom-Mix gedeckt			Gesamtkosten pro Jahr		<u>171.130 €</u>

Tabelle 5.6 Investitionskosten - Maßnahme 2

Maßnahme		Kosten der Sanierungsmaßnahme		
Bezeichnung	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Gesamtinvestition $I_K$	ohnehin anfallende Ersatzkosten $E_K$	Mehrkosten für Maßnahme $M_K$
Einbau der 3-Scheiben WSV	1448,82	1.448.820 €	724.410 €	724.410 €
Einbau Außentüren	126,14	126.140 €	63.070 €	63.070 €
Flachdach Dämmung	6486,52	525.408 €	369.732 €	155.676 €
Gesamtkosten der Sanierungsmaßnahme		2.100.368 €	1.157.212 €	943.156 €

Im Handlungsleitfaden „EnEV minus 30%“ sind für die Investitionskosten der Dämmung von opaken Bauteilen Preise hinterlegt. Für die Sanierung von Fenstern und Türen werden in diesem Leitfaden keine Preise genannt, sodass auf Gespräche mit Herstellern, Installateuren und auf Informationen aus verschiedenen Internetportalen zurückgegriffen werden musste. Die Kosten neuer Fenster setzen sich zu ca. 30 - 40 Prozent aus den Materialkosten und zu 60 - 70 Prozent aus den Arbeitskosten zusammen [44] [45].

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Eine Fenstersanierung kostet zwischen 200 € und 700 € pro Quadratmeter Fensterfläche, die Sanierung von Türen kann pro Tür zwischen 1000 € und 6000 € kosten [44] [45]. Die Preise variieren je nach Bauart, Größe der Scheiben und Art des Rahmenmaterials sehr stark. Es wird nach Rücksprache angenommen, dass sich die Sanierungskosten der Fenster und Türen auf 1000 € pro Quadratmeter belaufen.

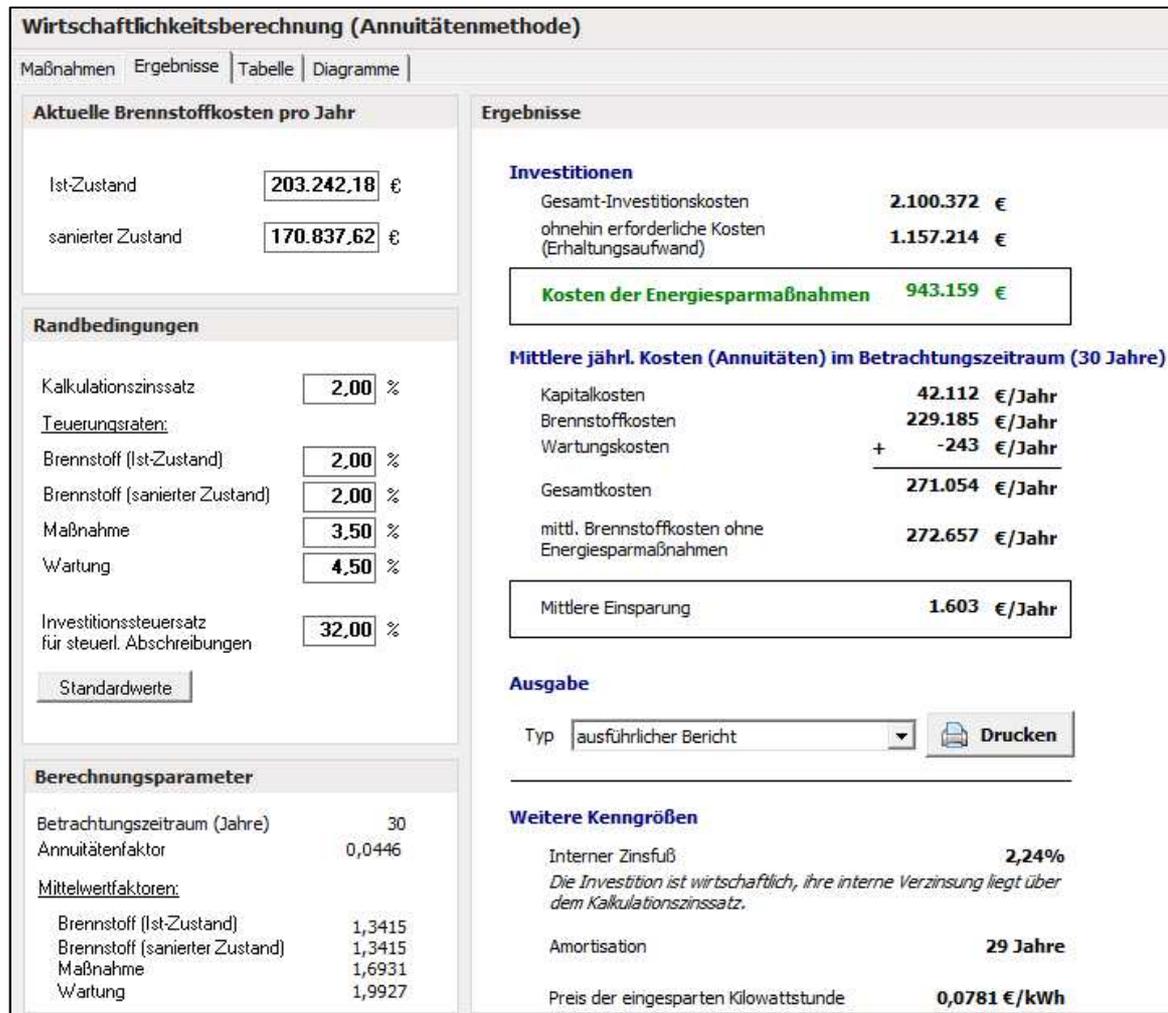


Abbildung 5.2 Berechnungsergebnisse der Wirtschaftlichkeit - Maßnahme 2

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Mit den definierten Randbedingungen und dem Vergleich der Brennstoffkosten vor und nach der Maßnahme ergibt sich eine Amortisationszeit von 29 Jahren.

Die deutlich längere Amortisationszeit gegenüber Maßnahme 1 beruht unter anderem darauf, dass die Flächenanteile der opaken Außenbauteile sehr viel größer sind als die der transparenten, sodass hieraus ein geringerer Einfluss auf die Reduzierung der Transmissionswärmeverluste festzustellen ist.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

### **Kostenaufstellung: Maßnahme 3 - Kombination der Sanierungsmaßnahmen**

Die Betriebs- und Brennstoffkosten können Tabelle 5.7 entnommen werden, die Höhe der Investitionskosten sind in Tabelle 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.7 Betriebs- und Brennstoffkosten - Maßnahme 3

Bezeichnung		Bedarf [kWh/a]	Grundpreis [€/a]	Arbeitspreis [Cent/kWh]	Gesamtkosten
Brennstoffkosten	Erdgas E	214.756	182,52	5,93	12.918 €
	Strom-Mix	48.095	96,36	24,85	12.048 €
	Fernwärme	1.167.808	894,96	6,26	74.000 €
	Strom (Hilfsenergie)	179.183	(*)	24,85	44.526 €
Betriebskosten	Wartung				293 €
(*) : Grundpreis bereits durch Strom-Mix gedeckt			Gesamtkosten pro Jahr		<u>143.785 €</u>

Tabelle 5.8 Investitionskosten - Maßnahme 3

Maßnahme		Kosten der Maßnahme		
Bezeichnung	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Gesamtinvestition $I_K$	ohnehin anfallende Ersatzkosten $E_K$	Mehrkosten für Maßnahme $M_K$
Einbau der 3-Scheiben WSV	1448,82	1.448.820 €	724.410 €	724.410 €
Einbau Außentüren	126,14	126.140 €	63.070 €	63.070 €
Flachdach Dämmung	6486,52	525.408 €	369.732 €	155.676 €
Dämmung der Gebäudesohle	6104,25	427.297 €	0 € (*)	427.297 €
Kellerwand Dämmung	1423,62	96.806 €	35.590 €	61.216 €
Außenwand Dämmung	3959,97	541.838 €	331.738 €	210.101 €
Kellerboden Dämmung	3786,44	416.508 €	295.343 €	121.166 €
Gesamtkosten der Sanierungsmaßnahme		3.582.819 €	1.819.883 €	1.762.936 €
(*) : Eine Sanierung der Gebäudesohle, nur zum Erhalt der Substanz, wird nicht durchgeführt.				

Bei der Simulation von Maßnahme 3 sind die Maßnahmen 1 und 2 im Simulationsmodell zusammengeführt worden. Bei dem Vergleich der Brennstoffbedarfe schneidet Maßnahme 3 am besten ab, jedoch werden durch die zusätzliche Investition von ca. 788.000 € in weitere Maßnahmen gegenüber Maßnahme 1 jährlich nur Brennstoffkosten in Höhe von 3.413 € eingespart.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Der Kostenanteil der Fenster- und Türensanie rung liegt bei etwa 40 % der Gesamtkosten, der Flächenanteil jedoch lediglich bei knapp 7% der Sanierungsfläche. Der Einfluss auf die Energiebedarfe ist daher deutlich geringer. Für einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren ergibt sich eine Amortisationszeit von ebenfalls 30 Jahren (siehe Abbildung 5.3). Eine tabellarische Übersicht der Wirtschaftlichkeitsberechnung ist in Anhang 5 beige fügt.

Aktuelle Brennstoffkosten pro Jahr		Ergebnisse	
Ist-Zustand	203.242,18 €	<b>Investitionen</b>	
sanierter Zustand	143.492,01 €	Gesamt-Investitionskosten	3.583.347 €
		ohne in erforderliche Kosten (Erhaltungsaufwand)	1.820.337 €
		<b>Kosten der Energiesparmaßnahmen</b>	<b>1.763.011 €</b>
<b>Randbedingungen</b>		<b>Mittlere jährl. Kosten (Annuitäten) im Betrachtungszeitraum (30 Jahre)</b>	
Kalkulationszinssatz	2,00 %	Kapitalkosten	78.718 €/Jahr
<u>Teuerungsraten:</u>		Brennstoffkosten	192.500 €/Jahr
Brennstoff (Ist-Zustand)	2,00 %	Wartungskosten	+ -243 €/Jahr
Brennstoff (sanierter Zustand)	2,00 %	Gesamtkosten	270.975 €/Jahr
Maßnahme	3,50 %	mittl. Brennstoffkosten ohne Energiesparmaßnahmen	272.657 €/Jahr
Wartung	4,50 %		
Investitionssteuersatz für steuerl. Abschreibungen	32,00 %	<b>Mittlere Einsparung</b>	<b>1.682 €/Jahr</b>
<input type="button" value="Standardwerte"/>		<b>Ausgabe</b>	
<b>Berechnungsparameter</b>		Typ	ausführlicher Bericht <input type="button" value="Drucken"/>
Betrachtungszeitraum (Jahre)	30	<b>Weitere Kenngrößen</b>	
Annuitätenfaktor	0,0446	Interner Zinsfuß	2,13%
<u>Mittelwertfaktoren:</u>		<i>Die Investition ist wirtschaftlich, ihre interne Verzinsung liegt über dem Kalkulationszinssatz.</i>	
Brennstoff (Ist-Zustand)	1,3415	Amortisation	30 Jahre
Brennstoff (sanierter Zustand)	1,3415	Preis der eingesparten Kilowattstunde	0,0791 €/kWh
Maßnahme	1,6931		
Wartung	1,9927		

Abbildung 5.3 Berechnungsergebnisse der Wirtschaftlichkeit - Maßnahme 3

### 5.2.2 Kostenaufstellung für die Konzepte an der Anlagentechnik

In den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3 sind Konzepte zur Wärme- und Kälteerzeugung vorgestellt worden. In diesem Abschnitt werden die Betriebs- und Brennstoffkosten auf Grundlage der Simulationsergebnisse verglichen. Des Weiteren erfolgt eine überschlägige Berechnung der Investitionskosten für die Umsetzung.

Die Energiepreise wurden dem Angebot des lokalen Energieversorgers entnommen. Zur Bestimmung der Wartungs- und Installationskosten wurde mit Installations- und Handwerksfirmen gesprochen und zusätzlich eine Literaturrecherche durchgeführt. Die Auslegung der Anlagengröße erfolgte anhand der notwendigen Energiebedarfe unter zur Hilfenahme des Simulationsprogramms.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

---

Nachfolgend soll klarstellend erwähnt werden, dass es sich bei den Kosten lediglich um die notwendige Anlagentechnik handelt. Baulich notwendige Veränderungen am Gebäude können aufgrund des nicht abschätzbaren Aufwandes keine Berücksichtigung finden. Wichtige Standards bei NWG, wie die Einhaltung des baulichen und anagentechnischen Brandschutzes, können ebenfalls aufgrund des Aufwandes nicht berücksichtigt werden. Dem Autor ist bewusst, dass dies eine Schwäche darstellt und, dass die Kosten hierfür hoch sein können. Eine Betrachtung aller notwendiger Randbedingungen und Parameter hätte mit ihrer Komplexität den Rahmen der Masterarbeit überstiegen und den Schwerpunkt verschoben.

Zur Bestimmung der Wartungs- und Instandhaltungskosten wurde in Anlehnung an die VDI 2067 und an eine Veröffentlichung des „Frauenhofer Institut ISE“ [46] die nachfolgende Tabelle 5.9 erstellt. Sie bietet eine Übersicht der jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten für die verwendeten Technologien und Anlagen.

Tabelle 5.9 Wartungs- und Instandhaltungskosten von Anlagentechnik

Technik	Jährlicher Aufwand für W&I (bezogen auf die Investitionskosten)
BHKW	4,3 %
Brennwertkessel	2,8 %
Absorptionskältemaschine	1,8 %
Kompressionskältemaschine	3,8 %
Photovoltaik	5,0 %
Erdgas Wärmepumpe	1,5 %

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

### **Kostenaufstellung Konzept 1: BHKW + Absorptionskältemaschinen**

Die Betriebs- und Brennstoffkosten können Tabelle 5.10 entnommen werden, die Höhe der Investitionskosten ist in Tabelle 5.11 dargestellt.

Tabelle 5.10 Betriebs- und Brennstoffkosten - Konzept 1

Bezeichnung		Bedarf [kWh/a]	Grundpreis [€/a]	Arbeitspreis [Cent/kWh]	Gesamtkosten
Brennstoffkosten	Erdgas E	1.989.306	182,52	5,93	118.148 €
	Strom-Mix	0	96,36	24,85	0 €
	Fernwärme	0	894,96	6,26	0 €
	Strom (Hilfsenergie)	264.170	96,36	24,85	65.743 €
Betriebskosten + W&I	BHKW				3.700 €
	Kältemaschine				3.213 €
	Brennwertkessel				1.120 €
				laufende Kosten pro Jahr	<u>191.924 €</u>

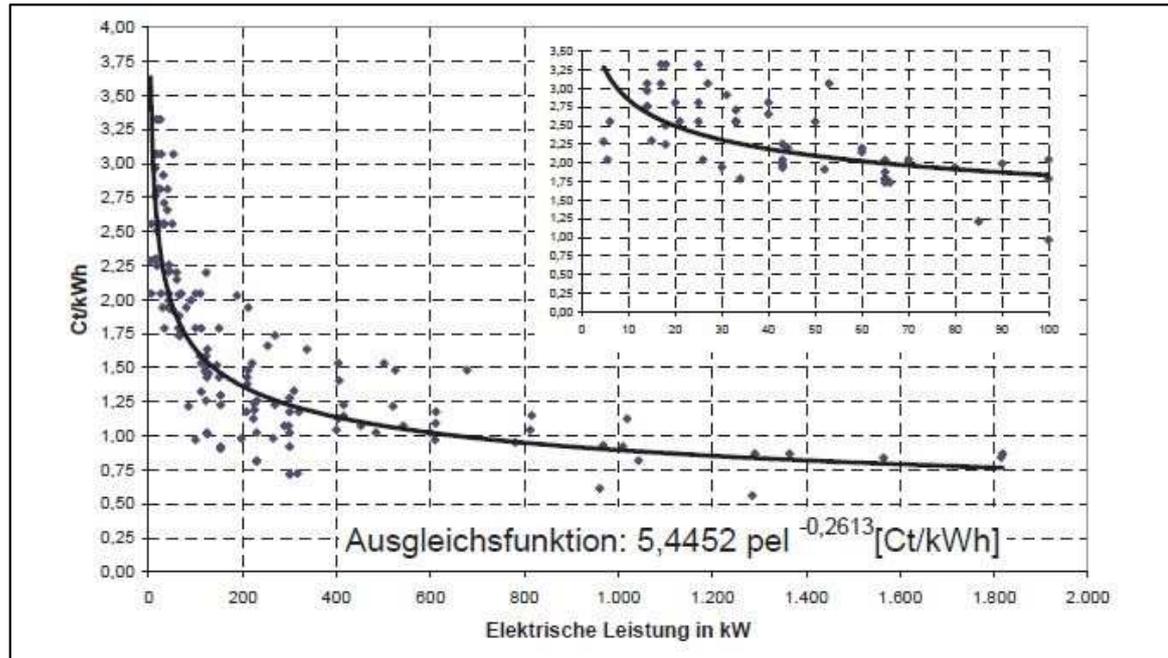
Tabelle 5.11 Investitionskosten - Konzept 1

Bezeichnung	Größe / Leistung	Kosten / Zusammensetzung	Gesamtkosten
Blockheizkraftwerk	$P_{th} = 207 \text{ kW}$	Material, Installation, Zubehör	126.000 €
	$P_{el} = 140 \text{ kW}$		
Kältemaschine	250 kW	Material + Installation	187.500 €
Brennwertkessel	645 kW	Material + Installation	40.000 €
Gesamtkosten:			<u>317.500 €</u>

Die Betriebs- und Wartungskosten für das BHKW wurden anhand der Ausgleichskurve aus Abbildung 5.4 bestimmt.

Mit einer elektrischen Leistung von 140 kW ergibt sich ein Wartungspreis von 1,4 Cent/kWh (elektrisch), sodass sich die anzusetzenden Wartungs- und Instandhaltungskosten für das BHKW bei einem Strombedarf von 264.170 kWh/a auf circa 3.700 € belaufen. Die Wartung von Absorptionskältemaschine ist allgemein kostengünstiger gegenüber Kompressionskältemaschinen, da nur wenig bewegliche Bauteile verbaut sind.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte



Für die Investitionskosten des BHKW wurde Abbildung 5.5 zur Hilfe genommen. Für ein BHKW mit 140 kW elektrischer Leistung kann ein Preis von etwa 900 €/kW<sub>el</sub> bestimmt werden. Weitere Kosten für Montage und Inbetriebnahme fallen nicht an, da diese bereits in der Ausgleichsfunktion berücksichtigt werden. Die Investitionskosten für die Absorptionskältemaschine wurden anhand von [47] ermittelt (siehe Anhang 6).

Abbildung 5.4 Wartungs- und Instandhaltungskosten eines BHKW [48]

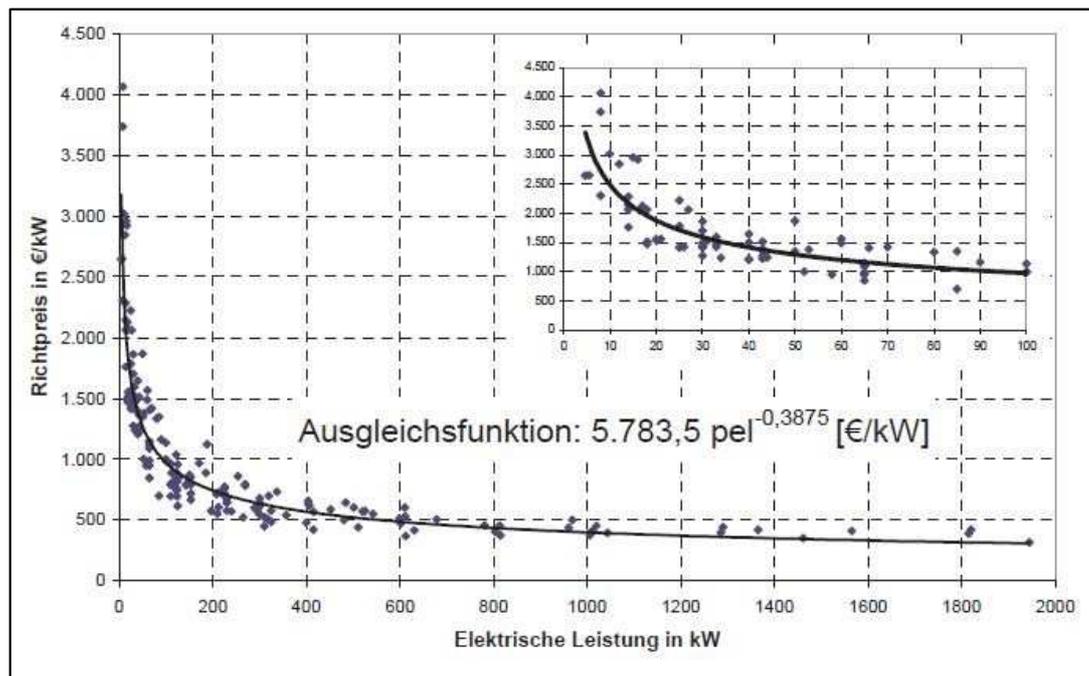


Abbildung 5.5 Investitionskosten eines BHKW [48]

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit erfolgt analog zu Kapitel 5.2.1. Als Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung für das Anlagenkonzept 1 ergibt sich bei gleichbleibenden wirtschaftlichen Bedingungen eine Amortisationszeit von 28 Jahren.

### **Kostenaufstellung Konzept 2: Fernwärmeversorgung + Absorptionskältemaschine**

Die Betriebs- und Brennstoffkosten können Tabelle 5.12 entnommen werden, die Höhe der Investitionskosten sind in Tabelle 5.13 dargestellt.

Tabelle 5.12 Betriebs- und Brennstoffkosten - Konzept 2

Bezeichnung		Bedarf [kWh/a]	Grund-preis [€/a]	Arbeitspreis [Cent/kWh]	Gesamt-kosten
Brennstoff-kosten	Erdgas E	0	182,52	5,93	0 €
	Strom-Mix	0	96,36	24,85	0 €
	Fernwärme	2.253.143	894,96	6,26	141.942 €
	Strom (Hilfsenergie)	176.176	96,36	24,85	43.876 €
Betriebs-kosten + W&I	Fernwärmestation				293 €
	Kältemaschine				3.213 €
laufende Kosten pro Jahr					<u>189.324 €</u>

Tabelle 5.13 Investitionskosten - Konzept 2

Bezeichnung	Größe / Leistung	Kosten / Zusammensetzung	Gesamtkosten
Erweiterung Fernwärmestation		Wärmetauscher, Leistungserweiterung	70.000 €
	3500 Liter	Warmwasserspeicher	21.000 €
Abs.-Kältemaschine	250 kW	Material + Installation	187.500 €
Gesamtkosten:			<u>278.500 €</u>

Zur Umsetzung dieses Konzeptes müssen an der Fernwärmeübergabestation geringfügige Veränderungen vorgenommen werden. Eine Leistungserweiterung des Fernwärmeanschlusses ist erforderlich und Wärmeübergabestationen zwischen Fernwärmenetz und der Absorptionskältemaschine müssen nachgerüstet werden. Hinzu kommen die Investitionskosten für die Absorptionskältemaschine (vgl. mit Konzept 1) und für einen 3.500 Liter Warmwasserspeicher, um die Anzahl an An- und Abschaltvorgänge der Anlagentechnik zu minimieren und dadurch deren Lebensdauer zu verlängern.

Dem entsprechend sind die Investitionskosten vergleichsweise gering gegenüber den Konzepten 1 und 3. Die laufenden Kosten verringern sich von 189.324 € gegenüber den jetzigen 204.665 € pro Jahr nur geringfügig. Aufgrund der niedrigen Investitionskosten und der Brennstoffeinsparung von ca. 15.000 € gegenüber dem Ist-Zustand amortisiert sich Konzept 2 theoretisch nach 15 Jahren.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

### **Kostenaufstellung Konzept 3: Erdgaswärmepumpe + Brennwertkessel + PV-Anlage**

Die Betriebs- und Brennstoffkosten können Tabelle 5.14 entnommen werden, die Höhe der Investitionskosten sind in Tabelle 5.15 dargestellt.

Tabelle 5.14 Betriebs- und Brennstoffkosten - Konzept 3

Bezeichnung		Bedarf [kWh/a]	Grundpreis [€/a]	Arbeitspreis [Cent/kWh]	Gesamtkosten
Brennstoffkosten	Erdgas E	738.873	182,52	5,93	43.998 €
	Strom-Mix	1.254	96,36	24,85	408 €
	Fernwärme	0	894,96	6,26	0 €
	Strom (Hilfsenergie)	42.831	(*)	24,85	10.643 €
Betriebskosten + W&I	Wärmepumpe				11.730 €
	Brennwertkessel				1.120 €
	PV-Anlage				16.730 €
	Kompressions-Kältemaschine				2.451 €
(*) : Grundpreis bereits durch Strom-Mix gedeckt			laufende Kosten pro Jahr		<u>86.080 €</u>

Tabelle 5.15 Investitionskosten - Konzept 3

Bezeichnung	Größe / Leistung	Kosten / Zusammensetzung	Gesamtkosten
Wärmepumpe	976 kW	Bohrkosten	1.170.000 €
		Material + Installation	674.600 €
Kompressions-Kältemaschine	250 kW	Material + Installation	62.500 €
PV-Anlage 2	239 kW <sub>p</sub>	1400 €/kW <sub>p</sub> [49], [50]	334.600 €
Brennwertkessel	468 kW	Material + Installation	40.000 €
Gesamtkosten:			<u>2.281.700 €</u>

Der Vorteil von Konzept 3 gegenüber 1 und 2 beruht auf den laufenden Kosten. Diese sind mit 86.080 € jährlich um mehr als 50% geringer gegenüber dem Ist-Zustand und den anderen Konzepten.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten für die Photovoltaik-Anlage betragen 5,0% der Investitionssumme (vgl. Tabelle 5.9) [49]. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten des Brennwertkessels werden nach Rücksprache mit Fachfirmen und in Anlehnung an die Literatur mit 1.120 € jährlich berücksichtigt. Für die Wärmepumpe können für eine erste Planung 1,5% der Investitionssumme als Betriebs- und Wartungs- und Instandhaltungskosten angenommen werden. Eine genauere Preisauflistung der Investitionskosten war leider nicht möglich, da hierzu die Erstellung eines Angebots durch Fachunternehmen notwendig gewesen wäre. Diese verlangten für eine

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

---

Planungsleistung dieser Größenordnung ein Entgelt, sodass die Investitionskosten überschlägig mit Hilfe von entsprechender Fachliteratur ermittelt wurden.

Zur Nutzung der erdgasbetriebenen Sole-Wasser-Wärmepumpe muss die Wärmequelle erschlossen werden. Die Bohrkosten werden in der Literatur mit etwa 30 bis 80 € pro laufenden Meter angegeben und sind von der Beschaffenheit des Untergrundes abhängig [40], [51]. Sie sind je nach Aufwand und Bodenbegebenheit unterschiedlich und gehen in die Berechnung mit 60 € pro laufendem Bohrmeter ein.

Zum Erreichen der notwendigen Wärmeleistung von 976 kW muss die notwendige Anzahl an Bohrungen bestimmt werden. Dies erfolgt anhand der mittleren Entzugsleistung aus dem Erdreich. Die VDI 4640 gibt spezifische Entzugsleistungen in Form von Richtwerten (gut, mittel, schlecht) und für einzelne Gesteins- und Bodenarten an und gehen von 20 W/m bis 70 W/m aus. Als Entzugsleistung werden 50 W/m festgelegt, sodass 19.500m Erdwärmesonden gebohrt und verlegt werden müssen [52].

Nach Rücksprache mit dem Umweltbundesamt dürfen die Bohrungen maximal 68 m tief sein, sodass zur Deckung des Wärmebedarfs mindestens 287 Bohrungen notwendig sind. Hinzu kommen die Installation und die Materialkosten für die Wärmepumpe von etwa 675.000€ [53]. Eine weitere Quelle nennt als Investitionssumme für Sole-Wasser-Wärmepumpen 2.000 €/kW, inklusive Erschließung der Wärmequelle [54], was sich mit der separaten Berechnung von Wärmepumpe und Bohrkosten deckt.

Die Kosten für Kompressionskältemaschinen liegen unterhalb der Kosten der vorgestellten Absorptionswärmepumpe und werden in der Literatur unterschiedlich beziffert. Die Preisspanne liegt zwischen 100 €/kW<sub>Kälte</sub> und 1800 €/kW<sub>Kälte</sub> [55]. Nach einem Abgleich mit weiteren Quellen wird eine Preisspanne von 250 bis 400 € pro kW<sub>Kälte</sub> als realistisch angesehen, sodass in der Wirtschaftlichkeitsberechnung von 250 € pro kW<sub>Kälte</sub> Investitionskosten ausgegangen wird.

Für die geplante Anlagentechnik ergeben sich Investitionskosten von mehr als 2.200.000 Euro. Diese stehen einer Einsparung der laufenden Kosten von 57% auf 86.000€ gegenüber.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Maßnahmen	Ergebnisse	Tabelle	Diagramme
<b>Aktuelle Brennstoffkosten pro Jahr</b>			
Ist-Zustand	203.465,52 €		
sanierter Zustand	50.707,14 €		
<b>Randbedingungen</b>			
Kalkulationszinssatz	2,00 %		
<u>Teuerungsraten:</u>			
Brennstoff (Ist-Zustand)	2,00 %		
Brennstoff (sanierter Zustand)	2,00 %		
Maßnahme	3,50 %		
Wartung	2,00 %		
Investitionssteuersatz für steuerl. Abschreibungen	32,00 %		
<input type="button" value="Standardwerte"/>			
<b>Berechnungsparameter</b>			
Betrachtungszeitraum (Jahre)	30		
Annuitätenfaktor	0,0446		
<u>Mittelwertfaktoren:</u>			
Brennstoff (Ist-Zustand)	1,3415		
Brennstoff (sanierter Zustand)	1,3415		
Maßnahme	1,6931		
Wartung	1,3415		
<b>Ergebnisse</b>			
<b>Investitionen</b>			
Gesamt-Investitionskosten	2.281.700 €		
ohnehin erforderliche Kosten (Erhaltungsaufwand)	0 €		
<b>Kosten der Energiesparmaßnahmen 2.281.700 €</b>			
<b>Mittlere jährl. Kosten (Annuitäten) im Betrachtungszeitraum (30 Jahre)</b>			
Kapitalkosten	101.878 €/Jahr		
Brennstoffkosten	68.025 €/Jahr		
Wartungskosten	+ 48.862 €/Jahr		
Gesamtkosten	218.765 €/Jahr		
mittl. Brennstoffkosten ohne Energiesparmaßnahmen	272.956 €/Jahr		
<b>Mittlere Einsparung 54.191 €/Jahr</b>			
<b>Ausgabe</b>			
Typ	<input type="text" value="ausführlicher Bericht"/>	<input type="button" value="Drucken"/>	
<b>Weitere Kenngrößen</b>			
Interner Zinsfuß	5,05%		
<i>Die Investition ist wirtschaftlich, ihre interne Verzinsung liegt über dem Kalkulationszinssatz.</i>			
Amortisation	20 Jahre		
Preis der eingesparten Kilowattstunde	0,0815 €/kWh		

Abbildung 5.6 Berechnungsergebnisse der Wirtschaftlichkeit – Konzept 3

Der Einsatz einer erdgasbetriebenen Wärmepumpe, der zusätzlichen PV-Anlage 2 sowie der Modernisierung des Heizkessels und der Installation von Kompressionskältemaschinen amortisiert sich innerhalb des Betrachtungszeitraums von 30 Jahren nach 20 Jahren. Eine tabellarische Übersicht der Wirtschaftlichkeit kann Anhang 7 entnommen werden. Trotz der längeren Amortisationszeit zahlt sich eine Umsetzung aus, da die laufenden Kosten nach der Amortisation deutlich unter dem Niveau der anderen vorgestellten Konzepte liegen.

### 5.2.3 Ergebnis ökonomischer Vergleich

Insgesamt wurden drei Maßnahmen für die Sanierung der Gebäudehülle und drei Konzepte zur Bereitstellung von Wärme und Kälte vorgestellt und simuliert. Als Ergebnis zeigt sich:

- Sanierung der Gebäudehülle → Verringerung der Transmissionswärmeverluste und des Jahres-Primär und Endenergiebedarfs sowie der laufenden Kosten
- Neues Anlagenkonzept → Verringerung des Jahres-Primärenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen sowie der laufenden Kosten

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

In Tabelle 5.16 sind die Ergebnisse der wirtschaftlichen Betrachtung für die Maßnahmen an der Gebäudehülle nochmals kurz zusammengefasst:

Tabelle 5.16 Zusammenfassung der Maßnahmen 1 - 3

	Maßnahme 1	Maßnahme 2	Maßnahme 3
Gesamtinvestition $I_K$ [€]	2.007.859	2.100.368	3.582.817
davon nur für die Energiesparmaßnahme $M_K$ [€]	975.456	943.156	1.762.936
laufende Kosten [€/Jahr]	147.198 (-28 %)	171.130 (-16 %)	143.785 (-29 %)
Amortisationszeit	<b>ja</b> , 18 Jahre	<b>ja</b> , 29 Jahre	<b>ja</b> , 30 Jahre

Alle vorgestellten Maßnahmen amortisieren sich spätestens nach 30 Jahren Betrieb. Dennoch sind die Investitionskosten sehr unterschiedlich hoch und die Maßnahmen haben verschieden starke Auswirkungen auf die Brennstoffkosten.

Die drei vorgestellten Anlagenkonzepte (siehe Tabelle 5.17) amortisieren sich alle innerhalb der 30 Jahre. Die notwendigen Investitionskosten variieren stark. Während bei Konzept 2 lediglich kleinere Änderungen an der Fernwärmeübergabestation vorgenommen werden, sind für die Konzepte 1 und 3 größere Umbaumaßnahmen erforderlich. Für Konzept 3 kommt erschwerend hinzu, im Bahnhofsumfeld die Erdwärmesonden einzubringen.

Tabelle 5.17 Zusammenfassung der Anlagenkonzepte 1 - 3

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Gesamtinvestition $I_K$ [€]	317.500	278.500	2.281.700
laufende Kosten [€/Jahr]	191.924 (-6%)	189.324 (-8%)	86.080 € (-58%)
Amortisationszeit	<b>ja</b> , 28 Jahre	<b>ja</b> , 15 Jahre	<b>ja</b> , 20 Jahre

Aufgrund der Größe des Planungsobjektes sind die Maßnahmen an der Gebäudehülle in der Praxis nur unter erschwerten Bedingungen umzusetzen. Für die Umsetzung ist der laufende Bahnbetrieb am Bahnhof zeitweise einzustellen. Hinsichtlich der Sanierung der Gebäudehülle ist aus wirtschaftlicher Sicht Maßnahme 3 zu empfehlen. Diese liefert die besten Ergebnisse in den Energieverbräuchen und amortisiert sich im gesteckten Zeitrahmen.

Die Investitionskosten für die Anlagentechnik der Konzepte 1 und 2 sind deutlich geringer als die Investitionskosten einer Sanierung der Gebäudehülle. Das Anlagenkonzept 3 ist mit Investitionskosten von ca. 2,3 Millionen Euro mit Abstand das teuerste, erreicht aber die besten Resultate bei der Energiebedarfsberechnung und dem Jahres-Primärenergiebedarf. Die laufenden Kosten von Konzept 3 sind mit ca. 86.000 € jährlich am geringsten, sodass in Hinblick auf eine Laufzeit von 30 Jahren und länger dieses Konzept empfohlen wird.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Ein Faktor, der über Simulationsmodelle nur bedingt berücksichtigt werden kann, ist die Preisentwicklung des Energiemarktes. Für den Betrieb von Wärmepumpen und Blockheizkraftwerken spielen die Erdgas- und Strompreise die ausschlaggebende Rolle. Für den Fall einer Preissteigerung der Erdgaspreise wirken sich diese beispielsweise bei Konzept 3 nicht vollumfänglich auf die Betriebskosten aus. Wärmepumpen benötigen zum Erzeugen von 4 kWh Wärme nur etwa 1 kWh Erdgas, während Preisschwankungen bei Kessel- oder BHKW-Anlagen 1:1 kostenwirksam sind.

Des Weiteren sind finanzielle Anreizprogramme eine wichtige Stellschraube des Staates zur Förderung von effizienten Technologien zur Wärme- und Kältebereitstellung im Gebäudesektor. Im Rahmen der Masterarbeit werden die Fördermöglichkeiten nicht untersucht.

### 5.3 Ökologischer Vergleich

Im ökologischen Vergleich werden die neu berechneten Schadstoffausstöße betrachtet und verglichen. Die spezifischen Treibhausgas- und sonstigen Schadstoffemissionen der einzelnen Energieträger wurden Studien des Umweltbundesamtes sowie des Internationalen Instituts für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien entnommen [56]. Zur Bewertung der Treibhausgasbilanz wurden neben Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) auch Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und die Stickoxide (NO<sub>x</sub>) berücksichtigt. Die spezifischen Treibhausgasemissionen der einzelnen Energieträger sind in Tabelle 5.18 dargestellt.

Tabelle 5.18 Spezifische Treibhausgasemissionen der Energieträger, Quelle: Hottgenroth Energieberater, [57] [56]

Brennstoff / Energieträger	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Erdgas E	244	0,157	0,2
Strom (Mix)	633	1,111	0,583
Fernwärme	175,0	-0,134 (*)	0,357
PV-Strom (monokristallin)	51,9	0,060	0,032

(\*): negatives Vorzeichen steht für die Vermeidung von Emissionen durch KWK

#### 5.3.1 Treibhausgasemissionen für die Maßnahmen an der Gebäudehülle

Eine Auflistung der berechneten jährlichen Emissionsausstöße kann Tabelle 5.19 entnommen werden. Beim Vergleich der Treibhausgasemissionen schneidet Maßnahme 3 bei der Betrachtung der Gesamtmenge an ausgestoßenen Emissionen am besten ab. Gegenüber dem Ist-Zustand verringern sich die ausgestoßenen CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen deutlich. Das negative Vorzeichen für den Ausstoß der SO<sub>2</sub>-Emissionen bei Fernwärmenutzung bewirkt bei einer Verringerung des Fernwärmebedarfs eine Steigerung der Emissionen, da weniger Emissionen vermieden wurden (vgl. (\*) in Tabelle 5.19).

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Tabelle 5.19 Treibhausgasemissionen durch die Maßnahmen an der Gebäudehülle

Brennstoff / Energieträger	Emissions- art	Ist [kg/a]	Maßnahme Nr. 1 [kg/a]	Maßnahme Nr. 2 [kg/a]	Maßnahme Nr. 3 [kg/a]
Erdgas E	CO <sub>2</sub>	56.656,8	52.400	52.436	52.401
	SO <sub>2</sub>	36,5	33,7	33,7	33,7
	NO <sub>x</sub>	46,4	43,0	43,0	43,0
Strom (Mix)	CO <sub>2</sub>	135.496	142.053	139.706	143.867
	SO <sub>2</sub>	237,8	249,2	245,3	252,5
	NO <sub>x</sub>	124,8	130,8	127,7	132,5
Fernwärme	CO <sub>2</sub>	381.461	215.901	285.353	204.365
	SO <sub>2</sub>	-292	-165,3	-218,5	-156,5
	NO <sub>x</sub>	778	440,4	582,1	416,9
PV-Strom (monokristallin)	CO <sub>2</sub>	2.778	2.778	2.778	2.778
	SO <sub>2</sub>	3,21	3,21	3,21	3,21
	NO <sub>x</sub>	1,71	1,71	1,71	1,71
Summe Schadstoff- emissionen	CO <sub>2</sub>	576.392	413.132	480.273	403.411
	SO <sub>2</sub>	-14,5	120,81	63,01	132,91
	NO <sub>x</sub>	951	615,11	753,51	593,11

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

### 5.3.2 Treibhausgasemissionen für die Konzepte an der Anlagentechnik

Analog zu Kapitel 5.3.1 wird nachfolgend eine Übersicht der ausgestoßenen Treibhausgasemissionen der Energieträger dargestellt.

Tabelle 5.20 Treibhausgasemissionen durch die Konzepte für die Anlagentechnik

Brennstoff / Energieträger	Emissionsart	Ist [kg/a]	Konzept 1 [kg/a]	Konzept 2 [kg/a]	Konzept 3 [kg/a]
Erdgas E	CO <sub>2</sub>	56.656,8	485.391	0	180.285
	SO <sub>2</sub>	37	312	0	116
	NO <sub>x</sub>	46	398	0	148
Strom (Mix)	CO <sub>2</sub>	135.496	167.220	111.519	27.906
	SO <sub>2</sub>	238	294	196	49
	NO <sub>x</sub>	125	154	103	26
Fernwärme	CO <sub>2</sub>	381.461	0	394.300	0
	SO <sub>2</sub>	-292	0	-302	0
	NO <sub>x</sub>	778	0	804	0
PV-Strom (monokristallin)	CO <sub>2</sub>	2.778	2.778	2.778	12.337
	SO <sub>2</sub>	3,21	3,21	3,21	14,3
	NO <sub>x</sub>	1,71	1,71	1,71	7,61
Summe Schadstoffemissionen	CO <sub>2</sub>	576.392	655.389	508.597	220.528
	SO <sub>2</sub>	-14,5	609,2	-102,8	179,3
	NO <sub>x</sub>	951	554	909	182

Beim Vergleich der Gesamtmenge der Schadstoffemissionen schneidet das Anlagenkonzept 3 am besten ab. Die ausgestoßene Menge an CO<sub>2</sub> ist vergleichsweise zu den anderen beiden Konzepten und dem Ist-Zustand mehr als 50% geringer. Die ausgestoßene Menge der Stickoxide geht um 80% zurück. Durch den Verzicht von Fernwärme steigen die Emissionen von Schwefeldioxid an.

### 5.3.3 Bewertung des Treibhausgasemissionen

Die Bewertung der Treibhausgasemissionen erfolgt mittels eines Punktesystems von 0 Punkte (sehr schlecht) bis 10 Punkte (sehr gut). Die obere und untere Grenze werden dabei durch das beste bzw. schlechteste Ergebnis der Schadstoffemissionsberechnung (vgl. Tabelle 5.19 und Tabelle 5.20) festgelegt. Die Einteilung erfolgt in 0,5 Punkte Schritten.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Tabelle 5.21 Kriterien zur Bewertung der Treibhausgasemissionen

Kriterium	maximaler Ausstoß (0 Punkte)	minimaler Ausstoß (10 Punkte)	Schrittweite für +0,5 Punkte
CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/a]	655.389	220.528	- 21.743
SO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/a]	609,2	-102,8	- 35,6
NO <sub>x</sub> -Emissionen [kg/a]	909	182	- 38,3

Tabelle 5.22 Bewertung der Treibhausgasemissionen

Maßnahme / Konzept	Punkte CO <sub>2</sub> - Emissionen	Punkte sonstige Emissionen SO <sub>2</sub> und NO <sub>x</sub> (50/50)
Ist-Zustand	1,5	4,0
Maßnahme1	5,5	5,0
Maßnahme 2	4	5,0
Maßnahme 3	5,5	5,5
Konzept 1	0	2,5
Konzept 2	3	5,0
Konzept 3	10	8

Die Bewertung der Treibhausgasemissionen erfolgt jeweils auf den Berechnungsergebnissen aus Tabelle 5.19 und Tabelle 5.20. Die Ergebnisse aus Tabelle 5.22 fließen in die die Gesamtbewertung in Kapitel 0 ein.

### 5.3.4 Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung

Als drittes ökologisches Bewertungskriterium wird die Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung festgelegt. Für die drei Hauptenergieträger Erdgas, Strom (Mix) und Fernwärme wird dies nachfolgend untersucht. Die Festlegung der Punkte als Bewertungsgrundlage für die Energieträger wird nachfolgend begründet.

#### **Fernwärme**

Die bisherige Fernwärmeversorgung wird auf Basis der vorhandenen Informationen sowie ihres Primärenergiefaktors und einem dem Anteil an erneuerbaren Energien von 19,8% mit 6 von 10 Punkten bewertet.

#### **Photovoltaik**

Photovoltaikstrom als Energieträger wird mit der maximalen Punktzahl von 10 bewertet, da die Energiegewinnung ohne Umweltauswirkungen erfolgt.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

### **Erdgas**

Die Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung wird zunehmend wichtiger. Die Umweltbelastung der Erdgasförderung bei neu erschlossenen Gasfeldern nimmt zu. Einfache Lagerstätten, aus denen sich das Erdgas ohne gravierende Umweltschäden fördern lässt, werden bevorzugt genutzt und versiegen entsprechend schneller. Als Folge dessen müssen schwer zugängliche Erdgasvorkommen mit unkonventionellen Fördermethoden erschlossen werden müssen.

Ein Beispiel dieser unkonventionellen Methoden ist das sogenannte Fracking [58]. Unter hohem Druck wird mit Chemikalien angereichertes Wasser in den Boden gepresst, damit das Gestein im Erdreich aufbricht. Durch die entstandenen Risse kann das Erdgas leichter gewonnen werden. Zu möglichen Umweltauswirkungen durch Fracking gibt es zahlreiche Studien mit widersprüchlichen Ergebnissen. Als mögliche Auswirkungen werden u.a. die Gefährdung des Grundwassers durch die eingesetzten Chemikalien, Bodenversiegelung sowie Luftverschmutzung durch aufwendigen Abbau und Erdbebengefahr genannt. Neben dem Fracking wird zunehmend in ökologisch sensiblen Gebieten wie z.B. in Regenwäldern, der Arktis nach Erdgas gesucht.

In der Gesamtbetrachtung wird Erdgas in der Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung mit 6 von 10 Punkten eingestuft.

### **Strom (Mix)**

Bei der Bewertung des deutschen Strom (Mix) muss eine Differenzierung vorgenommen werden, da er sich auf einem Mix unterschiedlicher Energieträger zusammensetzt. Die Bewertung erfolgt anhand des Strom Mix von 2015, der in Tabelle 5.23 dargestellt wird.

Tabelle 5.23 Deutscher Strom Mix 2015, Quelle: AGEE-Stat

Energieträger		Erzeugung [GWh]	Anteil [%]
Erdgas		59,1	9,1
Steinkohle		118,0	18,1
Kernenergie		91,8	14,1
Braunkohle		155,0	23,8
sonstige		31,4	4,8
Erneuerbare Energien	Wasserkraft	19,3	3,0
	Photovoltaik	38,4	5,9
	Biomasse	50,0	7,7
	Wind	88	13,5
Gesamt		651	100

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Nachfolgend werden die zur Stromerzeugung genutzten Energieträger auf die Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung untersucht. Für die erneuerbaren Energien ergeben sich folgende Anteile und Gesamtbewertung:

Tabelle 5.24 Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung: Gesamtergebnis erneuerbare Energien

Energieträger	Erzeugung [GWh]	Anteil	Bewertung	Gewichtung
Wasserkraft	19,3	9,9 %	10	1,0
Photovoltaik	38,4	19,6 %	10	2,0
Biomasse	50,0	25,5 %	6	1,5
Wind	88	45 %	10	4,5
Summe	195,7		<b>Ergebnis:</b>	<b><u>9</u></b>

Wind- und Wasserkraft sowie die Nutzung der Sonnenenergie mit Hilfe von Photovoltaik werden aufgrund ihres als unbegrenzt einzustufenden Vorkommens mit der maximalen Punktzahl von 10 bewertet. Lediglich die Biomasse wird mit 6 von 10 Punkten bewertet, da bei der Produktion von Biomasse sehr große Anbauflächen, oftmals in Monokulturen gehalten, notwendig sind. In der Gesamtbetrachtung schneidet der Anteil an erneuerbaren Energien daher mit 9 von 10 Punkten ab.

Die weiteren Bestandteile des Strom Mix wurden wie folgt bewertet:

Die Bewertung von **Erdgas** erfolgt mit 6 von 10 Punkten.

Der **Braunkohle**abbau in Deutschland erfolgt in drei großen Gebieten (Lausitz, Raum Leipzig und Rheinisches Revier). Der Abbau erfordert die komplette Zerstörung der Natur- und Kulturlandschaft, da die Braunkohlevorkommen in 25 bis 280 Metern Tiefe liegen [59]. Zusätzlich wird bei großen Tiefen ein Eingriff in den Grundwasserhaushalt getätigt. Nach Abschluss der Nutzung werden die Gebiete rekultiviert, aber aufgrund der großen Flächen und der langen Nutzungsdauer wird Braunkohle mit 4 von 10 Punkten bewertet.

Der Menge des **Steinkohle**abbaus in Deutschland ist im Vergleich zum Bedarf sehr gering. Die Importquote von Steinkohle liegt bei über 80% und erfolgt überwiegend aus Russland, USA, Kolumbien, Polen und Südafrika. Ebenso wie beim Braunkohleabbau werden Landschaften zerstört und für den Zeitraum des Abbaus unbewohnbar. Die Förderung inländischer Steinkohle erfolgt weniger problematisch, da sie Untertage erfolgt. Nachteilig ist der hohe Aufwand zur Verhinderung von Schäden am Grundwasser durch Grubenwasser. Im Vergleich zur Braunkohle wird der Eingriff in die Landschaft und in das Ökosystem als ebenso schädlich betrachtet. Die Beurteilung erfolgt mit 4 von 10 Punkten.

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Der Brennstoff für die **Kernenergie** ist das chemische Element Uran. Es ist radioaktiv und es geht eine massive Gesundheitsgefährdung von diesem Stoff aus. Staub und Wasser können mit radioaktiven Partikeln verschmutzt werden und damit die ansässige Bevölkerung nachhaltig schädigen. Neben der risikoreichen Verarbeitung und den unkontrollierbaren Risiken (siehe Fukushima) kommt die Gefährdung für Mensch und Umwelt durch die radioaktiven Abfälle hinzu, die zum Schutz von Mensch und Umwelt aufgrund der hohen Halbwertszeit mehrere tausend Jahre in Salzkavernen gelagert werden sollten. Das Gesamtergebnis für die Kernenergie liegt bei 0 von 10 Punkten.

Da aufgrund fehlender Informationen die Herkunft und Art der Energieträger im Bereich „**sonstige**“ nicht bestimmt werden können, erfolgt deren Bewertung mit 5 von 10 Punkten.

Die Gesamtbewertung des deutschen Strom Mix erfolgt in Tabelle 5.25:

Tabelle 5.25 Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung: Gesamtergebnis Strom

Energieträger	Erzeugung [GWh]	Anteil	Bewertung	Ergebnis
Erdgas	59,1	9,1 %	5	0,5
Steinkohle	118,0	18,1 %	4	0,7
Kernenergie	91,8	14,1 %	0	0
Braunkohle	155,0	23,8 %	4	1,0
sonstige	31,4	4,8 %	5	0,2
Erneuerbare Energien	195,7	30,1 %	9	2,7
<b>Summe:</b>	<b>651</b>	<b>100 %</b>	<b><u>Ergebnis:</u></b>	<b><u>5</u></b>

## 5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

### 5.3.5 Ergebnis ökologischer Vergleich

Mit Hilfe des Bewertungssystems können sowohl die Maßnahmen als auch die Konzepte einer ökologischen Gesamtbewertung unterzogen werden. Es ergibt sich folgendes Gesamtergebnis:

Tabelle 5.26 Gesamtergebnis ökologischer Vergleich

Kriterium	CO <sub>2</sub> -Emissionen	sonstige Emissionen	Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung	gewichtetes Gesamtergebnis	Ranking
Gewichtung	50%	20%	30%		
Bezeichnung	Bewertung				
Ist-Zustand	1,5	4,25	5	3,1	Ist
Maßnahme 1	5,5	5,25	5	5,3	3
Maßnahme 2	4,0	5,0	5	4,5	4
Maßnahme 3	5,5	5,5	5	5,4	2
Konzept 1	0	2,5	6	2,3	6
Konzept 2	3,0	5,25	6	4,4	5
Konzept 3	10	8	6,7	8,6	1

Der aktuelle Zustand des Bahnhofs schneidet mit 3,1 Punkten der Gesamtbewertung schlecht ab. Das Anlagenkonzept 3 schneidet in der ökologischen Gesamtbewertung mit einer Punktzahl von 8,6 von 10 mit Abstand am besten ab, vor den Maßnahmen 3 und 1.

## 5.4 Zusammenfassung

In Kapitel 5 wurden die Maßnahmen und Konzepte auf die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen überprüft. In der nachfolgenden Tabelle 5.27 werden alle Maßnahmen und Konzepte zusammen dargestellt.

Das Anlagenkonzept 3 sticht aus dieser Übersicht durch seine überwiegend sehr gute Bewertung hervor und belegt damit Platz 1 der Gesamtbewertung. Auf den Plätzen 2 und 3 werden die Maßnahmen 1 und 3 eingeordnet. Sie schneiden hinsichtlich des Jahres-Primärenergiebedarfs und der jährlichen Brennstoffkosteneinsparung auf den Plätzen 2 und 3 ab. Bei der ökologischen Bewertung belegen sie diese Plätze ebenfalls.

Das Anlagenkonzept 2 belegt den letzten Platz in der Gesamtbewertung. Die Kombination aus BHKW (60%) und Spitzenlastkessel (40%) schneidet hinsichtlich des Jahres-Primärenergiebedarfs und des ökologischen Vergleichs sehr schlecht ab und ist trotz einer Amortisationszeit von 28 Jahren nicht zu empfehlen.

5 Vergleich der Maßnahmen und Konzepte

Tabelle 5.27 Kennzahlenvergleich der vorgestellten Maßnahmen und Konzepte

			Gebäudehülle			Anlagentechnik		
	Einheit	Ist-Zustand	Maßnahme 1	Maßnahme 2	Maßnahme 3	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Investitionskosten	€	0	2.007.859	2.100.368	3.582.817	317.500	278.500	2.281.700
Betriebskosten	€/Jahr	204.665	147.198	171.130	143.785	191.924	189.324	86.080
Einsparung Betriebskosten	€/Jahr	0	57.467	33.535	60.880	12.741	15.341	118.585
Jahres-Primärenergiebedarf	kWh/m²	125,2	91,2	105,1	89,2	124,1	102,9	58,8
Endenergiebedarf	kWh/m²	190,5	123,0	151,6	118,5	163,4	167,2	56,6
Transmissionswärmeverluste	W/m²K	1,24	0,493	0,806	0,440	1,24	1,24	1,24
Gesamtergebnis ökologische Bewertung	-	3,1	5,3	4,5	5,4	2,3	4,4	8,6
CO <sub>2</sub> - Emissionen	kg/Jahr	576.392	413.132	480.273	403.411	655.389	508.597	220.528
SO <sub>2</sub> - Emissionen	kg/Jahr	-14,5	120,8	63,0	132,9	609,2	-102,8	179,3
NO <sub>x</sub> - Emissionen	kg/Jahr	951	615,1	753,5	593,1	554	909	182
Amortisationszeit	Jahre	-	ja 18 Jahre	ja 29 Jahre	ja 30 Jahre	ja 28 Jahre	ja 15 Jahre	ja 20 Jahre

## 6 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Masterthesis mit dem Titel „Konzept- und Variantenvergleich für eine kombinierte, energieeffiziente Wärme- und Kälteerzeugung von Gebäuden“ sollte der Energiebedarf eines Bestandsgebäude festgestellt und optimiert werden. Als Planungsobjekt wurde der Heidelberger Hauptbahnhof festgelegt. Durch eine Bestandsaufnahme vor Ort konnten Daten über die Anlagentechnik und die Gebäudehülle festgestellt und aufgenommen werden. Mit Hilfe dieser Informationen und geeigneter Literatur wurde am Computer ein Simulationsmodell des Bahnhofskomplexes erstellt, welches die gleichen energetischen Eigenschaften wie das Original besitzt. Auf Grundlage des Ist-Zustandes des Simulationsmodells wurden verschiedene Maßnahmen und Konzepte zur energetischen Optimierung abgeleitet und miteinander verglichen.

Auf Basis der zugrunde gelegten Annahmen und Festlegungen stellt die Anlagenkombination aus Erdgas-Wärmepumpe, Kompressionskältemaschine und Brennwertkessel, zur Deckung des Spitzenlasten, die wirtschaftlich und ökologisch beste Variante dar. Der geringe Ausstoß an Treibhausemissionen erweist sich als positiv und umweltschonend. In Kombination mit der Sanierung der Gebäudehülle kann der Energiebedarf durch Reduzierung der Transmissionswärmeverluste zusätzlich weiter gesenkt werden.

Wichtig bei einer Kombination von Sanierungsmaßnahmen und Anlagenkonzepten ist, dass Veränderungen der Anlagentechnik nach der Sanierung der Gebäudehülle erfolge, da es anderenfalls zur falschen Dimensionierung der gesamten Anlagentechnik führen würde. Die Folgen wären überhöhte Investitionskosten für die Anlagentechnik und eine Lastpunktverschiebung im Anlagenbetrieb, sodass die gesamten Heiz- und Kühlsysteme nicht im optimalen Lastbereich arbeiten würden. Ein erhöhter Brennstoffverbrauch und Verschleiß der Bauteile wären die negative Folge.

Das verwendete Simulationsprogramm bietet sehr umfangreiche Einstellungen hinsichtlich der Bauweise des Gebäudes und der technischen Ausstattung mit Anlagentechnik. Da die Anwendung dieses Programms ohne Schulungswissen durch Selbststudium erfolgte, konnten nicht alle Möglichkeiten der Software ausgenutzt werden. Wichtige und offensichtliche Einstellparameter, wie zum Beispiel die Einstellungen bezüglich der Innentemperatur für die unbeheizte Schalterhalle, sind angepasst worden, sodass ein aussagekräftiges Modell entstanden ist.

Der Autor hat im Rahmen der Abschlussarbeit detaillierten Einblick in die Bereiche der Anlagen- und Gebäudeplanung sowie der Gebäudesimulation erhalten. Aufgrund der Variantenvielfalt und den unterschiedlichen Literaturangaben sowie zum Teil fehlenden Unterlagen zum Bestandsgebäude, mussten auch Annahmen getroffen werden, die Einfluss auf die Ergebnisse genommen haben. Aus diesem Grund sind die theoretischen

## 6 Fazit und Ausblick

---

Energiebilanzen als Annäherungen zu sehen, die in der Realität und durch das Nutzerverhalten abweichen können.

Die Auslegung eines Heiz- und Kühlsystems für ein Gebäude mit mehr als 15.000 m<sup>2</sup> Nutz- und Verkehrsfläche ist ein sehr komplexes und fachlich breit aufgestelltes Thema, sodass die Anlagenplanung durch Fachfirmen unabdingbar ist. Der Autor hat die Annahmen nach wissenschaftlicher Recherche objektiv getroffen und entsprechend transparent begründet.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass die Modernisierung bzw. Sanierung des Heidelberger Hauptbahnhofs nicht nur wirtschaftliche, sondern auch ökologische Vorteile bietet. Die einmalige Investition in ein ganzheitliches Konzept zur geeigneten Dämmung der Gebäudehülle unter Einhaltung der EnEV Anforderungen sowie eine in diesem Rahmen planbare Modernisierung der Anlagentechnik zur kombinierten Wärme- und Kältebereitstellung ist in Hinblick auf den weiteren Bahnhofsbetrieb sinnvoll. Die Wärme- und Kälteversorgung durch eine Erdgas-Wärmepumpe und einer Kompressionskältemaschine kombiniert mit einer weiteren PV-Anlage auf dem Dach des Bestandsgebäudes hat sich aus ökologischer und ökonomischer Sichtweise als die am besten geeignete Lösung herausgestellt.

## Quellenverzeichnis

## Quellenverzeichnis

[1]. **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.** [Online]

[Zitat vom: 12. 03. 2016.]

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3959.pdf>.

[2]. **Bundesverband der Deutschen Industrie.** [Online] [Zitat vom: 02. 05. 2016.]

[http://bdi.eu/media/themenfelder/umwelt/publikationen/201403\\_Flyer\\_Energieeffizienz\\_bei\\_Nichtwohngbaeuden.pdf](http://bdi.eu/media/themenfelder/umwelt/publikationen/201403_Flyer_Energieeffizienz_bei_Nichtwohngbaeuden.pdf).

[3]. **Ausschuss für Arbeitsstätten.** [Online] <http://www.raumtemperatur-info.de/arbeitsstattenverordnung-raumtemperatur/>.

[4]. **Sächsische Energieagentur GmbH.** [Online] [Zitat vom: 04. 02. 2016.]

<http://www.saena.de/download/Gebaeude/ThermischeHuelle.pdf>.

[5]. **freiraum architekten.** *EnEV Begriffsdefinitionen.* Konstanz : s.n., 2007.

[6]. **ÖkoRen GmbH.** [Online] 01. 01. 2010. [Zitat vom: 20. 01. 2016.]

<http://www.oekoren.de/transmissionswaermeverlust-definition-erklaerung/>.

[7]. *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) vom 02.12.2004.*

**Bundesregierung.** Teil I, Nr. 64 (S. 3146-3162), Bonn : Bundesgesetzblatt, 2004.

[8]. **Deutsche Energie Agentur GmbH.** [Online] 06. 06 2008. [Zitat vom: 20. 01. 2016.]

<http://www.zukunft-haus.info/presse/digitale-pressemappen/archiv/das-eewaermeg/erneuerbare-energien-waermegesetz-eewaermeg.html>.

[9]. **Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften.** *Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.* Brüssel : s.n., 04.01.2003.

[10]. *Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 29.04.2009.*

**Bundesregierung.** Teil 1, Nr. 23 (S.959-989), Bonn : BGBl, 2009.

[11]. **Deutsche Bahn AG.** [Online] [Zitat vom: 05. 03 2016.]

[http://www.deutschebahn.com/de/geschaefte/infrastruktur/bahnhof/bahnhofs\\_kategorien.html](http://www.deutschebahn.com/de/geschaefte/infrastruktur/bahnhof/bahnhofs_kategorien.html).

[12]. **Deutsche Bahn Station & Service AG.** Heidelberg : s.n.

[13]. **www.Modernus.de.** [Online] 01. 02 2015. [Zitat vom: 01. 02 2016.]

<http://modernus.de/energieberater-software/energieberatersoftware>.

## Quellenverzeichnis

- [14]. **GEB - Gebäude Energie Berater.** www.geb-info.de. [Online] 12. 11. 2014. [Zitat vom: 01. 02. 2016.] <http://www.geb-info.de/GEB-Newsletter-2014-26/Energieberatungs-Software-vom-Marktfuehrer-Umsteiger-Aktion,QUIEPTYxNzYxNCZNSUQ9MTA1MzYz.html>.
- [15]. **Deutsche Energie Agentur GmbH.** *Arbeitshilfe für die Ausstellung von Energiepässen.* Berlin : s.n., 2004.
- [16]. **Fachhochschule Esslingen .** [Online]  
[https://www.energieberaterkurs.de/export/sites/default/de/Dateien\\_Kennwerte/kennwerte\\_aussenbauteile.pdf](https://www.energieberaterkurs.de/export/sites/default/de/Dateien_Kennwerte/kennwerte_aussenbauteile.pdf).
- [17]. **Optimus Gruppe.** *Handbuch zur Bestimmung von Außenbauteilen.* Berlin : s.n., 2008.
- [18]. **Energieberatung Müller.** [Online] 10. 11. 2015. [Zitat vom: 02. 04. 2016.] <http://www.energie-m.de/din18599/zonierung.html>.
- [19]. *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 24.07.2007.* **Bundesregierung.** Teil I, Nr. 34 (S. 1519-1567), Bonn : Bundesgesetzblatt, 2007.
- [20]. **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** *DIN V 18599-1 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energ.* Berlin : Beuth Verlag, 2011.
- [21]. —. *DIN V 18599-10 Energetische Bewertung von Gebäuden - Klimadaten und Nutzungsrandbedingungen.* Berlin : Beuth Verlag, 2011.
- [22]. **Stadtwerke Heidelberg GmbH.** [Online] [Zitat vom: 05. 04. 2016.] <https://www.swhd.de/de/Energie-und-Wasser/Fernwaerme/Rechte-Seite/Zertifikat-Fernwaerme-PE-Faktor-2015.pdf>.
- [23]. **Hottgenroth Software GmbH & Co. KG.** [Online] [Zitat vom: 04. 02. 2016.] <https://www.hottgenroth.de/software/solarpvsimulation/pv-simulation/>.
- [24]. **Holm, Andreas, Simon, Holger und Tremel, Sebastian.** [Online] [Zitat vom: 02. 03. 2016.] [http://www.enbause.de/fileadmin/user\\_upload/Bauen\\_und\\_Sanieren/Finanzen\\_Beratung/EnEV\\_2014\\_und\\_Daemmung.pdf](http://www.enbause.de/fileadmin/user_upload/Bauen_und_Sanieren/Finanzen_Beratung/EnEV_2014_und_Daemmung.pdf).
- [25]. **Bauratgeber24.** [Online] [Zitat vom: 03. 06. 2016.] <http://www.ib-rauch.de/bauphysik/formel/warmkoef4.html>.

## Quellenverzeichnis

- [26]. **Bundesministerium für Umwelt, Natur, Bau und Reaktorsicherheit.** [Online]  
[Zitat vom: 03. 04. 2016.]  
[http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/effizienzhaus\\_plus\\_broschuere\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/effizienzhaus_plus_broschuere_bf.pdf).
- [27]. **Stadtwerke Heidelberg GmbH.** [Online] 30. 06. 2015. [Zitat vom: 05. 04. 2016.]  
<https://www.swhd.de/de/Energie-und-Wasser/Fernwaerme/Rechte-Seite/Zertifikat-Fernwaerme-Anteil-Erneuerbare-Energien-2015.pdf>.
- [28]. **Schmitz, K. und Schaumann, G.** *Kraft-Wärme-Kopplung.* Berlin : Springer Verlag, 2005.
- [29]. *VDI 4608 Blatt 2: Energiesysteme - Kraft-Wärme-Kopplung - Allokation und Bewertung.* **Verband Deutscher Ingenieure.** s.l. : Beuth Verlag, 2008.
- [30]. **Caterpillar Energy Solutions.** [Online] [Zitat vom: 02. 06. 2016.]  
[http://www.mwm.net/files/upload/image/3464\\_2\\_kraft-waerme-kopplung\\_kwk\\_cogeneration-prinzip.jpg](http://www.mwm.net/files/upload/image/3464_2_kraft-waerme-kopplung_kwk_cogeneration-prinzip.jpg).
- [31]. **Bohne, D.** *Technischer Ausbau von Gebäuden - Und nachhaltige Gebäudetechnik.* Berlin : Springer Verlag, 2014.
- [32]. **Havlat, Oliver.** [Online] [Zitat vom: 04. 05. 2016.]  
<https://www.verbraucherzentrale.de/BHKW-Wirtschaftlichkeit#welchezusaetzlichenkomponentenwerdenbenoetigt>.
- [33]. **solares bauen GmbH .** [Online] [Zitat vom: 21. 05. 2016.] <http://www.bhkw-jetzt.de/planung/bhkw-auslegung/>.
- [34]. —. [Online] [Zitat vom: 02. 04. 2016.] <http://www.bhkw-jetzt.de/politik-recht/kwk-gesetz/>.
- [35]. **Paschotta, Dr. Rüdiger.** [Online] [Zitat vom: 26. 04. 2016.] <https://www.energielexikon.info/brennwertkessel.html>.
- [36]. **Ingenieurbüro Energiekontor Hannover.** [Online] [Zitat vom: 04. 06. 2016.]  
<http://energiekontor-hannover.de/planung/wirtschaftlicheitsrechnung.html>.
- [37]. **Schmid, Wolfgang.** [Online] [Zitat vom: 03. 06. 2016.]  
[http://www.gasklima.de/fileadmin/filemounts/gkl/pdf/Presse/YAZ\\_Dachcafe\\_Gie%C3%9Fen\\_TGA\\_Fach\\_7-2011.PDF](http://www.gasklima.de/fileadmin/filemounts/gkl/pdf/Presse/YAZ_Dachcafe_Gie%C3%9Fen_TGA_Fach_7-2011.PDF).
- [38]. **BINE Informationsdienst.** [Online] [Zitat vom: 02. 06. 2016.]  
[http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2012/Projekt\\_07-2012/ProjektInfo\\_0712\\_internetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2012/Projekt_07-2012/ProjektInfo_0712_internetx.pdf).

## Quellenverzeichnis

- [39]. **Jagnow, Horschler und Wolff.** *Die neue Energieeinsparverordnung 2002.* Köln : DWD-Verlag, 2002. ISBN 3-87156-499-0.
- [40]. **Viessmann Deutschland GmbH.** *Planungshandbuch - Wärmepumpen.* Allendorf : s.n., 2011.
- [41]. **Pape, Prof. Dr. Ulrich.** [Online] [Zitat vom: 02. 05. 2016.] <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/annuitaetsmethode.html>.
- [42]. **WiBe Team.** [Online] [Zitat vom: 04. 05. 2016.] <http://wibe.de/wahl-des-zinssatzes-fur-wirtschaftlichkeitsuntersuchungen-wibe-projekte/>.
- [43]. **Stadtwerke Heidelberg GmbH.** [Online] [Zitat vom: 04. 04. 2016.] <https://www.swhd.de>.
- [44]. **Bausparkasse Schwäbisch Hall AG.** [Online] [Zitat vom: 18. 05. 2016.] <https://www.schwaebisch-hall.de/wohnen-und-leben/bauen-und-modernisieren/umbau-modernisierung/renovierungskosten-berechnen.html>.
- [45]. **Energieheld GmbH.** [Online] [Zitat vom: 18. 05. 2016.] <http://www.energieheld.de/fenster/kosten/energiesparfenster>.
- [46]. **Henning, Hans Martin und Palzer, Andreas.** Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE. [Online] [Zitat vom: 13. 06. 2016.] <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-energiesystem-deutschland-2050.pdf>.
- [47]. **Urbaneck, Thorsten.** *Kältespeicher: Grundlagen, Technik, Anwendung.* s.l. : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012. 3486707760/ 9783486707762.
- [48]. **ASUE - Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.** [Online] [Zitat vom: 01. 06. 2016.] [http://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2011/broschueren/05\\_07\\_11\\_asue-bhkw-kenndaten-0311.pdf](http://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2011/broschueren/05_07_11_asue-bhkw-kenndaten-0311.pdf).
- [49]. **Energieheld GmbH .** [Online] [Zitat vom: 28. 05. 2016.] <http://www.energieheld.de/photovoltaik/kosten-pv-anlage>.
- [50]. **Anondi GmbH.** [Online] [Zitat vom: 30. 05. 2016.] <http://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-wirtschaftlichkeit/photovoltaik-anschaffungskosten>.
- [51]. **Klenner, Silvio.** [Online] [Zitat vom: 23. 04 2016.] <http://www.erdwaermezeitung.de/was-kostet-eine-erdwaermesondenanlage/>.
- [52]. **Verein Deutscher Ingenieure e.V.** *VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrunds. Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.* Düsseldorf : s.n., 2001.

## Quellenverzeichnis

[53]. **Lambauer, J., et al.** [Online] [Zitat vom: 20. 06. 2016.] [http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/pb\\_pdf/Lambauer\\_IER\\_Forschungsbericht\\_Grosswaermepumpen.pdf](http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/pb_pdf/Lambauer_IER_Forschungsbericht_Grosswaermepumpen.pdf).

[54]. **Doelling, Robert.** [Online] [Zitat vom: 10. 06. 2016.] <http://www.energie-experten.org/experte/meldung-anzeigen/news/waermepumpen-kosten-und-effizienz-beachten-3291.html>.

[55]. **Schlott, Siegfried.** *Kälteerzeugung für die Klimatechnik mit einer Kompressions- oder Absorptionskältemaschine mit Fernwärme.* Zwickau : s.n., 2001.

[56]. **Umweltbundesamt.** [Online] [Zitat vom: 03. 05. 2016.] [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_29\\_2014\\_schrempf\\_komplett\\_10.11.2014\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_29_2014_schrempf_komplett_10.11.2014_0.pdf).

[57]. —. [Online] [Zitat vom: 23. 05. 2016.] [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_15\\_2013\\_emissionsbilanz\\_erneuerbarer\\_energietraeger.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_15_2013_emissionsbilanz_erneuerbarer_energietraeger.pdf).

[58]. **Heinritzi, Johannes.** [Online] [Zitat vom: 15. 06. 2016.] [http://www.focus.de/finanzen/news/kurz-erklaert-was-ist-fracking\\_aid\\_914220.html](http://www.focus.de/finanzen/news/kurz-erklaert-was-ist-fracking_aid_914220.html).

[59]. **unbekannt.** [Online] [Zitat vom: 16. 05. 2016.] [http://www.energiwelten.de/elexikon/lexikon/seiten/htm/010406\\_Braunkohlegewinnung\\_im\\_offenen\\_Tagebau.htm](http://www.energiwelten.de/elexikon/lexikon/seiten/htm/010406_Braunkohlegewinnung_im_offenen_Tagebau.htm).

[60]. *Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18.11.2013.* **Bundesregierung.** Bonn : Bundesgesetzblatt, 2013, Bde. Teil I, Nr. 67 (S. 3951-3990).

[61]. **Verbraucherzentrale.** [Online] [Zitat vom: 16. 03. 2016.] <https://www.verbraucherzentrale.de/enev>.

[62]. **Henning, Hans-Martin und Urbaneck, Thorsten.** *Kühlen und Klimatisieren mit Wärme.* Berlin : FIZ Karlsruhe, 2009. 978-3-934595-81- 1.

[63]. **scon-marketing GmbH.** [Online] [Zitat vom: 14. 06. 2016.] <https://www.solaranlagen-portal.de/photovoltaik/preis-solar-kosten.html>.

### Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Heizkostenabrechnung (Ausschnitt)

Anhang 2: EnEV und KfW Anforderungen (Maßnahme 1)

Anhang 3: EnEV §5 Anrechnung von PV-Strom PV-Anlage 2 (Bestandsgebäude)

Anhang 4: Tabellarische Übersicht der Wirtschaftlichkeitsberechnung Maßnahme 1

Anhang 5: Tabellarische Wirtschaftlichkeitsberechnung Maßnahme 3

Anhang 6: Kostenkurve Investitionskosten Abs. KM

Anhang 7: Tabellarische Wirtschaftlichkeitsberechnung Konzept 3

Anhang 1: Heizkostenabrechnung (Ausschnitt)

Bei Rückfragen  
kontaktieren Sie bitte

**ista**

Gesamtabrechnung Energie- und Betriebskosten - Ihre Daten

ista Deutschland GmbH  
Westringstraße 53  
04435 Schkeuditz  
Tel. 034205/43-555  
Fax 034205/43-599

Liegenschaftsnummer [REDACTED]  
Abrechnungsdatum 22.07.2015  
Abrechnungszeitraum 01.01.2013 - 31.12.2013

4/43  
Seite 

### 3. Aufstellung der Gesamtkosten

Kostenart	Datum	Menge Einheit	Teilbetrag		Gesamtbetrag	
			Netto	Brutto	Netto	Brutto
Brennstoffkosten						
Rechnung	31.12.2013	1.455,35 MWh Fernw.	104.096,59 €	123.874,94 €		
Summe Brennstoffkosten		1.455,35 MWh Fernw.			104.096,59 €	123.874,94 €
Heiznebenkosten						
Betriebsstrom			4.373,81 €	5.204,83 €		
Wartungskosten			245,80 €	292,50 €		
Geb.Verbrauchserfsg.			2.573,46 €	3.062,42 €		
Summe Heiznebenkosten					7.193,07 €	8.559,75 €
Summe Heizanlage (Brennstoff- und Heiznebenkosten)					111.289,66 €	132.434,69 €
Zusatzkosten Heizung						
Kosten Geräte Hzg			5.142,05 €	6.119,04 €		
Summe Zusatzkosten Heizung					5.142,05 €	6.119,04 €
Heiz- und Warmwasserkosten					116.431,71 €	138.553,73 €
Summe Hausnebenkosten					42.876,14 €	45.241,21 €
→ Gesamtkosten der Liegenschaft					159.307,85 €	183.794,94 €

### 4. Ermittlung Heizkosten

## Anhang 2: EnEV und KfW Anforderungen (Maßnahme 1)

### EnEV-Anforderungen

	Ist-Wert	mod. Altbau	EnEV-Neubau	- 15 %	- 30 %	- 50 %	Neubau %
Jahres-Primärenergiebedarf $q_p$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	91,17	156,92	84,06	71,45	58,84	42,03	+8%
Mittlere U-Werte [W/(m <sup>2</sup> K)]							
- Opake Außenbauteile	0,232	0,490	0,280	0,238	0,196	0,140	-17 %
- Transparente Außenbauteile	1,297	2,660	1,500	1,275	1,050	0,750	-14 %

### KfW-Anforderungen "Energieeffizienzprogramm - Sanierung eines Gebäudes"

	Ist-Wert	Referenzgebäude (EnEV)	KfW-Anforderung (EnEV)
Jahres-Primärenergiebedarf $q_p$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	91,17	112,08 <sup>1)</sup>	112,08
Transmissionswärmeverlust $H_T$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,493	0,396 <sup>2)</sup>	0,475

<sup>1)</sup> Jahres-Primärenergiebedarf für das entsprechende Referenzgebäude nach EnEV Anlage 2 Tabelle 1.

<sup>2)</sup> Transmissionswärmeverlust für das entsprechende Referenzgebäude nach EnEV Anlage 2 Tabelle 1.

### KfW-Anforderungen "Energetische Stadtsanierung - Energieeffizient Sanieren"

	Ist-Wert	Referenzgebäude (EnEV)	KfW-EH 100 (EnEV)	KfW-EH 85 (EnEV)	KfW-EH 70 (EnEV)	KfW-EH 55 (EnEV)	KfW-EH Denkmal (EnEV)
Jahres-Primärenergiebedarf $q_p$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	91,17	112,08 <sup>1)</sup>	112,08	95,27	78,46	61,65	179,34
Transmissionswärmeverlust $H_T$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,493	0,396 <sup>2)</sup>	0,455	0,396	0,337	0,277	0,693

Anhang 3: EnEV §5 Anrechnung von PV-Strom PV-Anlage 2 (Bestandsgebäude)

Energieberater 18599

**EnEV 2014 § 5. Anrechnung von Strom aus erneuerbaren Energien**

Nach § 9 Absatz 2 Satz 1 i. V. m. § 5 EnEV ist diese Vorschrift auch bei Berechnungen im Rahmen von wesentlichen Änderungen bestehender Gebäude anwendbar.

	Ertrag PV-Anlage	Gebäude-Strombedarf	anrechenbar nach §5
Januar	<b>8.276</b> kWh	<b>19.461</b> kWh	<b>8.276</b> kWh
Februar	<b>11.443</b> kWh	<b>17.147</b> kWh	<b>11.443</b> kWh
März	<b>25.014</b> kWh	<b>18.516</b> kWh	<b>18.516</b> kWh
April	<b>25.414</b> kWh	<b>17.694</b> kWh	<b>17.694</b> kWh
Mai	<b>33.055</b> kWh	<b>18.887</b> kWh	<b>18.887</b> kWh
Juni	<b>38.143</b> kWh	<b>19.718</b> kWh	<b>19.718</b> kWh
Juli	<b>36.559</b> kWh	<b>22.155</b> kWh	<b>22.155</b> kWh
August	<b>32.787</b> kWh	<b>21.278</b> kWh	<b>21.278</b> kWh
September	<b>22.145</b> kWh	<b>18.449</b> kWh	<b>18.449</b> kWh
Oktober	<b>20.248</b> kWh	<b>18.793</b> kWh	<b>18.793</b> kWh
November	<b>8.670</b> kWh	<b>18.931</b> kWh	<b>8.670</b> kWh
Dezember	<b>7.131</b> kWh	<b>20.243</b> kWh	<b>7.131</b> kWh
<b>Jahr</b>	<b>268.885</b> kWh	<b>231.272</b> kWh	<b>191.010</b> kWh

Ermittlung des Ertrags der PV-Anlage

PV-Software starten

Ergebnisse aus PV-Software einlesen

Ergebnisse aus gespeicherten Dateien (PV-Software) einlesen

— Ertrag der PV-Anlage  
— Strombedarf des Gebäudes  
— nach EnEV §5 anrechenbar

## Anhang 4: Tabellarische Wirtschaftlichkeitsberechnung Maßnahme 1

Tabellarische Wirtschaftlichkeitsberechnung								
Jahr	Investitionen (Mehrkosten)	Energiekosten (Ist-Zustand)	Energiekosten (saniert)	Energiekosten-ersparnis	Wartungskosten	Steuerersparnis	Zinskosten	Saldo
0	975.528,61	203.242,18	146.906,23					-975.528,61
1		207.307,02	149.844,35	57.462,67			19.510,57	-937.576,51
2		211.453,16	152.841,24	58.611,92			18.751,53	-897.716,12
3		215.682,23	155.898,07	59.784,16			17.954,32	-855.886,28
4		219.995,87	159.016,03	60.979,84			17.117,73	-812.024,16
5		224.395,79	162.196,35	62.199,44			16.240,48	-766.065,21
6		228.883,71	165.440,28	63.443,43			15.321,30	-717.943,08
7		233.461,38	168.749,08	64.712,30			14.358,86	-667.589,64
8		238.130,61	172.124,06	66.006,54			13.351,79	-614.934,89
9		242.893,22	175.566,54	67.326,68			12.298,70	-559.906,91
10		247.751,08	179.077,87	68.673,21			11.198,14	-502.431,84
11		252.706,10	182.659,43	70.046,67			10.048,64	-442.433,81
12		257.760,23	186.312,62	71.447,61			8.848,68	-379.834,88
13		262.915,43	190.038,87	72.876,56			7.596,70	-314.555,02
14		268.173,74	193.839,65	74.334,09			6.291,10	-246.512,03
15		273.537,22	197.716,44	75.820,77			4.930,24	-175.621,50
16		279.007,96	201.670,77	77.337,19			3.512,43	-101.796,74
17		284.588,12	205.704,19	78.883,93			2.035,93	-24.948,74
18		290.279,88	209.818,27	80.461,61			498,97	+55.013,89
19		296.085,48	214.014,64	82.070,84			-1.100,28	+138.185,01
20		302.007,19	218.294,93	83.712,26			-2.763,70	+224.660,97
21		308.047,33	222.660,83	85.386,50			-4.493,22	+314.540,69
22		314.208,28	227.114,05	87.094,23			-6.290,81	+407.925,74
23		320.492,44	231.656,33	88.836,12			-8.158,51	+504.920,37
24		326.902,29	236.289,45	90.612,84			-10.098,41	+605.631,62
25		333.440,34	241.015,24	92.425,10			-12.112,63	+710.169,35
26		340.109,15	245.835,55	94.273,60			-14.203,39	+818.646,33
27		346.911,33	250.752,26	96.159,07			-16.372,93	+931.178,33
28		353.849,56	255.767,30	98.082,25			-18.623,57	+1.047.884,15
29		360.926,55	260.882,65	100.043,90			-20.957,68	+1.168.885,73
30		368.145,08	266.100,30	102.044,78			-23.377,71	+1.294.308,22



Der Saldo berechnet sich aus Vorjahressaldo - Investitionen + Energiekostenersparnis - Wartungskosten + Steuerersparnis - Zinskosten

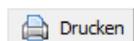
Endwert: **+1.294.308,22**

Barwert: **+714.549,89**

Annuität: **+31.904,60**

## Anhang 5: Tabellarische Wirtschaftlichkeitsberechnung Maßnahme 3

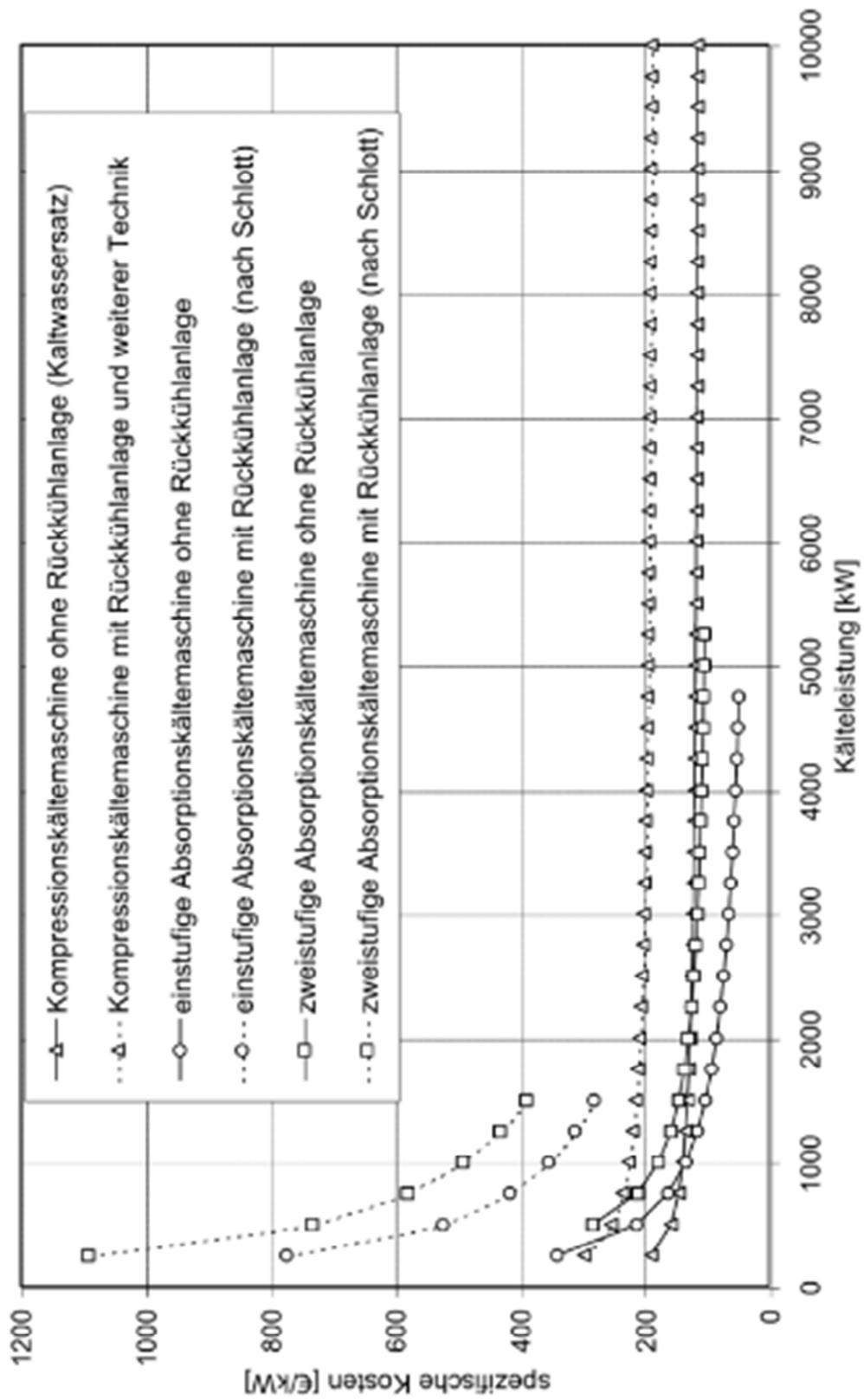
Tabellarische Wirtschaftlichkeitsberechnung								
Jahr	Investitionen (Mehrkosten)	Energiekosten (Ist-Zustand)	Energiekosten (saniiert)	Energiekosten-ersparnis	Wartungs-kosten	Steuer-ersparnis	Zins-kosten	Saldo
0	1.763.010,76	203.242,18	143.492,01					-1.763.010,76
1		207.307,02	146.361,85	60.945,17	-127,49		35.260,22	-1.737.198,31
2		211.453,16	149.289,09	62.164,08	-133,23		34.743,97	-1.709.644,97
3		215.682,23	152.274,87	63.407,36	-139,22		34.192,90	-1.680.291,29
4		219.995,87	155.320,37	64.675,51	-145,49		33.605,83	-1.649.076,12
5		224.395,79	158.426,77	65.969,02	-152,03		32.981,52	-1.615.936,60
6		228.883,71	161.595,31	67.288,40	-158,88		32.318,73	-1.580.808,06
7		233.461,38	164.827,22	68.634,16	-166,03		31.616,16	-1.543.624,03
8		238.130,61	168.123,76	70.006,85	-173,50		30.872,48	-1.504.316,17
9		242.893,22	171.486,23	71.406,98	-181,30		30.086,32	-1.462.814,20
10		247.751,08	174.915,96	72.835,12	-189,46		29.256,28	-1.419.045,90
11		252.706,10	178.414,28	74.291,83	-197,99		28.380,92	-1.372.937,00
12		257.760,23	181.982,56	75.777,66	-206,90		27.458,74	-1.324.411,18
13		262.915,43	185.622,22	77.293,22	-216,21		26.488,22	-1.273.389,98
14		268.173,74	189.334,66	78.839,08	-225,94		25.467,80	-1.219.792,77
15		273.537,22	193.121,35	80.415,86	-236,10		24.395,86	-1.163.536,65
16		279.007,96	196.983,78	82.024,18	-246,73		23.270,73	-1.104.536,48
17		284.588,12	200.923,46	83.664,66	-257,83		22.090,73	-1.042.704,71
18		290.279,88	204.941,92	85.337,96	-269,43		20.854,09	-977.951,42
19		296.085,48	209.040,76	87.044,72	-281,56		19.559,03	-910.184,17
20		302.007,19	213.221,58	88.785,61	-294,23		18.203,68	-839.308,02
21		308.047,33	217.486,01	90.561,32	-307,47		16.786,16	-765.225,39
22		314.208,28	221.835,73	92.372,55	-321,31		15.304,51	-687.836,04
23		320.492,44	226.272,44	94.220,00	-335,76		13.756,72	-607.037,00
24		326.902,29	230.797,89	96.104,40	-350,87		12.140,74	-522.722,46
25		333.440,34	235.413,85	98.026,49	-366,66		10.454,45	-434.783,76
26		340.109,15	240.122,13	99.987,02	-383,16		8.695,68	-343.109,26
27		346.911,33	244.924,57	101.986,76	-400,41		6.862,19	-247.584,28
28		353.849,56	249.823,06	104.026,49	-418,42		4.951,69	-148.091,05
29		360.926,55	254.819,52	106.107,02	-437,25		2.961,82	-44.508,60
30		368.145,08	259.915,91	108.229,16	-456,93		890,17	+63.287,32



Der Saldo berechnet sich aus Vorjahressaldo - Investitionen  
+ Energiekostenersparnis - Wartungskosten + Steuerersparnis  
- Zinskosten

Endwert: **+63.287,32**  
Barwert: **+34.939,09**  
Annuität: **+1.560,03**

Anhang 6: Kostenkurve Investitionskosten Abs. KM [47]



## Anhang 7: Tabellarische Wirtschaftlichkeitsberechnung Konzept 3

Tabellarische Wirtschaftlichkeitsberechnung								
Jahr	Investitionen (Mehrkosten)	Energiekosten (Ist-Zustand)	Energiekosten (sanieret)	Energiekosten-ersparnis	Wartungskosten	Steuerersparnis	Zinskosten	Saldo
0	2.281.700,00	203.465,52	50.707,14					-2.281.700,00
1		207.534,83	51.721,28	155.813,55	37.150,44		45.634,00	-2.208.670,89
2		211.685,53	52.755,71	158.929,82	37.893,45		44.173,42	-2.131.807,94
3		215.919,24	53.810,82	162.108,41	38.651,32		42.636,16	-2.050.987,00
4		220.237,62	54.887,04	165.350,58	39.424,34		41.019,74	-1.966.080,50
5		224.642,37	55.984,78	168.657,59	40.212,83		39.321,61	-1.876.957,35
6		229.135,22	57.104,48	172.030,75	41.017,09		37.539,15	-1.783.482,84
7		233.717,93	58.246,56	175.471,36	41.837,43		35.669,66	-1.685.518,56
8		238.392,29	59.411,50	178.980,79	42.674,18		33.710,37	-1.582.922,32
9		243.160,13	60.599,73	182.560,40	43.527,66		31.658,45	-1.475.548,03
10		248.023,33	61.811,72	186.211,61	44.398,21		29.510,96	-1.363.245,59
11		252.983,80	63.047,96	189.935,85	45.286,18		27.264,91	-1.245.860,83
12		258.043,48	64.308,91	193.734,56	46.191,90		24.917,22	-1.123.235,39
13		263.204,35	65.595,09	197.609,25	47.115,74		22.464,71	-995.206,59
14		268.468,43	66.906,99	201.561,44	48.058,06		19.904,13	-861.607,33
15		273.837,80	68.245,13	205.592,67	49.019,22		17.232,15	-722.266,03
16		279.314,56	69.610,04	209.704,52	49.999,60		14.445,32	-577.006,43
17		284.900,85	71.002,24	213.898,61	50.999,59		11.540,13	-425.647,54
18		290.598,87	72.422,28	218.176,58	52.019,58		8.512,95	-268.003,50
19		296.410,84	73.870,73	222.540,11	53.059,98		5.360,07	-103.883,43
20		302.339,06	75.348,14	226.990,92	54.121,18		2.077,67	+66.908,64
21		308.385,84	76.855,11	231.530,74	55.203,60		-1.338,17	+244.573,95
22		314.553,56	78.392,21	236.161,35	56.307,67		-4.891,48	+429.319,11
23		320.844,63	79.960,05	240.884,58	57.433,83		-8.586,38	+621.356,25
24		327.261,52	81.559,25	245.702,27	58.582,50		-12.427,12	+820.903,14
25		333.806,75	83.190,44	250.616,31	59.754,15		-16.418,06	+1.028.183,36
26		340.482,89	84.854,25	255.628,64	60.949,23		-20.563,67	+1.243.426,44
27		347.292,54	86.551,33	260.741,21	62.168,22		-24.868,53	+1.466.867,96
28		354.238,40	88.282,36	265.956,04	63.411,58		-29.337,36	+1.698.749,77
29		361.323,16	90.048,01	271.275,16	64.679,82		-33.975,00	+1.939.320,11
30		368.549,63	91.848,97	276.700,66	65.973,41		-38.786,40	+2.188.833,76

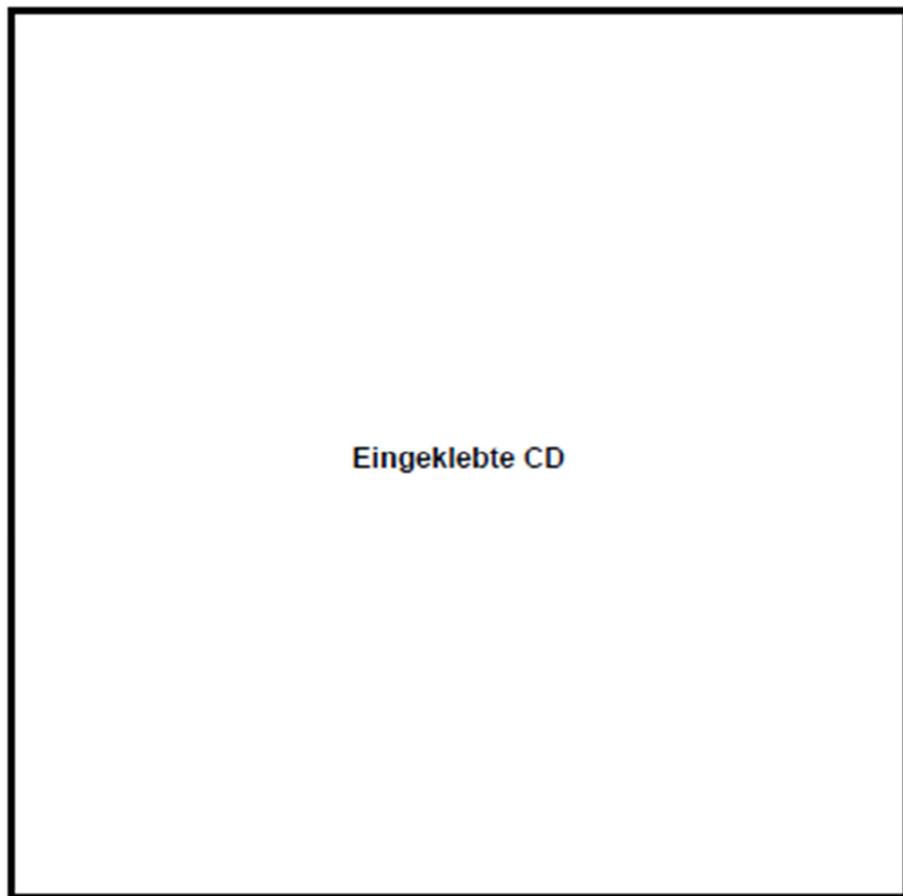

Drucken

Der Saldo berechnet sich aus Vorjahressaldo - Investitionen  
 + Energiekostenersparnis - Wartungskosten + Steuerersparnis  
 - Zinskosten

Endwert: **+2.188.833,76**  
 Barwert: **+1.208.391,40**  
 Annuität: **+53.954,58**

---

Die vorgelegte Masterarbeit ist als schreibgeschütztes PDF-Dokument auf der eingeklebten CD beigefügt.





## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Teetzen

Vorname: Kenneth

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Konzept- und Variantenvergleich für eine kombinierte, energieeffiziente Wärme- und Kälteerzeugung von Gebäuden

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg  
Ort

27.06.2016  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift im Original