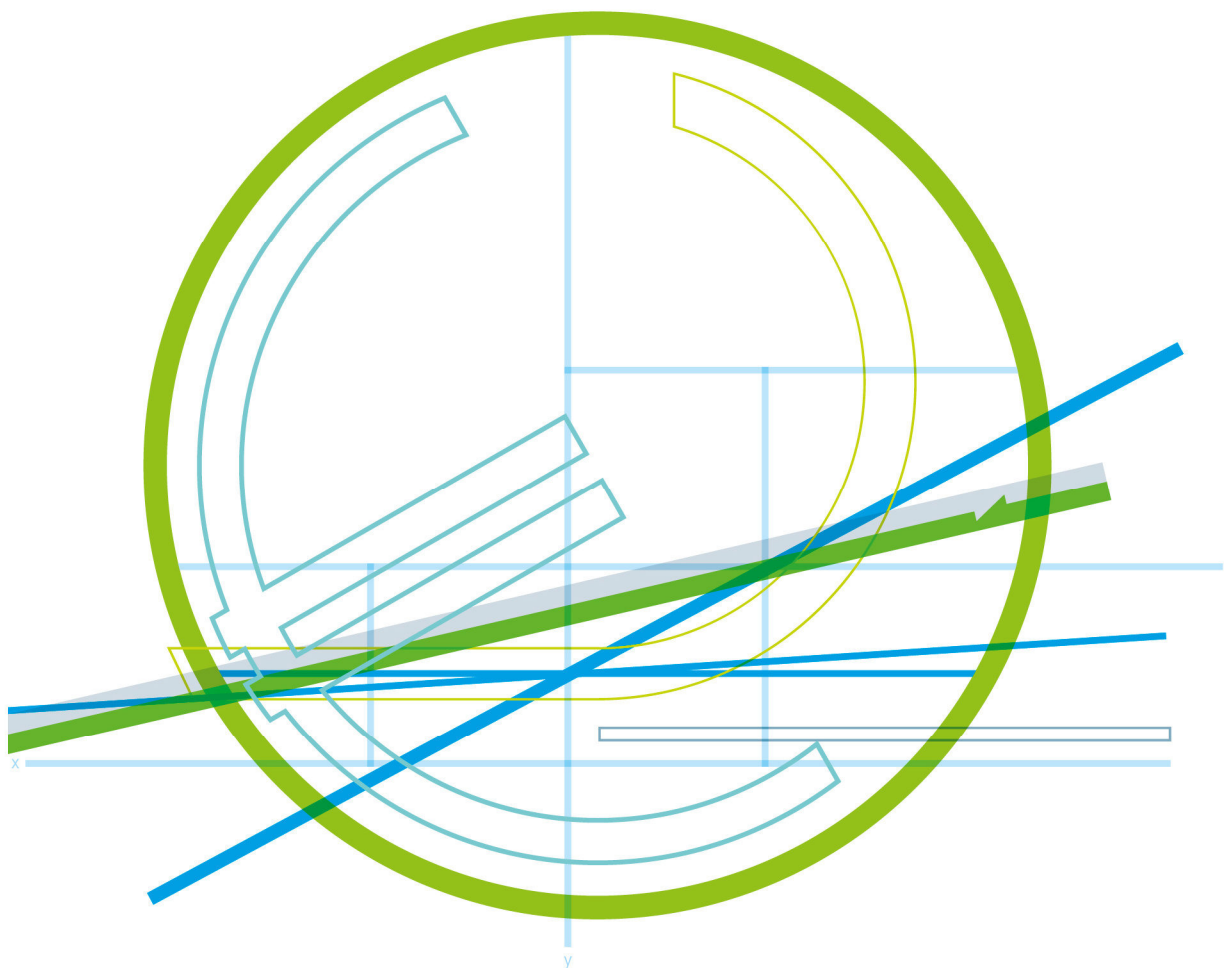


## BIPV cost calculator

Bilingual cost calculator for demonstrating the cost-effectiveness of building-integrated photovoltaics (BIPV)



## VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage [www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at) zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel  
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth  
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>2</b>
1.1	Aufgabenstellung .....	4
1.2	Schwerpunkte des Projektes .....	4
1.3	Einordnung in das Programm .....	4
1.4	Verwendete Methoden .....	5
1.5	Aufbau der Arbeit .....	5
<b>2</b>	<b>Inhaltliche Darstellung .....</b>	<b>7</b>
2.1	Konzept .....	7
2.2	Modellierung .....	9
2.3	Programmierung und Design .....	13
2.4	Ausgewählte Ergebnisse .....	17
2.5	Übersetzungen .....	20
<b>3</b>	<b>Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>Ausblick und Empfehlungen .....</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>24</b>

## Kurzfassung

Gebäudeintegrierte Photovoltaik (GIPV) ist die Kombination von Architektur und Energieerzeugung. Multifunktionalität bedeutet, dass PV-Elemente nicht nur Strom erzeugen, sondern auch andere Funktionen in der Gebäudehülle, wie z.B. Abschattung oder Wärmedämmung, erfüllen.

GIPV ist eines der am schnellsten wachsenden Segmente der PV Industrie und die Zielgruppen wie ArchitektInnen oder Baugesellschaften haben enormen Informationsbedarf bezüglich der Möglichkeiten und der Wirtschaftlichkeit dieser vergleichsweise jungen Technologie. Der GIPV-Kostenrechner ist speziell auf die umfangreichen und einander wechselseitig beeinflussenden Möglichkeiten der gebäudeintegrierten Photovoltaik ausgerichtet. Der GIPV-Kostenrechner ermöglicht einen Vergleich der durch GIPV erzielbaren Kostensynergien und Kosteneinsparungen mit konventionellen Gebäudehüllen. Dies ermöglicht die Einschätzung der Substitutions- und Synergieeffekte aufgrund eingesparten Baumaterials und Reduktionen der laufenden Kosten. Als Ergebnis wird die Wirtschaftlichkeit der GIPV auf Basis tatsächlicher Zusatzkosten und auf Basis der reduzierten (Energie-) Kosten im Vergleich mit konventionellen Gebäudehüllen kalkuliert. Der zweisprachige GIPV-Kostenrechner ist in die Website [www.solarfassade.info](http://www.solarfassade.info) integriert, einer GIPV-Informationsplattform, die im Zuge des EdZ-Projekts „Technologietransfer Solarfassade“ (Projektnr.: 814142) realisiert wurde. Mit dem Ziel, GIPV-Wissen einer internationalen Zielgruppe zur Verfügung stellen, wurde eine englische Version von solarfassade.info, inklusive GIPV-Kostenrechner, erstellt.

Das Projekt wurde im Januar 2010 gestartet und endete nach 16 Monaten Projektdauer Ende April 2011.

## Abstract

Building integrated photovoltaics (BIPV) is the multifunctional combination of architecture and electricity production. Multifunctionality means, that photovoltaic panels do not only produce electricity, but also fulfil other functions of the buildings envelope like thermal insulation or shading.

BIPV is one of the fastest growing segments of the photovoltaic industry and the target groups like architects or builders have an high information demand concerning options and profitability of this comparatively new technology. The BIPV cost calculator is specifically designed for the extensive and interacting possibilities of building integrated photovoltaics. The calculator offers the possibility to estimate cost synergies and cost savings through BIPV compared with conventional building envelope solutions and rooftop PV systems. So it is possible to calculate the synergies by saving of building-material and to specify the cost reduction potential. As a result, the economic profitability of BIPV is evaluated on the basis of the real additional costs and on the basis of reduced (energy) costs compared to conventional building and PV solutions. The bilingual BIPV cost calculator is integrated into [www.solarfassade.info](http://www.solarfassade.info), a BIPV information platform resulting from the EdZ-project „technology transfer solar façade“ (No. 814142). With the objective of offering BIPV know-how to an international target group an English version of [www.solarfassade.info](http://www.solarfassade.info) including the BIPV cost calculator was created.

The project started in January 2010 and ended after 16-month duration in April 2011.

# **1 Einleitung**

## **1.1 Aufgabenstellung**

Die gebäudeintegrierte Photovoltaik (GIPV) ist eines der am schnellsten wachsenden Segmente der PV-Industrie. Die Zielgruppen, z.B. ArchitektInnen oder Baugesellschaften haben enormen Informationsbedarf bezüglich der Möglichkeiten und der Wirtschaftlichkeit dieser noch jungen Technologie. Die Planung derartiger Projekte wird durch geeignete Simulatoren unterstützt. Vorhandene Simulatoren sind allerdings auf Dachaufständerungen bzw. Freiflächenanlagen ausgerichtet und berücksichtigen weder die unterschiedlichen Anforderungen noch die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der GIPV. Das gegenständliche Projekt versucht, diese Lücke zu füllen.

## **1.2 Schwerpunkte des Projektes**

Schwerpunkt des Projektes ist die Entwicklung und Etablierung eines webbasierten, zweisprachigen Berechnungstools für GIPV, um die Wirtschaftlichkeit von GIPV übersichtlich darzustellen.

Der Wirtschaftlichkeitsrechner soll einfach zu bedienen sein. Er soll in die bestehende Infoseite [www.solarfassade.info](http://www.solarfassade.info) integriert sein. Eine kontextabhängige Online-Hilfe wird die BenutzerInnen bei der Bedienung unterstützen. Der Wirtschaftlichkeitsrechner sowie die Webseite werden in deutscher und englischer Sprache verfügbar sein. Dazu muss die bestehende Infoseite [www.solarfassade.info](http://www.solarfassade.info) ins Englische übertragen werden. Die Erweiterung der bestehenden Projektdatenbank dient als weiteres unterstützendes Hilfsmittel für die Information der Interessengruppen.

## **1.3 Einordnung in das Programm**

### **Energiestrategische Ziele**

Das vorliegende Projekt dient der weiteren wirtschaftlichen Entwicklung von gebäudeintegrierter Photovoltaik (GIPV). Die GIPV ist wesentlicher Bestandteil einer verteilten und nachhaltigen Energieversorgung. Einsatzmöglichkeiten bieten sich unter anderem in neuen oder renovierten Gebäuden im städtischen Raum. Dort bieten sich Chancen zu einer umweltfreundlichen Energieerzeugung beizutragen.

Aufgrund der Multifunktionalität von GIPV kann der Energieverbrauch von Gebäuden erheblich gesenkt werden. Durch den Einsatz als Verschattungselement können die Kosten für Klimatisierung (durch Verschattung) und Elektrizität (durch Modulation des Tageslichts) gesenkt werden.

Durch die prinzipbedingte Erzeugung elektrischer Energie zu Zeiten sehr hohen Energiebedarfs (Tagesspitzen zur Mittagszeit) kann das Energienetz durch den Einsatz von GIPV unterstützt werden. Der Einsatz von GIPV in vormals ungenutzten Flächen, besonders in hohen Gebäuden bzw. Gebäuden mit großen Fassadenflächen, führt zu Einsparung von anderweitig nutzbaren Flächen für PV-Anlagen.

### **Systembezogene Ziele**

Eine Steigerung der Erzeugung elektrischer Energie durch GIPV führt bei gleichbleibendem Verbrauch zu einer sinkenden Nachfrage nach konventionellem Strom aus fossilen Quellen oder Kernkraft. Der Wirtschaftlichkeitsrechner demonstriert die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten der GIPV und trägt zur weiteren Bewusstseinsbildung bei. Der Wirtschaftlichkeitsrechner illustriert in Verbindung mit der Webseite die ästhetischen, energetischen und ökonomischen Aspekte von GIPV.

Der Rechner stellt die auftretenden Substitutions- und Synergieeffekte transparent dar. Dies ist wichtig, da die Wirtschaftlichkeit von GIPV-Lösungen oft besser ist als von den Entscheidungsträgern angenommen. Erhöhte Kostentransparenz führt somit tendenziell zu einem stärkeren Einsatz von GIPV in der Zukunft.

## **Technologiestrategische Ziele**

Der Wirtschaftlichkeitsrechner ist zweisprachig und frei im Internet verfügbar. Der Rechner steigert das Wissensniveau der architektonischen und wirtschaftlichen Optionen für GIPV. Aufgrund der Einbindung in die Webseite [www.solarfassade.info](http://www.solarfassade.info) ergibt sich eine Wissensverknüpfung mit den bestehenden Inhalten dieser Webseite, die den Nutzer über alle Aspekte der GIPV informiert. Aufgrund der verbesserten Wissensbasis der festgelegten Zielgruppe (Architekten, Modulhersteller, Ausstatter, Ingenieure, Energieberater, usw.) können die Vorteile der GIPV besser in nationalen und internationalen Projekten erkannt und umgesetzt werden. Durch systematisches Sammeln von Rückmeldungen der Nutzer aus unterschiedlichsten Branchen können sowohl der Rechner als auch die Webseite kontinuierlich verbessert werden. Die englische Version unterstützt die Wissensverbreitung in den internationalen Raum. Damit eröffnen sich auch neue Kooperationsmöglichkeiten für heimische Unternehmen.

## **1.4 Verwendete Methoden**

In der Konzeptphase werden am Anfang die Anforderungen an den Wirtschaftlichkeitsrechner definiert. Die notwendigen Funktionalitäten des Rechners werden ebenso geklärt wie die Frage, welche Parameter vom Benutzer in welcher Weise beeinflusst werden können und welche vom System vorgegeben sind.

Das erarbeitete Konzept dient als Ausgangspunkt für die mathematische Modellierung des Wirtschaftlichkeitsrechners. Besonderes Augenmerk liegt hier auf der Abbildung der Substitutions- und Synergieeffekte von GIPV im Vergleich zu konventionellen baulichen Lösungen.

Der in der Konzeptphase definierte Funktionsumfang beeinflusst maßgeblich das nutzerfreundliche Interaktions-Design. Die entwickelten Ergebnisse werden in Expertengruppen (Key User) diskutiert. Verbesserungsvorschläge fließen in die Entwicklungsarbeit ein. Nach Abschluss dieser Arbeiten kann der Wirtschaftlichkeitsrechner in die Webseite implementiert werden. Die Datenbasis des Rechners ist auf beliebige Erweiterbarkeit ausgelegt.

Darüber hinaus werden neu realisierte Projektbeispiele in die bestehende Projektdatenbank eingepflegt. Um die Webseite und den Rechner international zugänglich zu machen, wird eine englische Version erarbeitet. Die Verbreitung der Ergebnisse wird durch entsprechende Veröffentlichungen und Auftritte auf Konferenzen unterstützt.

## **1.5 Aufbau der Arbeit**

Für eine transparente Darstellung der Wirtschaftlichkeit von Gebäudeintegration musste zunächst ein Konzept zur Ermittlung dieser Wirtschaftlichkeit erarbeitet werden. Das Konzept besteht in der Trennung der technischen Ebene von der ökonomischen Ebene. Dies war notwendig, da aufgrund der komplexen gebäudetechnischen Zusammenhänge eine Online-Simulation des Gebäudeverhaltens nicht praktikabel erschien. Daher wurde entschieden, in einem ersten Schritt offline die technischen Simulationen durchzuführen und in einer Datenbank abzulegen. In einem zweiten

Schritt können diese technischen Ergebnisse online mit Preisen bewertet werden. Ein Vergleich verschiedener Szenarien auf Basis der Kapitalwertmethode ist dann möglich.

Im nächsten Projektschritt wurden die Berechnungsmodelle zur Ermittlung der technischen und ökonomischen Größen entwickelt. Die technische Betrachtung basierte auf dem bewährten Simulationspaket TRNSYS 17, wobei mit einer (fiktiven) Bürozelle und unterschiedlichen GIPV-Szenarien gearbeitet wurde. Zur Ermittlung der ökonomischen Parameter wurde ein Excel-Tool aufgebaut, das als Grundlage für die Programmierung und Verifikation diente.

Ein einfaches und übersichtliches Design des Wirtschaftlichkeitsrechners war ein weiterer Schwerpunkt des Projekts. In mehreren Iterationsschleifen wurde insbesondere an der grafischen Gestaltung der Webseite gearbeitet.

Zur einfachen Bedienung des Wirtschaftlichkeitsrechners wurde eine Online-Hilfe aufgebaut, die schnelle Information in jedem Bearbeitungsschritt zur Verfügung stellt. Zur Verbreitung der Projektergebnisse wurde der Weg über Veröffentlichungen und Vorträgen im Rahmen öffentlicher Veranstaltungen gewählt. Die dabei auftretenden Diskussionen waren Beleg für die derzeitige Relevanz der Wirtschaftlichkeit von GIPV.

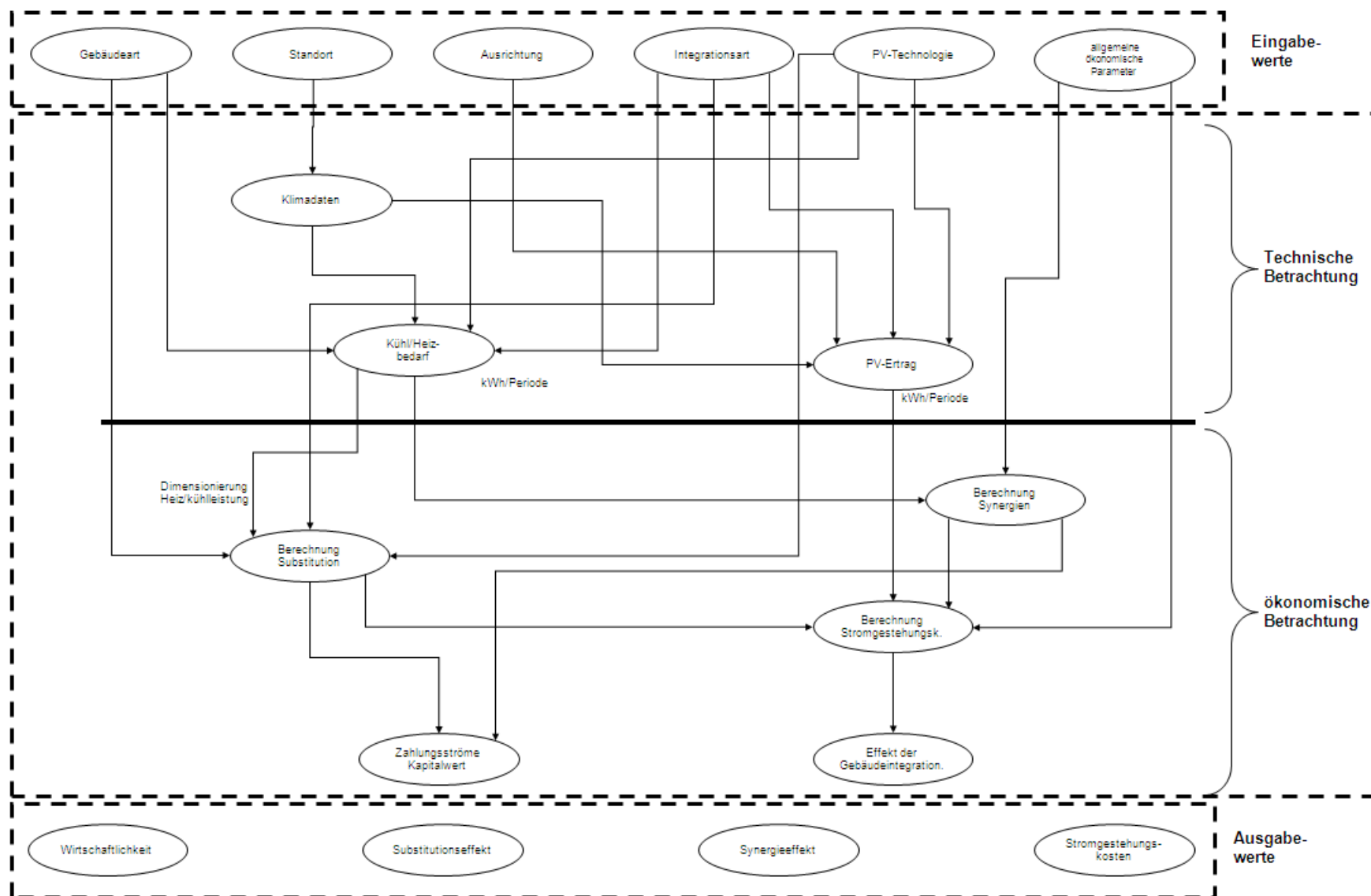


## **2 Inhaltliche Darstellung**

### **2.1 Konzept**

Das detaillierte Konzept des Wirtschaftlichkeitsrechners ist in Abbildung 1 dargestellt. Am Anfang steht die Werteeingabe. Es werden globale (d.h. szenariounabhängige) Parameter sowie szenario-spezifische Parameter unterschieden. Die Werteeingabe erfolgt in mehreren Schritten, wobei der genaue Ablauf bei der Erstellung des Workflows festgelegt wird.

Im Referenzszenario werden ausschließlich konventionelle Baumaterialien verwendet, d.h. keine Photovoltaik-Elemente. Das Auswahlscenario stellt das GIPV-Szenario dar. Nach Auswahl der Gebäudeart, des Standortes, der Ausrichtung und der Integrationsart werden die globalen ökonomischen Parameter eingegeben. Die Werte können entweder aus Simulationen oder realen Messwerten stammen. Derzeit liegen Werte für eine Bürozeile vor. Um einen Vergleich zu erlauben, sind die bauphysikalischen Eigenschaften dieser Bürozeile an den jeweiligen Standort (derzeit Graz und Madrid) angepasst.



**Abbildung 1:** Detailliertes Konzept des Wirtschaftlichkeitsrechners

Die Integrationsarten können grundsätzlich in Dach, Fassade oder Beschattung unterschieden werden.

## 2.2 Modellierung

Im Zuge des Projekts wurden alle Simulationen anhand einer definierten Bürozone durchgeführt. Die technischen und ökonomischen Größen wurden für eine konventionelle Gebäudehülle und mehrere Varianten der PV-Integration ermittelt. Diese Varianten wurden an zwei Standorten mit drei Ausrichtungen simuliert. In der technischen Betrachtung werden der Heiz- und Kühlbedarf sowie der PV-Ertrag pro Periode für das gewählte Szenario ermittelt. Die Verknüpfung der Gebäudesimulation mit den ökonomischen Parametern erfolgt im Online-Tool (bisher als Excel-Version).

Im ökonomischen Modell erfolgt die Verknüpfung der technischen und der ökonomischen Größen zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit (Kapitalwerte, Stromgestehungskosten, etc.). Die Berechnung der Investitionskosten für die Kühlung setzen sich dabei aus dem maximal benötigten Kühlbedarf (Dimensionierung der Anlage) und den Kosten pro Kilowatt zusammen. Die Berechnung des Nettokapitalwertes für Heizung erfolgt analog. Zunächst werden die Investitionskosten für die zu installierende PV-Anlage berechnet und in Beziehung zu jenen einer konventionellen Gebäudehülle gesetzt. Unter Berücksichtigung des Substitutionsgrades ergibt sich der Substitutionseffekt als Differenz der konventionellen Gebäudehülle zu jener mit (teilweiser) PV-Integration. Analog ergeben sich die Substitutionseffekte der laufenden Kosten.

Diese Differenzen stellen die vermiedenen Kosten konventioneller Baumaterialien dar und können von den Installationskosten und den laufenden Kosten der PV-Anlage abgezogen werden. Damit werden die Kapitalwerte und Stromgestehungskosten beeinflusst. Mit steigendem Substitutionsgrad erhöht sich die relative Vorteilhaftigkeit des ausgewählten GIPV-Szenarios.

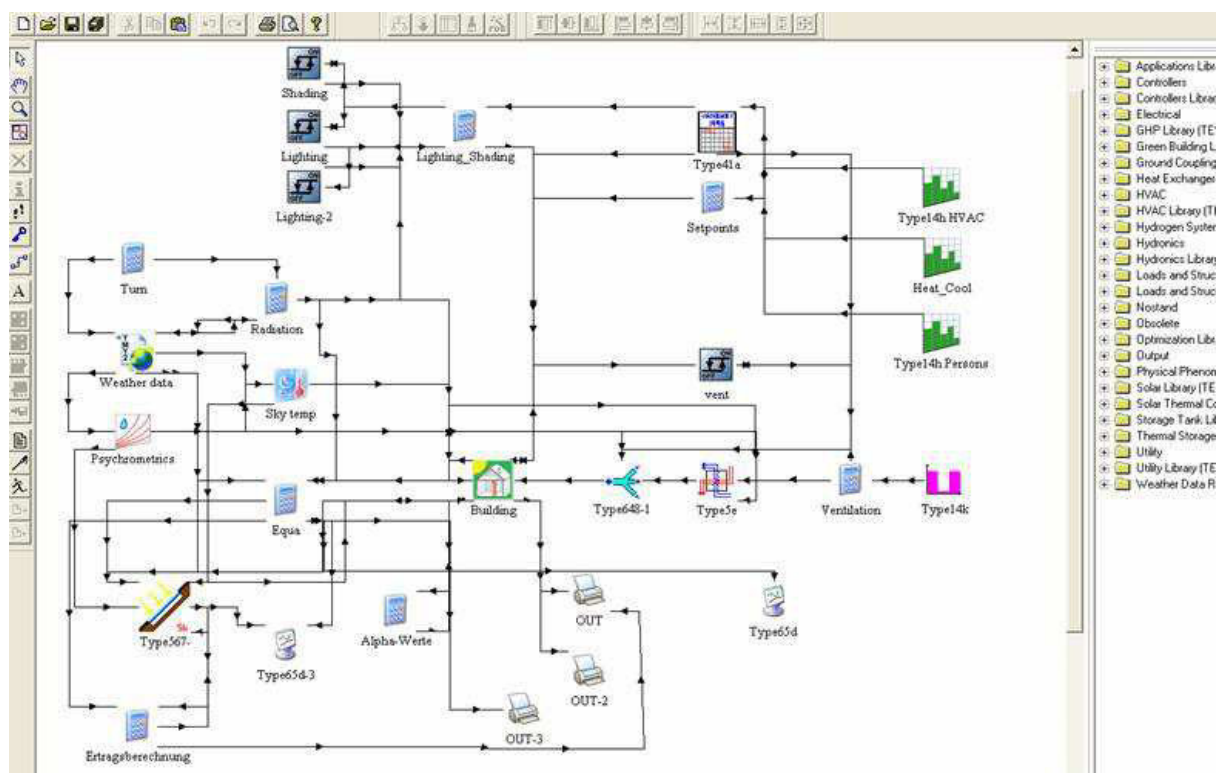
Für das bauphysikalische Modell werden mittels Gebäudesimulation folgende Parameter ermittelt:

- Kühlbedarf des GIPV-Szenarios in kWh/Jahr
- Heizbedarf des GIPV-Szenarios in kWh/Jahr
- PV-Ertrag des GIPV-Szenarios in kWh/Jahr
- Kühlbedarf des Referenzszenarios in kWh/Jahr
- Heizbedarf des Referenzszenarios in kWh/Jahr
- maximal benötigte Kühlleistung des Referenzszenarios in kW
- maximal benötigte Heizleistung des Referenzszenarios in kW
- maximal benötigte Kühlleistung des GIPV-Szenarios in kW
- maximal benötigte Heizleistung des GIPV-Szenarios in kW

Die (thermischen) Gebäudesimulationen erfolgten mit dem Programmpaket TRNSYS 17. Das Gebäudemodell wurde mit Google SketchUP und dem TRNSYS 3D PlugIn Transsolar erstellt.

Bei allen Simulationen wurde „ideales“ Heizen und Kühlen vorausgesetzt. Das bedeutet, dass Heizen und Kühlen mit unendlicher Momentanleistung erfolgt. In der Realität existiert allerdings eine maximale installierte Heiz- und Kühlleistung. Die oberen 5 % der Leistungsverteilung werden bei der Dimensionierung des Heiz- und Kühlbedarfs nicht berücksichtigt, um zu einer Abschätzung der zu installierenden Leistung zu kommen.

Einen Überblick über das für alle Szenarien verwendete Simulationsmodell in TRNSYS gibt Abbildung 2.

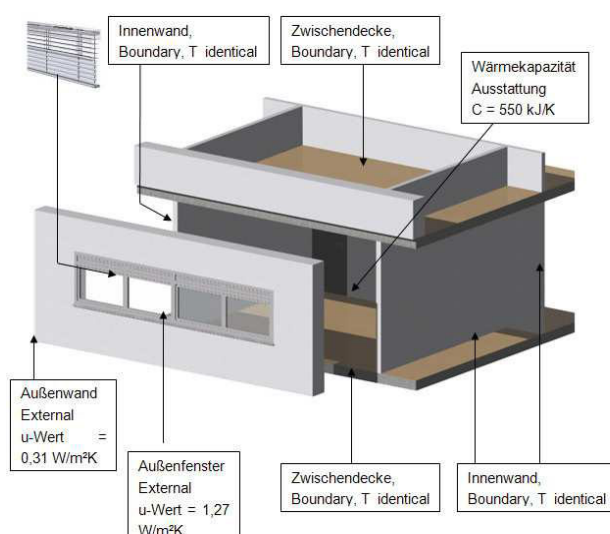


**Abbildung 2:** Grafische Implementierung des Gebäudemodells für alle simulierten Szenarien in TRNSYS

In TRNSYS 17 wurde ein neues Modul für die Shading Matrix zur Berechnung der Verschattungseffekte eingeführt. Die Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades der verwendeten Solarzellen wurde berücksichtigt.

#### Bürozelle:

Die Nutzfläche der Bürozelle beträgt  $20 \text{ m}^2$  ( $5 \times 4 \text{ m}^2$ ) bei einer Raumhöhe von  $2,7 \text{ m}$ . Daraus ergibt sich ein Raumvolumen von  $54 \text{ m}^3$ . Die simulierte Bürozelle ist in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3:** Simulierte Bürozeile

Alle Raumumschließungsflächen außer der untersuchten Außenwand, d.h. Innenwände, Decke und Fußboden sind adiabatisch und in allen Szenarien identisch. Die Varianten unterscheiden sich im Aufbau dieser untersuchten Außenwand.

Die aktive Speichermasse der Raumausstattung (Möbel, EDV-Equipment, Ordner, etc.) beträgt 550 kJ/K. Die Nutzungszeiten und Solltemperaturen der Bürozeile sind in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1:** Angenommene Nutzungszeiten und Solltemperaturen der simulierten Bürozeile

	Raumnutzungszeiten	Temp. Winter	Temp. Sommer	Anzahl Personen
Vormittag	08:00-12:00	22	26	2
Mittagspause	12:00-13:00	18	32	1
Nachmittag	13:00-17:00	22	26	2

Die folgenden internen Lasten sind in allen Szenarien identisch:

- Personen: 200 W (2 Personen)
- EDV: 300 W
- Beleuchtung: 85 W.

Es wurde eine mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung modelliert. Diese wird in Abhängigkeit des Zeitprofils und der Personenbelegung gesteuert. Der Luftvolumenstrom beträgt 30 m³/h pro Person, insgesamt also 60 m³/h (Luftwechsel = 1,1 h⁻¹).

Die Beleuchtung und Verschattung wird durch externe Jalousien in Abhängigkeit der Strahlungsintensität  $L$  auf die Fassade geregelt. Die Regelung erfolgt mit folgender Hysterese:

- Beleuchtung „Ein“, wenn  $L \leq 150 \text{ W/m}^2$
- Beleuchtung „Aus“, wenn  $L \geq 250 \text{ W/m}^2$
- Verschattung „Ein“, wenn  $L \geq 350 \text{ W/m}^2$
- Verschattung „Aus“, wenn  $L \leq 250 \text{ W/m}^2$

Der Verschattungsgrad beträgt 70 %.

Folgende Varianten der Gebäudehülle wurden simuliert:

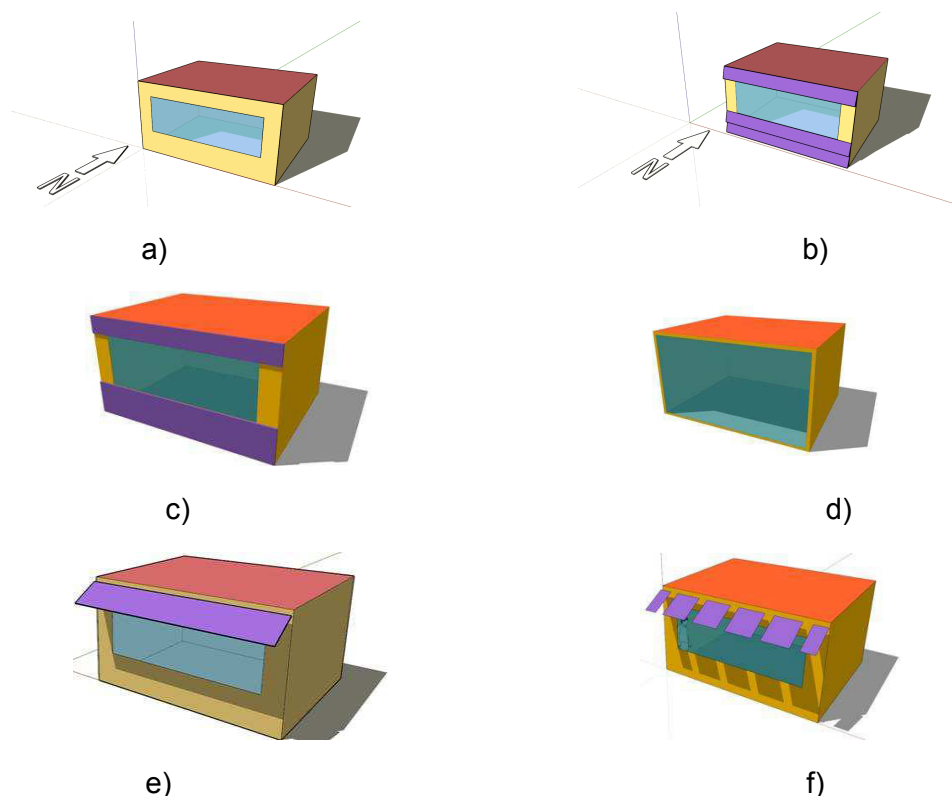
- Konventionelle Fassade
- Kaltfassade mit 75° Neigung
- Kaltfassade mit 90° Neigung
- Warmfassade, opak
- Warmfassade, transparent, 2-Scheibenverglasung
- Warmfassade, transparent, 3-Scheibenverglasung
- Beschattungssegel, opak
- Beschattungssegel, transparent

Beispiele der simulierten Varianten sind in Abbildung 4 dargestellt.

Die Wandaufbauten der konventionellen Fassade, siehe Abbildung 4 a), wurden an den jeweiligen Standort angepasst, da sich die gewählten Standorte signifikant in den klimatischen Gegebenheiten unterscheiden. Durch Hinzufügen von PV-Elementen an die konventionelle Fassade entsteht die PV-Fassade mit unterschiedlichen Neigungsgraden (75° und 90°), siehe Abbildung 4 b). Bei der opaken Wandfassade, siehe Abbildung 4 c), wurde eine Pfosten-Riegel-Konstruktion angenommen. Der Wand- und Fensteraufbau ist gleich der konventionellen Fassade. Die semitransparente Warmfassade, siehe Abbildung 4 d), ist ebenfalls eine Pfosten-Riegel-Konstruktion. Der Transparenzgrad wird über den Anteil der Pfosten an der Gesamtfläche modelliert. Am Standort Graz<sup>1</sup> wurde eine 2-Scheiben- und 2-Scheibenverglasung simuliert, während am Standort Madrid nur eine 2-Scheibenverglasung betrachtet wurde. Das opake Beschattungssegel, dargestellt in Abbildung 4 e), sichert eine Vollbeschattung ab einem Sonnenwinkel größer als 60°. Die Umsetzung der Semitransparenz im 3-D Modell erfolgt durch Einfügen von Lücken zwischen den PV-Elementen des Beschattungssegels, siehe Abbildung 4 f). Als Fassadenvariante für die Beschattungssegel wurde die am jeweiligen Standort verwendete konventionelle Fassade gewählt. Der Abstand der PV-Module zur Außenmauer beträgt 10 cm.

---

<sup>1</sup> Die Standorte Graz und Madrid wurden beispielhaft für Mittel- und Südeuropa gewählt um die Auswirkungen von GIPV in unterschiedlichen Klimazonen zu studieren. Für Graz sprach auch das vorhandene Datenmaterial aus einem Vorprojekt.



**Abbildung 4:** Simulierte Varianten: a) konventionelle Integration, b) PV-Fassade c) opake Warmfassade d) transparente Warmfassade e) opakes Beschattungssegel, f) transparentes Beschattungssegel

## 2.3 Programmierung und Design

Die Arbeiten am Design und an der Programmierung wurden gestartet, nachdem eine stabile Excel-Version des Wirtschaftlichkeitsrechners verfügbar und die Konzeption der Web-Applikation abgeschlossen waren.

Die Umsetzung des Wirtschaftlichkeitsrechners erfolgte, analog zum Redaktionssystem, auf Basis der Programmiersprache PHP und einer MySQL-Datenbank.

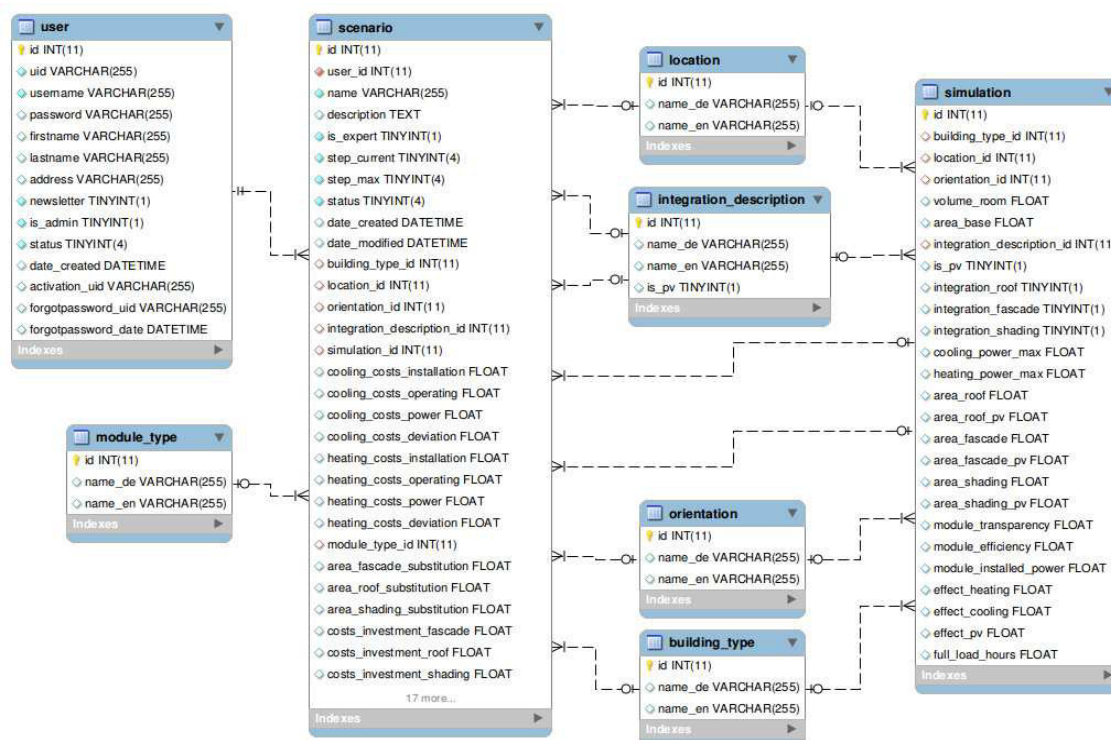
Für die Umsetzung selbst wurden in einem ersten Schritt verschiedene PHP Entwicklungs-Frameworks (primär CakePHP und Zend) im Hinblick auf ihre Eignung zur Umsetzung einer barrierefrei gestalteten Web-Applikation evaluiert. Da zu erwarten war, dass der Einsatz der untersuchten Frameworks mehr Overhead als Nutzen mit sich bringen würde, wurde auf den Einsatz eines solchen Frameworks verzichtet.

Es wurde daher eine eigene Applikation entwickelt, die im Wesentlichen folgende Kernaufgaben erfüllt:

- Benutzerverwaltung: Gast-Zugang, registrieren, anmelden
- Verwaltung der Berechnungsszenarien: anlegen, ändern, löschen
- Mehrstufige Formulare zur Datenerfassung (Szenario-Wizard)
- Unterstützung von Mehrsprachigkeit: zumindest deutsch und englisch
- Reibungslose Integration in die bestehende Website

Zur Speicherung der für die Szenarioberechnung notwendigen Daten wurde das in Abbildung 5 gezeigte Datenmodell entwickelt.





**Abbildung 5:** Datenmodell des Wirtschaftlichkeitsrechners

Auf Basis dieses Datenmodells und der in der Konzeptionsphase definierten Abläufe wurde die Web-Applikation in moderner objektorientierter Programmierung umgesetzt. Dabei können die BenutzerInnen ihre Eingaben komfortabel über den in sieben Schritte unterteilten Szenario-Wizard tätigen:

- Schritt 1: Erstellen eines neuen Szenarios
- Schritt 2: Gebäude- und Szenarioauswahl
- Schritt 3: Integrationsart
- Schritt 4: Integrationsparameter
- Schritt 5: Kosten der GIPV- und der Standardlösung
- Schritt 6: Ökonomische Parameter
- Schritt 7: Ausgabe der Berechnungsergebnisse

In der Ergebnisansicht werden zuerst die wichtigsten Informationen in kompakter Form ausgegeben. Die den Ergebnissen zugrunde liegenden Berechnungsdetails können in weiterer Folge eingeblendet werden. Die Überprüfung der durchgeführten Berechnungen erfolgte an Hand des Excel-Tools.

Die Benutzerfreundlichkeit des Systems wurde dahingehend optimiert, dass einerseits bei Fehleingaben frühzeitig entsprechende Rückmeldungen angezeigt werden um Eingabefehler frühzeitig zu vermeiden und andererseits umfangreiche Kontexthilfen angeboten werden um die Funktionsweise des Wirtschaftlichkeitsrechners bestmöglich zu kommunizieren. Zu diesem Zweck wird ein von WIENFLUSS entwickeltes und als Open-Source veröffentlichtes Formular-Framework eingesetzt. Weitere Informationen dazu finden sich unter [wienfluss.net/form-framework](http://wienfluss.net/form-framework).

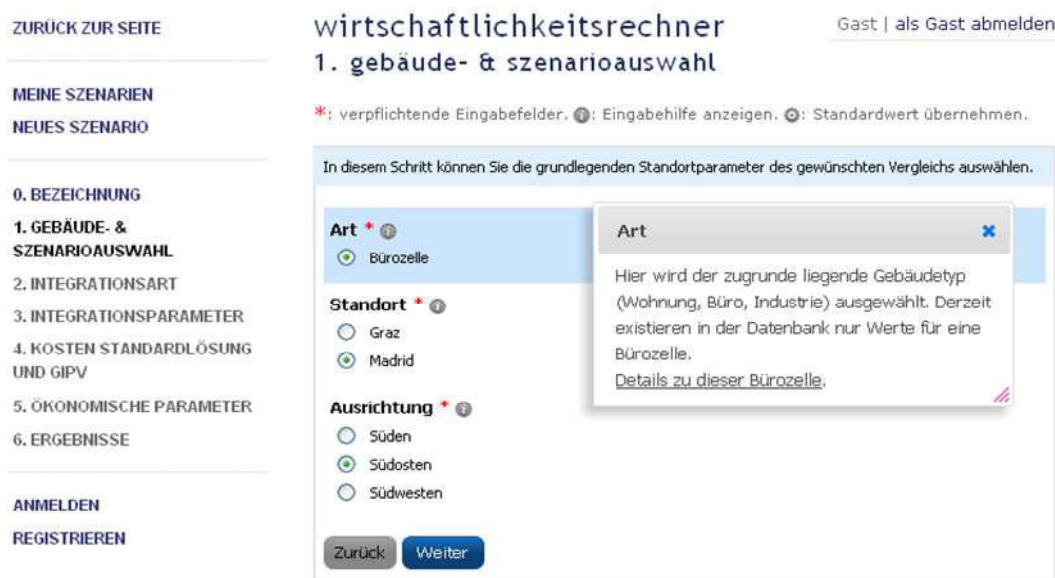
Das Webinterface muss einfach und intuitiv gestaltet sein. In wenigen Schritten sollen Berechnungsergebnisse des ausgewählten Szenarios vorliegen. Für alle vom Benutzer einzugebenden Werte existieren Defaultwerte im System. Aufgrund der Berechnungsmethodik wurde auf eine



Unterscheidung in Express- und Expertenmodus verzichtet. Ohne weitere Eingaben werden die Standardwerte (im System) hinterlegt. Eine manuelle Eingabe überschreibt den Standardwert. Der Standardwert kann jedoch weiterhin gesehen bzw. wieder übernommen werden.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Eingabemaske für die Parameter des Wirtschaftlichkeitsrechners zur Gebäude- und Szenarioauswahl. Durch Anklicken der Online-Hilfe können Informationen zu jedem Parameter eingeblendet werden, hier beispielhaft für den Parameter „Art“.

Die Eingabe der ökonomischen Parameter erfolgt in der Maske, die in Abbildung 7 dargestellt ist. Die allgemeinen Parameter sind die Laufzeit und der Zinssatz und der Einspeisetarif mitsamt seiner jährlichen Änderung. Die spezifischen Parameter sind die Kosten für Heizen und Kühlen.



**wirtschaftlichkeitsrechner** Gast | als Gast abmelden

**1. gebäude- & szenarioauswahl**

\*: verpflichtende Eingabefelder, ⓘ: Eingabehilfe anzeigen, Ⓢ: Standardwert übernehmen.

In diesem Schritt können Sie die grundlegenden Standortparameter des gewünschten Vergleichs auswählen.

**Art** \* ⓘ

☒ Bürozeile

**Standort** \* ⓘ

☐ Graz

☒ Madrid

**Ausrichtung** \* ⓘ

☐ Süden

☒ Südosten

☐ Südwesten

Zurück Weiter

**Art** ⓘ

Hier wird der zugrunde liegende Gebäudetyp (Wohnung, Büro, Industrie) ausgewählt. Derzeit existieren in der Datenbank nur Werte für eine Bürozeile.

[Details zu dieser Bürozeile.](#)

**Abbildung 6:** Screenshot der Parametereingabe für den Wirtschaftlichkeitsrechner, Gebäude- und Szenarioauswahl

ZURÜCK ZUR SEITE

MEINE SZENARIEN  
NEUES SZENARIO

0. BEZEICHNUNG

1. GEBÄUDE- & SZENARIOAUSSWAHL

2. INTEGRATIONSART

3. INTEGRATIONSPARAMETER

4. KOSTEN  
STANDARDLÖSUNG UND GIPV

→ 5. ÖKONOMISCHE PARAMETER

6. ERGEBNISSE

ANMELDEN  
REGISTRIEREN

## wirtschaftlichkeitsrechner

Gast | als Gast abmelden

### 5. ökonomische parameter

\*: verpflichtende Eingabefelder. ⓘ: Eingabehilfe anzeigen. Ⓢ: Standardwert übernehmen.

In diesem Schritt bestimmen Sie die der Wirtschaftlichkeitsberechnung zugrunde liegenden Parameter. Diese gelten sowohl für die Referenzlösung als auch für die ausgewählte GIPV-Variante.

#### Ökonomische Parameter

**Laufzeit**

25,00

Laufzeit [Jahre] \* ⓘ

4,00

Zinssatz [%] \* ⓘ

**Photovoltaik Anlage**

0,38

Einspeisetarif [EUR/kWh] \* ⓘ

0,00

jährliche Änderung [%/s] \* ⓘ

Hier können Sie die Investitions- und Betriebskosten für Heizung und Kühlung auswählen. Diese sind abhängig von der installierten Heiz- und Kühlleistung, die in der Gebäudesimulation ermittelt wird, um das gewünschte Raumklima zu erreichen. Darüber hinaus definieren Sie die Energiekosten für Heizung und Kühlung, sowie die jährliche Änderung dieser Kosten.

#### Kühlung & Heizung

##### Kühlkosten

1.000,00

Investitionskosten [EUR/kW] \* ⓘ

10,00

Betriebskosten [EUR/kW] \* ⓘ

0,10

Energiekosten [EUR/kWh] \* ⓘ

0,00

jährliche Änderung [%] \* ⓘ

##### Heizkosten

1.000,00

Investitionskosten [EUR/kW] \* ⓘ

10,00

Betriebskosten [EUR/kW] \* ⓘ

0,10

Energiekosten [EUR/kWh] \* ⓘ

0,00

jährliche Änderung [%] \* ⓘ

**Abbildung 7:** Screenshot der Parametereingabe für den Wirtschaftlichkeitsrechner, ökonomische Parameter

Folgende Funktionalitäten sind im Wirtschaftlichkeitsrechner implementiert:

- Grundfunktionalität,
- Benutzerverwaltung,
- Verwaltung der Szenarien und
- Auswertung der Szenarien

Zur Grundfunktionalität gehören Kurzinfos zu jedem Punkt (kontextabhängige Online-Hilfe). Zu wesentlichen Inhalten wird eine Verlinkung zu den Inhalten der Webseite angeboten. In jedem Schritt ist ein Vor- und Zurücknavigieren möglich. Beim Speichern erfolgt ein Plausibilitätscheck der Benutzereingaben. Sofern verschiedene Einheiten eingegeben werden können, erfolgt eine automatische Umrechnung.

Die Benutzerverwaltung dient zum Anlegen eines neuen Nutzers (Stammdatenerfassung) einer Passwort-Erinnerungsfunktion sowie einer Login/Logout-Funktion auf Basis von Cookies. Ebenso werden Administratorenrechte definiert.

Im der Szenarienverwaltung können neue Szenarien vom registrierten Benutzer angelegt, gespeichert, bearbeitet oder gelöscht werden. Eine Fortschritts- und Statusanzeige wurde ebenfalls implementiert.

In der Szenarienauswertung, siehe Abbildung 8, werden die Berechnungsergebnisse übersichtlich und prägnant zusammengefasst und dargestellt. Dazu dienen unter anderem eine Ampel, die die Stromgestehungskosten mit dem Einspeisetarif vergleicht sowie eine Balkengrafik, die einen schnellen Überblick über die Auswirkungen von Substitutions- und Synergieeffekten gibt.

Weitere Informationen (Eingaben, Standardwerte, Hintergrundinformationen) können vom Benutzer eingeblendet werden. Es erfolgt ebenfalls eine druckfähige Zusammenstellung über Druck-Stylesheets (Print-CSS). Ein Beispiel ist in Abbildung 8 dargestellt.

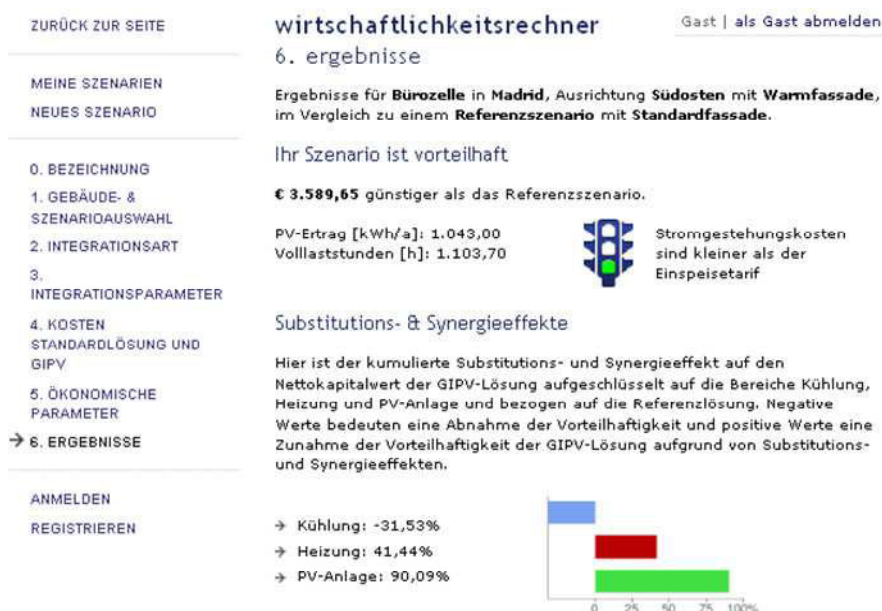
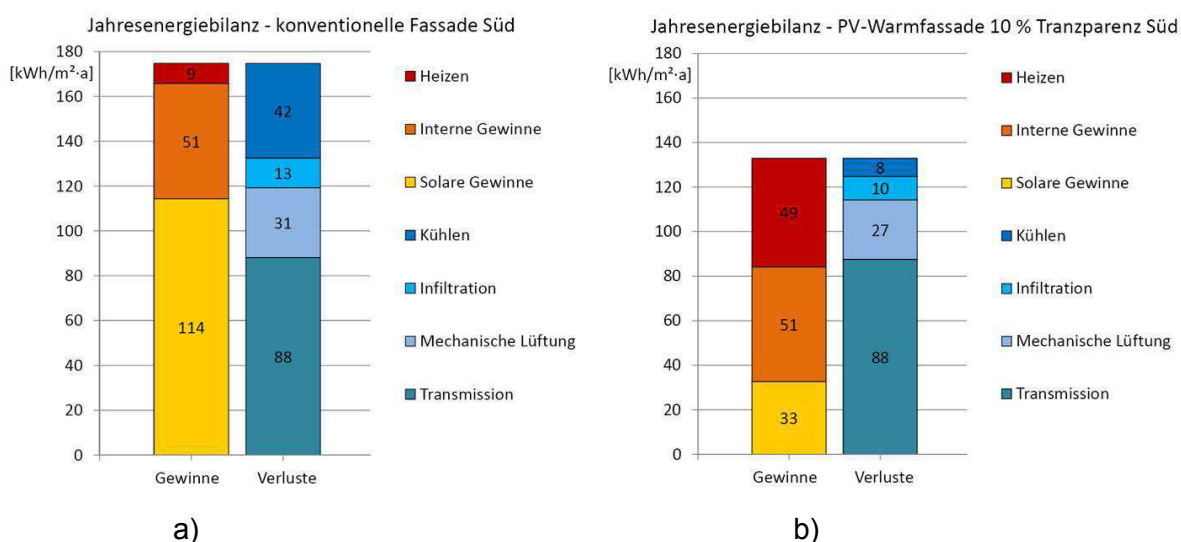


Abbildung 8: Screenshot der Ergebnisseite des Wirtschaftlichkeitsrechners

## 2.4 Ausgewählte Ergebnisse

Es wurde ein völlig neuer Ansatz in der Wirtschaftlichkeitsberechnung gefunden. Die Trennung von technischer und ökonomischer Simulation ermöglicht eine transparente und einfache Auswertung der Ergebnisse.

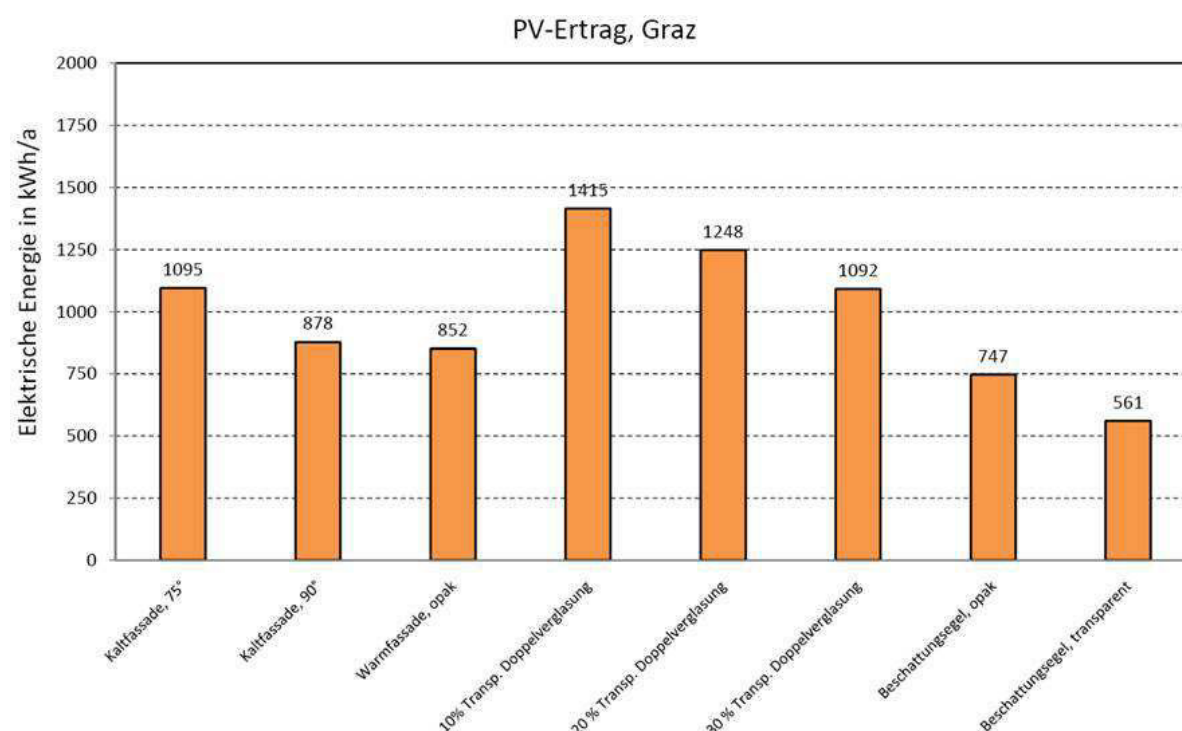
Die Jahresenergiebilanzen bezogen auf die Nutzfläche des Raumes geben Einblick in die Aufteilung der Heiz- und Kühlanteile. In Abbildung 9 ist beispielhaft die Jahresenergiebilanz für den Standort Graz mit südlicher Ausrichtung dargestellt.



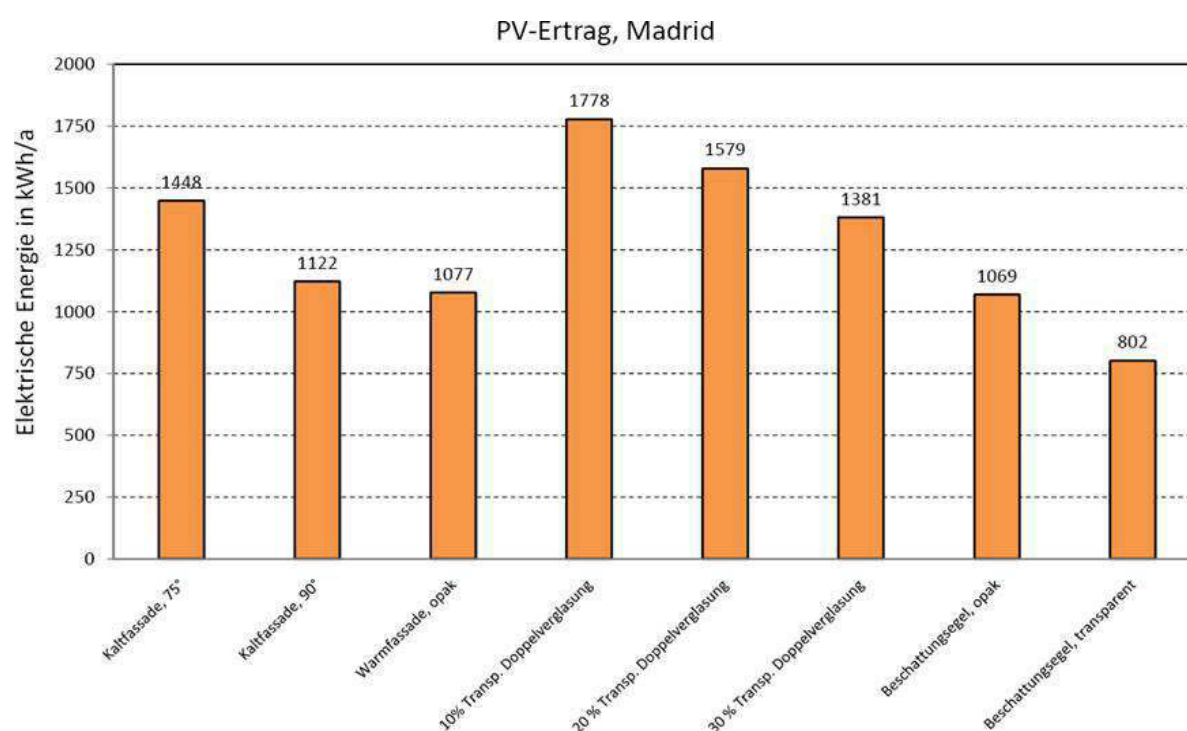
**Abbildung 9:** Jahresenergiebilanz für den Standort Graz mit Ausrichtung Süd. a) konventionelle Fassade b) PV Warmfassade mit 10 % Transparenzgrad

Im Vergleich zur konventionellen Fassade ist der Kühlbedarf bei der PV-Warmfassade mit 10 % Transparenzgrad um ca. 80 % gesenkt. Gleichzeitig würde der Heizbedarf gemäß dieser Simulation um das mehr als Fünffache steigen. Dies zeigt, dass sich sowohl positive als auch negative Synergieeffekte ergeben können. Allerdings kann der zusätzliche Heizbedarf durch eine verbesserte Wärmedämmung reduziert werden, wodurch die negativen Synergieeffekte deutlich reduziert werden können.

Die jährlichen PV-Erträge an beiden Standorten zeigen einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf. Im Schnitt beträgt der Mehrertrag in Madrid für die 90°-Varianten der Fassade ca. 26 %. Bei 75° Neigung steigt der Mehrertrag auf 32 %, und bei den Varianten mit Beschattungssegel auf ca. 43 %. Dies hat seine Ursache in den höheren Anteilen an direkter Strahlung am Standort Madrid. Eine Übersicht über die PV-Erträge an den Standorten Graz und Madrid mit südlicher Ausrichtung zeigt Abbildung 10.



a)

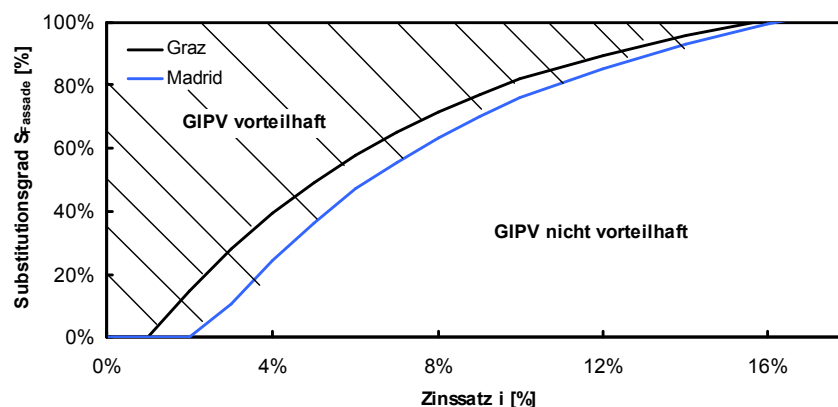


b)

**Abbildung 10:** Übersicht über die jährlichen PV-Erträge bei südlicher Ausrichtung a) Graz b) Madrid

Der gewählte Zinssatz hat einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Dies verdeutlicht anschaulich Abbildung 11. In dieser Abbildung ist der Substitutionsgrad der Fassade als Funktion des

Zinssatzes für die Wirtschaftlichkeitsgrenze für die Standorte Madrid und Graz dargestellt. Für Projekte oberhalb der Wirtschaftlichkeitsgrenze ist das GIPV-Szenario vorteilhaft. Ohne Berücksichtigung des zeitlichen Horizontes ( $i = 0\%$ ) ergäbe sich ein negativer Substitutionsgrad, d.h. die Kosten für die PV-Fassade könnten niedriger als die Kosten für die konventionelle Fassade sein. Allerdings ist per Definition der Wertebereich des Substitutionsgrades auf Werte zwischen 0% und 100 % begrenzt. Für sehr hohe Zinssätze unterscheiden sich die Standorte hinsichtlich der Wirtschaftlichkeitsgrenze kaum.



**Abbildung 11:** Abhängigkeit des Substitutionsgrades  $S_{\text{Fassade}}$  vom Zinssatz  $i$  für die Wirtschaftlichkeitsgrenze der GIPV-Anlage. Spezifischer Investitionspreis für Standard und Referenz 400 €/m<sup>2</sup>, Kaltfassade 90° mit Ausrichtung Süden

## 2.5 Übersetzungen

Die zu übersetzenden Texte wurden ausgewählt und redigiert. Weiters erfolgte eine Trennung der Übersetzung der Inhalte der Webseite von der Übersetzung des Wirtschaftlichkeitsrechners.

Anschließend wurde die Übersetzung bei einem Übersetzungsbüro in Auftrag gegeben und durchgeführt. Alle textlichen und bildlichen Inhalte wurden ins Englische übertragen und mittels CMS-Systems online gestellt.

Die englische Version der Webseite wird durch Mausklick auf „English Version“ aktiviert.

### 3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das ökonomische Potential der GIPV ist ohne Frage außerordentlich hoch. Aus diesem Grund sind gerade die ökonomische Transparenz und die Darstellung der Wirtschaftlichkeit der GIPV wichtig für eine schnelle Verbreitung dieser Technologie. Vorliegendes Projekt hat dazu einen Beitrag erbracht, jedoch sind vielfältige weitere Anstrengungen nötig, um der GIPV zum Durchbruch zu verhelfen.

Die Bearbeitung dieser Thematik im Projekt ergab ein deutlich verbessertes Verständnis für die Kostenstruktur und die wirtschaftlichen Einflussgrößen der GIPV. Außerdem konnte der Zusammenhang zwischen technischen Größen und der Wirtschaftlichkeit ausführlich studiert und ein Gefühl für die Auswirkungen von Parametervariationen auf die Wirtschaftlichkeit entwickelt werden.

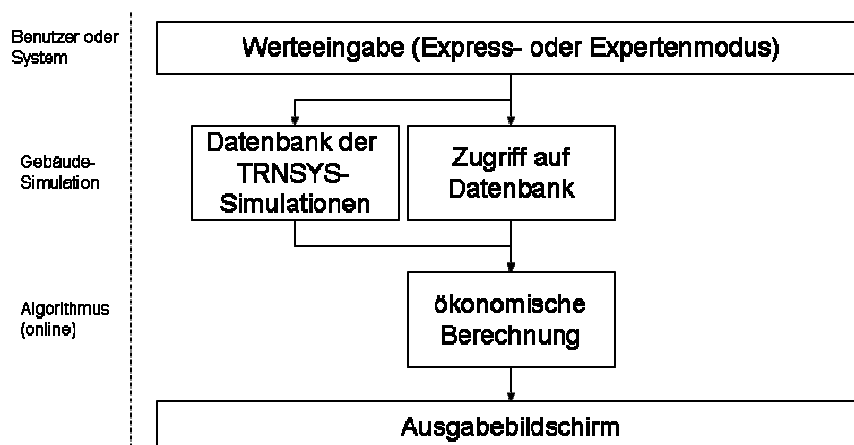
Die Projektergebnisse und insbesondere der erarbeitete Wirtschaftlichkeitsrechner bilden einen Baustein für die potentiellen Anwender von GIPV zum besseren Verständnis dieser immer noch neuen Technologie. Weiters können die Ergebnisse bezüglich Konzept und Modell für die Entwickler entsprechender Planungstools interessant sein. Ziel muss die Integration der Wirtschaftlichkeitsanalyse in die Planungstools sein. Das Tool kann selbstverständlich auch Entscheidungsprozesse in Wirtschaft und Politik unterstützen und dient nicht zuletzt auch der besseren Information von interessierten Anwendern.

Oberstes Ziel bei der Konzeption des Wirtschaftlichkeitsrechners war es, die Bedienung einfach, übersichtlich und möglichst intuitiv zu gestalten. Die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit erfolgt anhand eines Vergleichs mit einer konventionellen Gebäudehülle. Dies ist notwendig, da zwischen absoluter und relativer Vorteilhaftigkeit unterschieden werden muss.

Die physikalischen Größen (PV-Ertrag, Heiz- und Kühlbedarf) werden mittels einer Gebäudesimulation errechnet. Dies geschieht aufgrund der Komplexität der Vorgänge offline mit dem etablierten Simulationswerkzeug TRNSYS 17. Die erhaltenen Ergebnisse werden in Form einer Datenbank im Online-Tool verfügbar gemacht. Die ökonomische Berechnung fußt auf physikalischen Größen, als auch auf anderen (externen) ökonomischen Parametern (Zinssatz, Laufzeit der Anlage, etc.), die in einem mathematischen Modell verknüpft werden. Die wirtschaftlichen Größen, wie Kapitalwerte, Stromgestehungskosten und Substitutions- und Synergieeffekte werden online mittels eines implementierten Algorithmus ermittelt.

Das Konzept des Wirtschaftlichkeitsrechners ist in Abbildung 12 dargestellt.





**Abbildung 12:** Konzept des Wirtschaftlichkeitsrechners

Die Vorgehensweise zur Bewertung einer GIPV-Lösung im Vergleich zu einer Referenzlösung (konventionelle Ausführung ohne PV) ist folgendermaßen:

1. Berechnung der Kapitalwerte des Referenzsystems und GIPV-Systems ohne Berücksichtigung von Substitutions- und Synergieeffekten.
2. Berechnung des Kapitalwertes für GIPV mit Berücksichtigung von Substitutions- und Synergieeffekten in Bezug auf das Referenzsystem.
3. Vergleich der Ergebnisse.

Das Kriterium für die wirtschaftliche Bewertung der GIPV-Lösung kann folgendermaßen formuliert werden:

Die GIPV-Lösung ist vorteilhaft im Vergleich zur Referenzlösung, wenn der Nettokapitalwert von GIPV unter Berücksichtigung von Substitutions- und Synergieeffekten *größer* als der Nettokapitalwert des Referenzszenarios ist.

Es wurde sowohl die physikalische als auch die ökonomische Modellierung erarbeitet. Die ökonomischen Sachverhalte wurden in Form von Input/Output-Beziehungen modelliert und zu Test- und Verifikationszwecken in Excel umgesetzt. Dieses Excel-Tool enthält eine Aufteilung in die Blöcke Eingabe, Berechnung und Ausgabe. Das Gebäudemodell und die zu simulierenden Varianten wurden definiert. Erste Ergebnisse unterschiedlicher Einbauvarianten an zwei Standorten liegen bereits vor und können in die Datenbasis übernommen werden.



## 4 Ausblick und Empfehlungen

Die in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten können als wichtige Ausgangsbasis für eine weiterführende Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von GIPV angesehen werden. Ziel muss es sein, ein ausgefeiltes Tool-Kit für eine Analyse zu entwickeln. Dieses Tool-Kit enthält technische Simulationen, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, einen Vergleich von Baumaterialien, eine Herstellerdatenbank um eine ganzheitliche Sicht auf die GIPV zu erhalten. Ein Beispiel für eine Weiterentwicklung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wäre die Durchführung von Sensitivitätsanalysen. Das Tool-Kit sollte in eine Planungssoftware integrierbar sein.

Die Akzeptanz von GIPV kann auch durch ein verstärktes Bewusstsein innerhalb der Architektenbranche gesteigert werden. Die Integration von Wirtschaftlichkeitsanalysen in entsprechende Planungstools ist daher, wie eben bereits angedeutet, notwendig.

Die aktuelle Diskussion über erneuerbare Energien generell und PV bzw. GIPV speziell legt die Durchführung weiterer Projekte zu diesem Thema nahe. Ein großer Schwerpunkt sollte dabei weiterhin auf der transparenten Darstellung der technischen und ökonomischen Vorteile der GIPV liegen, ohne jedoch die Schwierigkeiten zu verschleiern.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] P. Eiffert, Guidelines for the economic evaluation of building-integrated photovoltaic power systems, 2003
- [2] TRNSYS 17, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- [3] Google SketchUp 8, <http://sketchup.google.com/intl/de/>
- [4] TRNSYS3D, Plugin für GoogleSketchUp,  
[http://www.transsolar.com/software/docs/trnsys3d/trnsys3d\\_uebersicht\\_de.htm](http://www.transsolar.com/software/docs/trnsys3d/trnsys3d_uebersicht_de.htm)
- [5] L. Kruschwitz, Investitionsrechnung, München 2009
- [6] Project Appraisal Using Discounted Cash Flow, International Federation of Accountants (IFAC), Juni 2008, [www.ifac.org](http://www.ifac.org)

## IMPRESSUM

### **Verfasser**

HEI Eco Technology GmbH

Dieter Hornbachner  
Ameisgasse 65, 1140 Wien  
Tel.: +43/1/91 21 351-0  
Fax: +43/1/91 21 351-22  
E-Mail: [office@hei.at](mailto:office@hei.at)  
Web: [www.hei.at](http://www.hei.at)

### **Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber**

Klima- und Energiefonds  
Gumpendorfer Straße 5/22  
1060 Wien  
[office@klimafonds.gv.at](mailto:office@klimafonds.gv.at)  
[www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at)

### **Disclaimer**

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

### **Gestaltung des Deckblattes**

ZS communication + art GmbH