

Visualisierung von 3D-Objekten mit automatischer Lokalisierung von Wärmebrücken in der Gebäudeaußenhülle

Klaus Schlender¹, Oleg Abele² und Grit Behrens³

Abstract: Die vorliegende Arbeit hilft beim Verwirklichen der Klimaschutzziele unserer Bundesregierung und trägt dazu bei, sanierungsbedürftige Gebäuden zu erkennen. Hierzu werden zunächst Luftbildaufnahmen als Wärme- und Echtbilder eines Gebäudes von einem Thermokopter erstellt, auf denen dann nachfolgend mittels eines Erkennungsalgorithmus die Wärmebrücken visualisiert werden. Die erfassten Wärmebrücken kennzeichnen potenziell sanierungsbedürftige Schwachstellen in Außenfassaden. Die Luftbildaufnahmen werden mittels Image-Based Rendering Software in 3D-Modelle verarbeitet, die in einer WebGL 3D-Landschaft dargestellt und begutachtet werden können.

Keywords: Klimaschutz, Sanierung, Energiebedarf, Gebäude, 3D-Thermokopter, Wärmebrücken, 3D-Rekonstruktion, Visualisierung, WebGL, Image-Based, Rendering

1 Einleitung

Die Bundesregierung hat sich ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt: Bis 2020 soll der Treibhausgasausstoß um 40 Prozent unter den Stand von 1990 sinken. Der Gebäudebereich ist dabei von besonderer Bedeutung, da dieser in der EU und in Deutschland mit jeweils rund 40 Prozent des Endenergiebedarfs den größten Verbrauchssektor darstellt. Die hier beschriebenen Arbeiten sind mit unseren Partnern aus dem Sanierungsmanagement der Bielefelder Sennestadt abgestimmt worden [En17]. Die Einwohner der stark sanierungsbedürftigen Bestandsbauten in der Sennestadt sollen durch eine Visualisierung von Wärmebrücken in ihren Wohngebäudefassaden auf die Notwendigkeit einer Sanierung aufmerksam gemacht werden.

¹ FH Bielefeld University of Applied Science, FB Technik, Artilleriestraße 9, 32427 Minden, klaus.schlender@fh-bielefeld.de

² FH Bielefeld University of Applied Science, FB Technik, Artilleriestraße 9, 32427 Minden, oleg.abele@fh-bielefeld.de

³ FH Bielefeld University of Applied Science, FB Technik, Artilleriestraße 9, 32427 Minden, grit.behrens@fh-bielefeld.de

2 Ziel der Arbeit

In diesem Projekt wurde ein Thermokopter entwickelt, der 3D-Modelle von Gebäuden der sanierungsbedürftigen Sennestadt darstellt. Der Kopter ist eine UAV-Eigenentwicklung mit vier Rotorblättern und Navigationssystem, die mit einer Tageslicht- und einer Thermographiekamera ausgerüstet ist. Beim Abfliegen der Fassaden kommen beide Kameras abgestimmt zum Einsatz, so dass aus dem gewonnenen Bildmaterial gleichzeitig 3D-Modelle als Tageslicht- und als Wärmemodell erzeugt werden können.

Es wurde weiterhin ein Algorithmus entwickelt, der die Wärmebrücken im Bildmaterial automatisch lokalisiert. Wichtiges Projektziel war eine leicht verständliche und überzeugende Darstellung der Analyseergebnisse. Dazu wurde ein hybrider Ansatz gewählt, der die Energielecks der Außenwände durch die thermographisch farblich dargestellten Wärmebrücken in das Tageslicht-3D-Modell der Gebäude sehr anschaulich integriert.

Es wurde weiterhin eine Webapplikation erstellt, die die Aufnahme, die Speicherung und die Visualisierung des Datenmaterials realisiert.

3 Herangehensweise

3.1 Lokalisierung von Wärmebrücken in Gebäudeaußenhüllen

Wärmebrücken in Gebäudeaußenwänden kann man in Thermographie-Aufnahmen erkennen. Die Thermokamera speichert die jeweilige Temperatur in der Einheit Grad Celsius pro Pixel in einer Auflösung von 640 x 480 ab. Für die Darstellung werden den Temperaturen skalierte Farbpaletten oder auch Grauwert-Bilder zugeordnet.

Wärmebrücken sind durch zusammenhängende Regionen von Pixeln charakterisiert, die eine höhere Temperatur aufweisen, als die mittlere Temperatur der Fassade. Einen entscheidenden Einfluss auf die Güte der Analyseergebnisse hat ein gut funktionierender Algorithmus zur Bestimmung des jeweiligen Schwellwertes, der die Temperaturdifferenz der Wärmebrücken zur mittleren Fassadentemperatur bestimmt.

3.1.1 Schwellwert und seine Abhängigkeiten

Zur Ermittlung des Schwellwertes wird ein Grauwertbild erstellt, welches höhere Temperaturen den helleren Grauwerten und niedrigere Temperaturen den dunkleren Grauwerten zuordnet. Der Schwellwert wird für jede Aufnahme dynamisch bestimmt und hängt sehr stark von der jeweiligen Beschaffenheit der Thermografie-Aufnahme ab.

Die Schwellwertanalyse wurde anhand vieler verschiedener Thermografieaufnahmen von Gebäudefassaden mit und ohne Wärmebrücken manuell parametrisiert. Die folgenden drei

Abhängigkeiten wurden dabei beobachtet:

1. Der Schwellwert hängt stark von dem Größenverhältnis der dunklen Bereiche zu den hellen ab. Ist das gesamte Bild sehr hell, da z. B. eine Außenwand eines Gebäudes sehr nah aufgenommen wurde, befindet sich der Schwellwert sehr weit unten. Entgegengesetzt gilt bei im Mittel sehr dunklen (kalten) Bildern, dass der Schwellwert bereits sehr hoch beginnt.
2. Die allgemeine Balance des Bildes hat Einfluss auf den Schwellwert. Wenn sehr starke Sprünge in dem Bild vorhanden sind und der Unterschied zwischen dunklen und hellen Bereichen stärker ausfällt, wird der Schwellwert in der Regel in die Höhe getrieben.
3. Außerdem spielt die Diversität der abgebildeten Helligkeiten, also die Spanne der abgebildeten Temperaturen, eine Rolle. Ist diese Spanne sehr groß, so sinkt auch der Schwellwert; ist die Spanne sehr gering steigt er.

3.1.2 Histogramm

Mithilfe eines Histogramms kann die Verteilung der Helligkeiten innerhalb eines Bildes abgebildet werden. Ein Histogramm ist somit, unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten aus 3.1.1, für die Analyse einer Thermografie-Aufnahme unabdingbar. Darüber hinaus hat der Einsatz eines Histogramms große Vorteile für die Laufzeit des Algorithmus. So ist z. B. die Berechnung des durchschnittlichen Grauwertes einer Thermografie-Aufnahme mithilfe einer vorangegangenen Histogrammberechnung in konstanter Zeit durchführbar.

Neben den bereits erwähnten Abhängigkeiten aus 3.1.1 haben sich während der Analyse weitere indirekte Abhängigkeiten ergeben, die das Ergebnis stabilisieren. Hierzu zählt die durchschnittliche Abweichung ausgewählter Schlüsselkriterien vom bereits erwähnten durchschnittlichen Grauwert. Zu den Schlüsselkriterien gehören unter anderem der größte Farbunterschied sowie die durchschnittliche Steigung der Farbkurve.

Die für die Berechnung wichtigste Gesetzmäßigkeit ist jedoch, dass Wärmebrücken sich immer oberhalb des durchschnittlichen Grau-Wertes befinden und somit alle Graustufen unterhalb des durchschnittlichen Grau-Wertes ignoriert werden können, um das Ergebnis nicht unnötig zu verfälschen.

3.1.3 Histogramm Analyse

Mithilfe des Histogramms [Ka13] können die für die Abhängigkeiten aus 3.1.1 und 3.1.2 wichtigen Schlüsselkriterien errechnet werden. Diese sind:

- *max*: Der größte vorkommende Grauwert
- *avg*: Der durchschnittliche Grauwert des gesamten Bildes

- pC : Anzahl der Pixel des Bildes
- $pCRAVG$: Pixelanzahl rechts vom durchschnittlichen Grauwert

Mithilfe der nachfolgenden Formel kann nun eine Pixelanzahl (PA) berechnet werden.

$$(pC / 100) * ((pC / pCRAVG + pC / pC - pCRAVG) / 2) \quad (1)$$

Die errechnete Pixelanzahl spiegelt den gesuchten Schwellwert wieder. Um jedoch den genauen Farbwert zu erhalten, muss die Pixelanzahl ausgehend von *max* solange aufsummiert werden, bis die errechnete Pixelanzahl erreicht ist. Der resultierende Farbwert ist der gesuchte Schwellwert. In Abb. 1 ist ein Beispielhistogramm mit eingezeichnetem Durchschnittswert (blau) und dem errechneten Wärmebrücken-Bereich (rot) zu sehen.

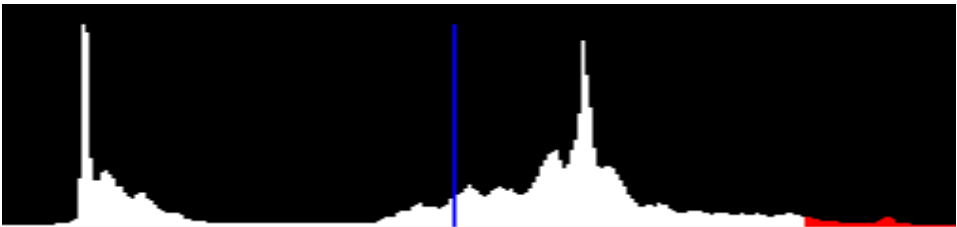


Abb. 1: Beispiel Histogramm mit Durchschnittswert und Wärmebrücken-Bereich⁴

3.1.4 Visuelle Darstellung

Mithilfe des Graustufen-Bildes und des berechneten Schwellenwertes ist es nun möglich, die Wärmebrücken zu extrahieren. Hierfür werden alle Pixel schwarz eingefärbt, die unterhalb des Schwellenwertes liegen. Da die Wärmebrücken auf der originalen Thermografie-Aufnahme eingekreist werden sollen, bietet sich der Einsatz des Canny-Edges Algorithmus [Bi09],[Ra11] an. Dieser extrahiert Kanten an Farbübergängen. Beim halb verarbeiteten Bild bildet der Canny-Edges Algorithmus genau die Umrandung der Wärmebrücken ab. Diese Umrandungen können nun auf das Originalbild übertragen und passend eingefärbt werden (z. B. schwarz). In Abb. 2 ist eine solche Visualisierung zusehen.

⁴ Eigene Darstellung

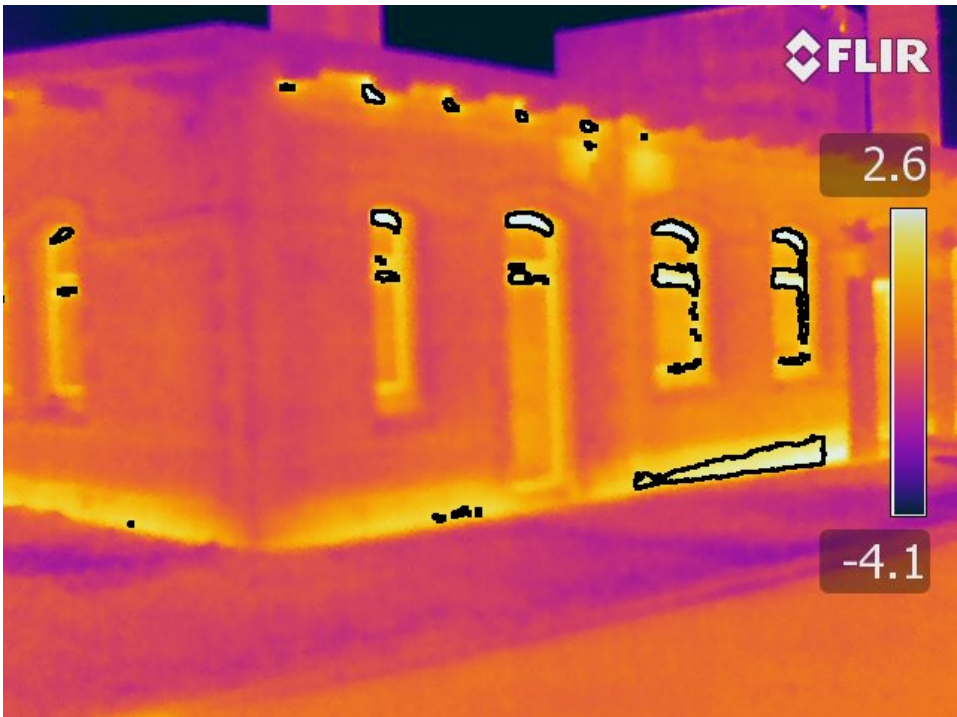


Abb. 2: Themografie-Aufnahme mit automatisch lokalisierten und visualisierten Wärmebrücken⁵

In Abb. 3 ist die hybride Visualisierungs-Variante zu sehen. Hierbei werden die Grauwerte der Wärmebrücken neu eingefärbt und auf der Echtbild-Aufnahme abgebildet. Dies hat den Vorteil, dass der Ort der Wärmebrücke am echten Objekt besser bestimmt werden kann, weil keine Details verloren gehen.

⁵ Eigene Darstellung



Abb. 3: Hybride Visualisierung von automatisch lokalisierten Wärmebrücken auf einer Echtbild-Aufnahme⁶

3.1.5 Wärmebrückenerkennung

Für die in 3.1.3 und 3.1.4 beschriebene Vorgehensweise eignet sich der Einsatz der OpenCV Bibliothek. Die beschriebenen Funktionalitäten, die für die Lokalisierung von Wärmebrücken benötigt werden, sind in großen Teilen bereits in der OpenCV Bibliothek enthalten. So ist die Erstellung eines Histogramms und die Ausführung des Canny-Edge Algorithmus mit wenigen Aufrufen erledigt. [Ga08]

⁶ Eigene Darstellung

Die gesamte Prozedur sieht wie folgt aus:

```
public Mat process(Mat source) {  
    Mat gray = util.ToGray(source);  
    Mat histogram = getHistogram(gray);  
    AnalyzeResult res = analyze(histogram);  
    Mat edges = findEdges(gray, res);  
    return edges;  
}
```

3.2 3D-Mesh-Daten aus Thermografie- und Tageslichtaufnahmen

Fotobasiertes 3D-Scannen ist in seiner Anwendung ein Teilgebiet der Fotogrammetrie. Aus einer großen Anzahl von Bildern wird die dreidimensionale Form eines Objektes bestimmt [Pa96],[Le06]. Die Bilder werden auf ihre Schärfebereiche hin analysiert und anschließend werden Punkte auf mehreren Bildern gefunden, die in einen räumlichen Bezug zueinander gebracht werden. Daraus ergibt sich eine 3D-Punktwolke bzw. eine räumliche Repräsentation vieler gefundener Bilddetails, die als Basis zur Formberechnung des 3D-Modells dient.

Der Oberbegriff der Techniken wird in der Informatik Image-Based Rendering [Sh07],[Zh12] (IBR) genannt und kommt in spezialisierter Software, wie Agisoft Photoscan, Autodesk 123D und Autodesk ReMake zum Einsatz. Mit den Techniken von IBR wird aus 2D-Bildern einer realen Szene ein 3D-Modell erzeugt, indem neue Blickpunkte auf das Modell gerendert werden. Hierbei kann das 3D-Modell texturiert und als konventionelle 3D-Szene repräsentiert werden.

Als Grundlage zur Erstellung des 3D-Modells dienen Fotografieaufnahmen, die mit aufeinander abgestimmten Kameras erstellt werden (s. Abb. 4). Die erzeugten Echtbildaufnahmen werden zunächst aufeinander ausgerichtet und dann zur Berechnung einer dichten Punktwolke verwendet.

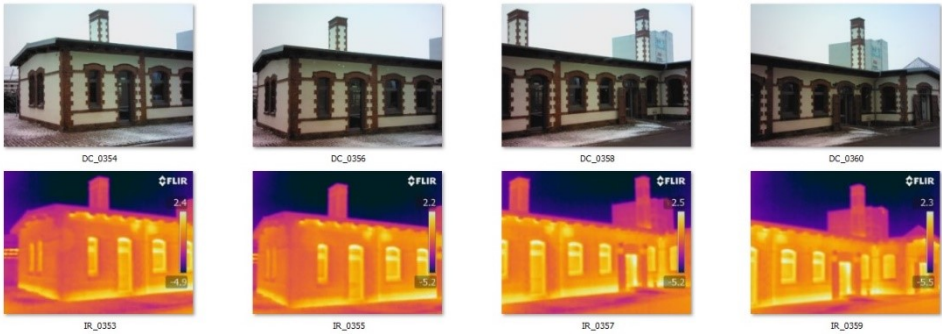


Abb. 4: 2D-Bilder einer realen Szene: Echt- und Wärmebildaufnahmen⁷

Die Punktwolke dient als Grundlage zur Berechnung eines Mesh'es bzw. Modells, auf dessen Basis ein texturiertes 3D-Modell erzeugt wird (siehe auch Abb. 5). Dabei werden zunächst, von links nach rechts gesehen, Echtbildaufnahmen, dann Wärmebildaufnahmen verwendet. Ähnliches geschieht bei den aus Kapitel 3.1 behandelten berechneten Aufnahmen. In der zweiten Reihe sind von links nach rechts 3D-Modelle, Wärmebilder und Hybridbilder zu sehen. Die mit dem Verfahren erzeugten 3D-Modelle bilden eine anschauliche Darstellung von Gebäudefassaden und können in einer 3D-Szene verwendet werden.

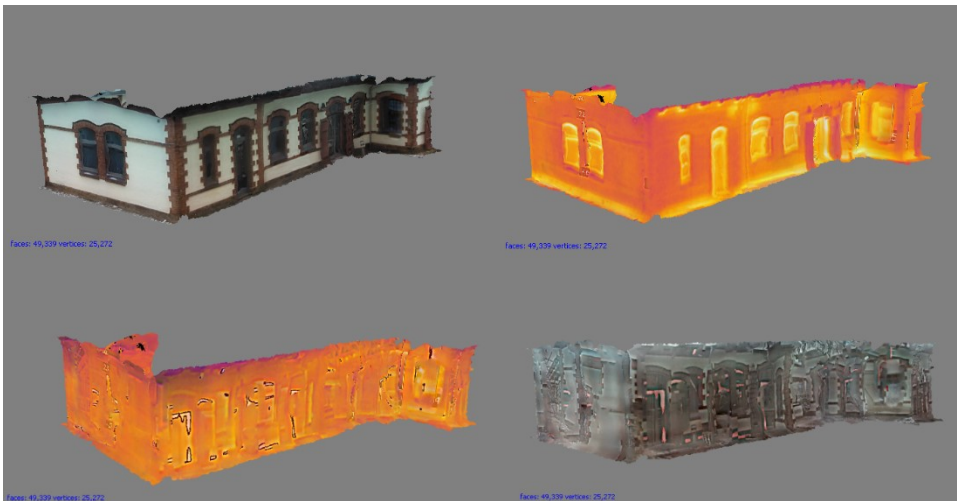


Abb. 5: 3D-Modelle einer konventionellen Szene: Echt- und Wärmebildmodelle⁸

⁷ Eigene Darstellung

⁸ Eigene Darstellung

3.3 Visualisierung von 3D-Modellen

Zur webbasierten Visualisierung bzw. zum Rendern von 3D-Modellen bedarf es einer im Webbrowser lauffähigen 3D-Szene. In der Szene bzw. 3D-Umgebung werden die zuvor erstellten Modelle präsentiert. Als Webtechnologien fanden im Entwicklungsprozess neben HTML5, CSS, JavaScript, JSON auch die beiden WebGL-basierten Frameworks Three.js und Blend4Web ihren Einsatz.

3.3.1 3D Rekonstruktion in Blender und Blend4web

Um für den Betrachter eine ansprechende und überschaubare Szene zu erschaffen, bedarf es neben den aufbereiteten 3D-Modellen und einer Landschaft, auch verschiedener zugänglicher Blickwinkel, die übersichtlich navigiert werden können. Dabei kann es notwendig sein, auf komplexe Ergänzungen, Materialien oder störende Texturen zu verzichten, sodass die wichtigen Aspekte des 3D-Gebäudemodells – hier die Wärmebrücken - hervorgehoben werden.

Für die Visualisierungsentwicklung wurden die Applikationen Blender [Ca14] und das Framework Blend4Web [St14] (s. Kapitel 3.3.2) eingesetzt. Zunächst wurde mit Blender eine Szene in einer geeigneten Landschaft erstellt, die dann nachfolgend mit den thermografischen 3D-Modellen erweitert wurde (s. Abb. 6). Die so mit Blender importierten und um Details erweiterten 3D-Objekte können anschließend als einzelne JSON Dateien exportiert und in einer WEB GL basierten Webapplikation integriert werden. Es ist mit Blend4Web auch möglich, sich die komplette 3D-Szene als HTML Seite mit CSS, JS, Canvas und WebGL generieren zu lassen, die als Basis für weitere Entwicklungen verwendet werden kann.

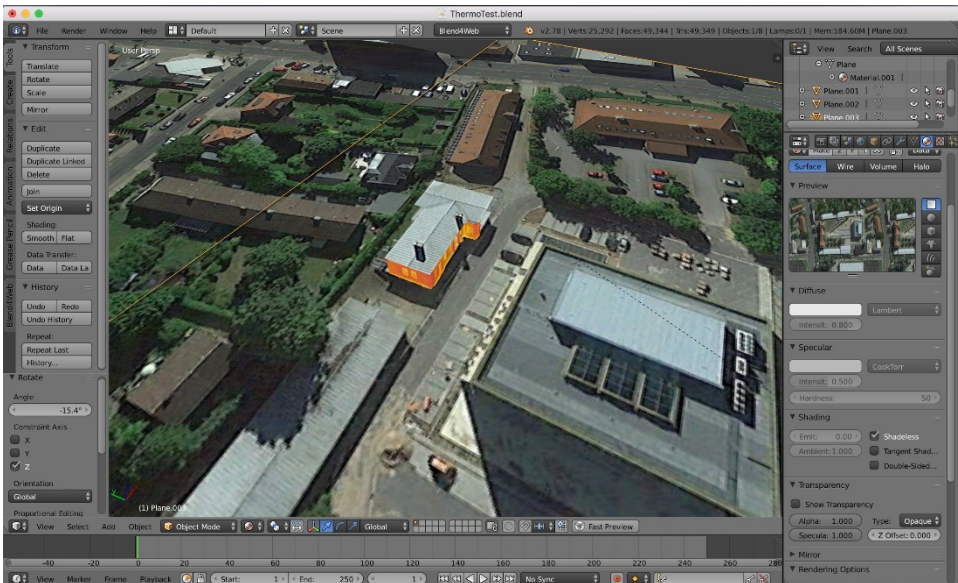


Abb. 6: Blender 3D-Szene aus Echt- und Wärmebildmodellen mit Blend4web Technologie⁹

3.3.2 Visualisierung von Thermografie- und Tageslichtaufnahmen im Web

Mit WebGL und dem neuen HTML5 Standard ist es möglich, 3D-Inhalte direkt im Internet Browser darzustellen. Blend4Web nutzt diesen Vorteil und ist noch eine relativ junge Web-Technologie. Man kann damit eine in Blender erstellte 3D-Szene als Webseite generieren lassen und über den mitgegebenen Viewer von allen Seiten betrachten (s. Abb. 7). Die, aus der Tool-Framework Kombination erstellte Webseite dient als Basis für die Darstellung von 3D-Inhalten aus Thermografie-, Tageslicht-, Wärmebrücken-, und Hybridaufnahmen im dreidimensionalen Raum.

⁹ Eigene Darstellung



Abb. 7: 3D-Szene im Webbrowser mit Echt- und Wärmebildmodellen¹⁰

4 Ergebnisse und Fazit

Durch den Einsatz von Algorithmen zur automatischen Erkennung von Wärmebrücken auf Wärmebildaufnahmen von Häuserfassaden können Schwachpunkte in der Dämmung gezielt lokalisiert und analysiert werden.

Das Framework Blend4Web ermöglicht das Erstellen einer angenehm zu navigierenden 3D-Szene als Webseite, die beliebig erweitert und schon im frühen Entwicklungsstadium zu Analysezielen benutzt werden kann.

Die erzeugte Webapplikation beinhaltet innerhalb der 3D-Landschaft realitätsnahe Abbildungen bzw. 3D-Modelle der zuvor aufgenommenen Gebäude auf Echt-, Thermo-, Wärmebrücken- und Hybridbildbasis und lädt dazu ein, in der Szene umher zu navigieren, um z. B. die vom Algorithmus automatisch erkannten Wärmebrücken etwas näher zu betrachten.

Es gibt klare Vorteile bei einer Blend4Web basierten Webseite. Die direkte Darstellung von 3D-Modellen im Browser ist möglich, ohne ein zusätzliches Plugin verwenden zu müssen. Die Entwicklung basiert zudem auf den Open Source Standards JavaScript und WebGL. Die 3D-Visualisierung bietet eine bessere Informationsvermittlung und

¹⁰ Eigene Darstellung

Interaktivität mittels 3D-Modelldarstellung. Zudem ist eine Darstellung sowohl auf mobilen Endgeräten als auch auf Desktop-PCs möglich.

Neben dem Erzielen von Klimaschutzzielen bzw. dem Mindern des Energiebedarfs von Gebäuden durch das Anregen von Sanierungsmaßnahmen, lassen sich die Erkenntnisse dieser Arbeit auch an anderen Stellen anwenden. Grundsätzlich lassen sich viele Formen von Schwachstellen erkennen, wie Fensterstürze, fehlende Dämmung in der U-Schale, undichte Bauteile bzw. Fugen, Durchfeuchtungen oder Verläufe von Heizungsrohren.

Danksagung: Wir danken dem Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen für die Förderung des Projekts „Interdisziplinäre Forschung für dezentrale, nachhaltige und sichere Energiekonzepte“ im Programm FH-STRUKTUR 2016.

Literaturverzeichnis

- [Bi09] An improved CANNY edge detection algorithm von Bing Wand, Department of Electric and Information Engineering Changsha University of Science and Technology Changsha, Hunan, China, 2009.
- [Ca14] Carsten Wartmann: Das Blender-Buch: 3D-Grafik und Animation mit Blender, 2014.
- [En17] Energetische Stadtsanierung, www.energetische-stadtsanierung.info, Stand: 04.04.2017.
- [Ga08] Learning OpenCV von Gary Bradski, Adrian Kaehler, O'Reilly, 2008.
- [Ka13] Parametrische Statistik: Verteilungen, maximum likelihood und GLM in R (Statistik und ihre Anwendungen) von Carsten Dormann, Springer Spektrum, 2013.
- [Le06] Leigh Hagestad: Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry- and image-based approach (An Implementation Project), S. 7 ff. 2016.
- [Pa96] Paul E. Debevec; Camillo J. Taylor; Jitendra Malik: Modeling and Rendering Architecture from Photographs. In SIGGRAPH '96, S. 17 ff., August 1996.
- [Ra11] An improvised Version of Canny Edge Detector, von Ravi Kumar Dalal, Rahul Gupta, Pulkit Wadhwa und Anand Gupta, Neta Subhas Institute of Technology, Neu Delhi, Indien, 2011.
- [Sh07] H.-Y. Shum; S.-C. Chan; S. B. Kang: Image-based rendering, Springer, S. 1 f., 2007.
- [St14] Stefanie Schäfers, 3D-Web-Applikationen mit Blend4Web, entwickler.de/online/3d-web-applikationen-mit-blend4web-erstellen-139994.html, Stand: 14.05.2017.
- [Zh12] Zhen-Yu Zhu; Shuai Zhang; Shing-Chow Chan; Heung-Yeung Shum: Object-Based Rendering and 3-D Reconstruction Using a Moveable Image-Based System, S 1 ff., 2012.