

Energetische Sanierung von Baudenkmalen am Beispiel Sanierung der Villa Castelli am Comer See

Alexandra Troi, EURAC research, alexandra.troi@eurac.edu

Oscar Stuffer, Solarraum, ostuffer@solarraum.it

Valentina Carì architetto, tiacari000@gmail.com

Dagmar Exner, EURAC research, dagmar.exner@eurac.edu

1 Ausgangslage

Die am Comer See gelegene Villa Castelli ist seit ungefähr 140 Jahren im Besitz der Bauherrenfamilie. Um das Gebäude besser nutzen zu können, sollte das Gebäude grundlegend energetisch saniert werden ohne dabei seinen historischen Charme zu beeinträchtigen. Außerdem steht die Villa in zweierlei Hinsicht auch unter formalem Schutz: Zum einen als Teil der Uferlandschaft des Comer Sees („vincolo paesaggistico“), zum anderen auch als Gebäude selbst („vincolo architettonico“). Es galt also, denkmalpflegerische Belange gemeinsam mit energetischen und statischen Fragen zu bearbeiten und allen Aspekten gerecht werdende Lösungen zu finden.

1.1 Gebäude und Kontext

Das Gebäude stammt aus der Mitte des 19. Jahrhunderts und wurde im Laufe seines Bestehens immer wieder umgebaut und erweitert: Nach einem ersten Zubau im Erdgeschoß wurde 1925 auch der erste Stock erweitert, der frühere Innenhof

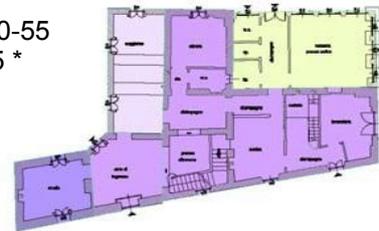


Abbildung 1: Villa Castelli vor der Sanierung

geschlossen und ins Gebäude integriert. 1939, als die Familie das Gebäude während des Krieges erstmals das ganze Jahr über bewohnte, kam die Veranda dazu, die als großes Esszimmer diente, und die Heizung wurde eingebaut.



- vor 1840-55
- 1840-55 *
- 1910
- 1925
- 1939



* mit Bleistift im Kataster 1840-55
sicher im Kataster 1890-1902

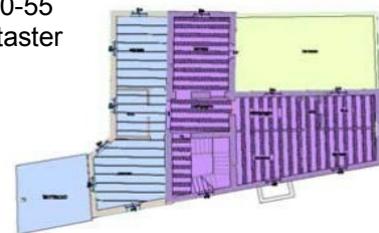


Abbildung 2: Foto vor 1925, Erweiterungen im Laufe der Zeit

Die Fassade in ihrer heutigen Gestalt geht im Wesentlichen auf den Umbau 1925 zurück und war in recht guten Zustand. Vorgabe der Denkmalpflege war hier klar die Erhaltung sowohl des Erscheinungsbildes auch der originalen Materialien und Strukturen. Die Entscheidung zur Erhaltung einiger architektonischer Elemente der Innenräume war vor allem Wunsch der Bauherren – so z.B. der Fenster-Möbel, einer das Fenster umrahmenden verzierten Holzkonstruktion mit Verschattungselementen, die in die Türenleibung gefaltet werden können.

Die Villa liegt in einem Park, der vom Gebäude direkt zur Seepromenade führt.



Abbildung 3: Parkanlage

1.2 Lage und Klima

Die Villa Castelli liegt in Bellano, am Ostufer des Comer Sees, also in den südlichen Ausläufern der Alpen. Das Winterklima ist mit 2383 HGT und einer mittleren Außentemperatur in der Heizperiode von +8°C nicht übermäßig rau. Um das Gebäude auch im Winter nutzen zu können bedarf es aber klar einer Heizung. Im Zustand vor Sanierung wurde das Haus im Winter kaum genutzt, da die Raumtemperatur trotz installierter leistungsstarker Heizung nicht über 17°C kam. Im Sommer wird es dagegen sehr warm: die höchste Monatsdurchschnittstemperatur erreicht +27°C. Allerdings wehen auch im Sommer dank der Seelage starke Winde



Abbildung 4: Lage am See in den südlichen Ausläufern der Alpen

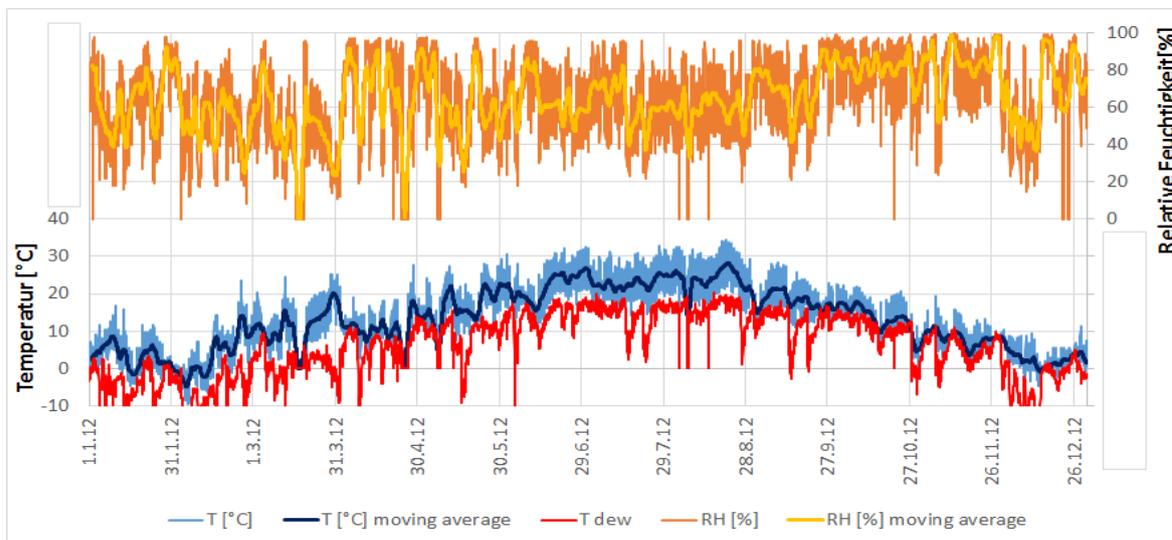


Abbildung 5: Temperatur und Feuchtigkeit am Comer See

1.3 Sanierungsziel

Wie schon einleitend erwähnt, war das wesentliche Ziel der Sanierung, das Gebäude für die Bauherrenfamilie besser nutzbar zu machen – dies mit einer langfristigen Perspektive. Es ging also nicht um kleinere Maßnahmen, die die Behaglichkeit ein bisschen verbessern, sondern darum, mit einem gut durchdachten umfassenden Eingriff, die Betriebskosten zu minimieren, die Behaglichkeit und Nutzbarkeit der Räume zu optimieren und dabei den Charme des historischen Gebäudes zu erhalten.

Das architektonische Planungskonzept hat vorsätzlich den Weg verfolgt, die vorhandenen Raumfunktionen zu erhalten und zusätzlich die oft widersprüchliche schrittweise Erweiterung der Räume des ursprünglichen Gebäudes miteinander zu verbinden. So sollte z.B. durch Herausnehmen der alten Außenwand ein dem Park zugewandter großzügiger Aufenthaltsraum entstehen.

Auch statisch sollte das Gebäude im Rahmen der Sanierung unter die Lupe genommen und Schwachstellen – auf die eine Reihe von Rissen in den Fassaden schon deutlich hinwies – gelöst werden.

Die ambitionierten energetischen Ziele wurden mit dem Bauherren zu Planungsbeginn wie folgt definiert:

- Rundumsanierung mit Schwerpunkt Energieeffizienz
- Minimierung des Energiebedarfs des gesamten Gebäudes
- Deckung des Restenergiebedarfs erneuerbar und vor Ort
- Energieautonomie auf Jahresbasis
- Natürliche Materialien
- Klar definiertes Budget

Die Investition konzentrierte sich auf die energetischen Maßnahmen, allerdings wurde auch Wert darauf gelegt, die dekorativen Elemente im Innen und Außen wiederherzustellen. Die Bauherren akzeptierten auch längere Amortisationszeiten, sie hatten aber ein durchaus waches Auge sowohl auf die Sanierungs- als auch die zukünftigen Betriebskosten und legten Wert auf den optimalen Einsatz der heute verfügbaren Materialien und Technologien.

2 Analyse und Planung

2.1 Bestandsaufnahme

Da die Villa Castelli in mehreren Phasen gebaut und erweitert worden war, war es besonders wichtig, den Bestand genau zu erfassen. Bereits früh in der Planung wurden vor Ort Bauteile und deren Aufbauten erörtert, um dann mit größtmöglicher Genauigkeit und Sicherheit in die energetische Berechnung und die Ausführungs- und Detailplanung zu gehen.

Die ältesten tragenden Wände des Gebäudes bestehen aus lokalem Gestein (Stärke 42 und 62cm). Die erste Erweiterung wurde mit Vollziegeln errichtet, die daran anschließenden mit Lochziegeln und teilweise Beton. Die Decken waren je nach Bauphase als Holzbalkendecken und Hohlsteindecken errichtet, in der Veranda aus Stahlträgern mit Betonguss als Deckenplatte. Das Dach hatte eine primäre (Pfetten) und sekundäre (Sparren) Tragstruktur mit Rauschalung und darauf direkt aufgelegten Mönch- und Nonne-Ziegeln.

Die Risse in der Fassade sind einem Absinken des Untergrundes – auch aufgrund der schlechten Regenwasserabführung in der Stadt – geschuldet. Das Gutachten des Statikers zeigte klaren Bedarf für Konsolidierungsmaßnahmen auf, die wie im

Folgenden beschrieben mit den energetischen Maßnahmen in Einklang gebracht werden mussten.

Die Putze an der Fassade waren insgesamt gut erhalten, zeigten allerdings an einigen Stellen – insbesondere an der Nord-Ost und Nord-West Fassade des Gebäudes – Abmahlungen, zum Teil auch größere Fehlstellen und Farbverwaschungen auf. Defekte Regenrinnen aber auch aufsteigende Feuchtigkeit haben ihrerseits in verschiedenen Bereichen zu typischen Feuchteschäden geführt.



Abbildung 6: Schäden an der – verhältnismäßig gut erhaltenen – Fassade

2.2 Energetisches Konzept

Das 3-geschoßige Gebäude hat eine Bruttogeschoßfläche von 680 m² (netto 564 m²) und ein Volumen von 2'600 m³. Das Oberflächen/Volumen Verhältnis von 0.49 weist nicht gerade auf ein kompaktes Gebäude hin, ist bei der Sanierung von Baudenkmalen aber in der Regel nicht wesentlich beeinflussbar, und bestimmt damit den Grad der Herausforderung an die Planung.

Ähnliches gilt für das Verhältnis von opaken Flächen (hier 1'273 m²) zu transparenten Flächen (hier 86 m²): Die Fenster zur Verbesserung der **solaren Gewinne** zu vergrößern stand außer Diskussion; die Solaren Gewinne konnten nur über die richtige Auswahl der Gläser optimiert werden.

Gleichzeitig heißt das aber auch, dass die Verminderung der **Transmissionswärmeverluste** vor allem über Verbesserung der opake Flächen erfolgen muss: im konkreten Fall (i) das Dach, (ii) die erdanliegenden Fußböden und (iii) die Außenwand. Das Dach wurde komplett erneuert und dabei zwischen den Sparren mit 14 cm Zellulose ausgeflockt und zusätzlichen 10 cm Holzfaser sowie 8 cm Steinwolle (Brandschutz unter der PV-Anlage) auf den Sparren gedämmt. Die Dämmung gegen das Erdreich wurde mit 20cm XPS ausgeführt.

Die Außenwand wurde innen gedämmt – und zwar mit 20 cm Perlite bzw. 8 cm Aerogel wo geometrisch erforderlich (wie z.B. beim Treppenaufgang). Für beide **Innendämmungen** wurde der Feuchtetransport simuliert (WUFI). Zudem wurden alle entstehenden Knoten mit besonderem Augenmerk auf Luftdichtheit, Dampfdiffusion und Konvektion konstruktiv durchgeplant (siehe Abschnitt 3 und 4).

Tabelle 1 Gebäudehülle und erreichte U-Werte

Beschreibung	Fläche m ²		U-Wert W/m ² K	Transmission kWh/m ² a	
Dach	225	18%	0.13	3.0	10%
Außenwand	579	46%		11.1	37%
Steinwand	252	20%	0.19	4.9	
Ziegelwand	259	21%	0.19	5.0	
Betonwand	68	5%	0.18	1.2	
Fenster	86	7%	1.1	9.6	32%
Decke gegen Terrasse	83	7%	0.19	1.6	5%
Decke gegen Keller	43	3%	0.23	1.0	3%
Erdanliegender Fußboden	240	19%	0.15	3.7	12%

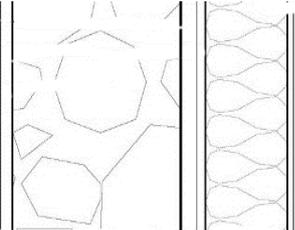
Aussen		Innen
<ul style="list-style-type: none"> - Fassade rissfrei und schlagregendicht - Wasserabweisende, dampfdiffusionsoffene Fassadenfarbe 		<ul style="list-style-type: none"> - Luftdichtheit innen (n50 = 0,41 1/h) - Lüftungsanlage, bilanziert - Diffusionsoffener Wandaufbau (kapillaraktive Innendämmung) - Diffusionsoffene Innenwandfarbe (!)

Abbildung 7: Konzept für langfristige schadensfreie Funktion der Innendämmung

Eine **luftdichte Gebäudehülle** war in zweierlei Hinsicht von Bedeutung: einmal um die langfristige Schadensfreiheit der Innendämmung zu gewährleisten, zum anderen um angesichts der windexponierten Lage die Lüftungsverluste zu begrenzen. Mittels Einbau einer **Komfortlüftung** (jeweils eine pro Geschöß, 480 m³/h je Gerät) mit einer PHI zertifizierten Wärmerückgewinnung von 87% und einer Stromeffizienz=0,32 Wh/m³ können die Lüftungsverluste auf 8.7 kWh/m²a reduziert werden. Außerdem gewährleistet die Lüftungsanlage optimale Lufthygiene (primär CO₂-Konzentration, aber auch Raumlufftfeuchte).

Anlagentechnisch galt es nun den verbleibenden Energiebedarf erneuerbar und vor Ort zu decken. Angewandtes Konzept: Wärme, Kälte und Warmwasser stellt eine **Wärmepumpe mit Tiefensonden** bereit. Verteilt werden Wärme und Kälte über den Fußboden – bei der Kühlung geht es mehr um Komfortverbesserung (Softcooling) denn um echte Klimatisierung, sodass Kondensat im Bodenaufbau vermieden wird. Elektrische Energie wird mit der – in der Dacheindeckung integrierten und von außen nicht erkennbaren – **PV-Anlage** produziert und mit Micro-Windturbinen am Dach bereitgestellt.

Vor der Genehmigung der PV-Anlage durch die Denkmalpflege wurden mehrere Prototypen für eine dachintegrierte und möglichst unsichtbare Installation entwickelt. Die Denkmalpflege optierte für die doppelt gekräuselte Aluminiumblech-eindeckung des Daches – die in ähnlicher Art für Gebäude diesen Alters durchaus üblich ist – mit integrierten monokristallinen PV-Modulen. Detail am Rande: Die extra-dünnen PV-Module wurden von einem Ausrüster für Segelboote geliefert. Für die Eindeckung des Daches mit Blech sprach außerdem, dass sich die Nadeln der nebenstehenden riesigen Zeder nicht mehr auf dem Dach liegenbleiben, was für den Bauherren eine deutliche Erleichterung der Instandhaltung und für die Fassade Vermeidung von Feuchteschäden durch überlaufende Regerinnen bedeutet.



Abbildung 8: Zwei Prototypen für die dachintegrierte PV-Anlage

2.3 Restauratorische Arbeiten

Die Fassade wurde nach den Vorgaben des Amtes für Denkmalschutz vollkommen restauriert: gereinigt, konsolidiert (Acrylharz mit Pinsel und Spritze), Fehlstellen in Originaltechnik ergänzt. Für eine einwandfreie Funktion der Innendämmung wurde besonders darauf geachtet, jegliche Fugen und Risse zu verschließen.



Abbildung 9: Konservatorische Restaurierung der Fassade

2.4 Statische Konsolidierung

Um das Gebäude statisch zu konsolidieren wurde in bestimmten Bereichen die bestehenden Decken entfernt und durch Holzverbunddecken mit Betonguss ersetzt, die die Lasten besser verteilen und das Gebäude an sich aussteifen. Die potentiellen Wärmebrücken wurden jeweils ausführlich diskutiert und ein Kompromiss ausgehandelt: Im in Abschnitt 4 vorgestellten Detail stand z.B. „direkte Verbindung des Metallprofils mit der Wand“ als Forderung des Statikers dem Anspruch des Energieplaners von „mindestens 10 cm Kork zwischen Wand und Profil“. Abwägen und Nachrechnen resultierten schlussendlich in 6 cm Kork.

3 Ausführungs- und Detailplanung

Auf der Bestandsaufnahme aufbauend wurden die einzelnen Bauteile und Knotenpunkte analysiert und in einem integralen Planungsprozess Lösungen erarbeitet, welche sowohl Energieeffizienz als auch Wärmebrücken, das feuchtetechnisch korrekte Verhalten, architektonische Aspekte und statische Vorgaben (Erdbebensicherheit!) mit einbezogen.

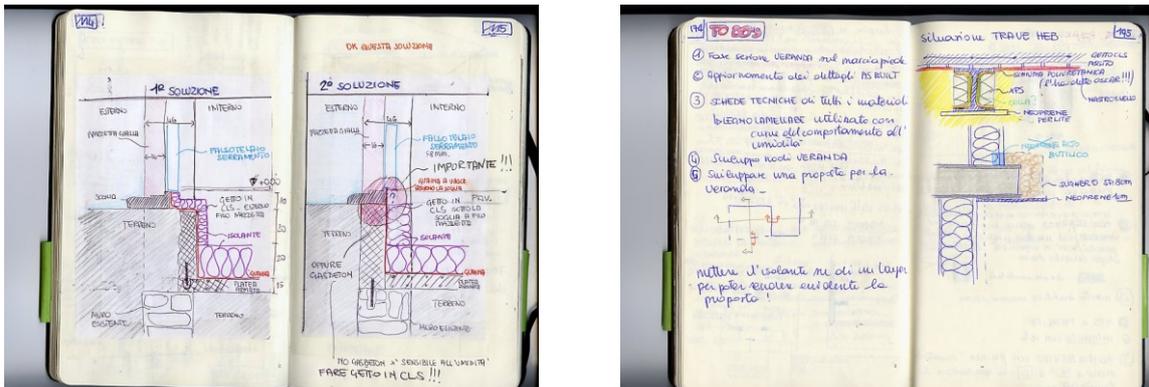


Abbildung 10: Dokumentation der interdisziplinären Arbeit im Architektenbuch

Die kritischen Punkte bei der Ausführungsplanung wie bei der Ausführung der Bauarbeiten, waren sicher die hohe Anzahl von verschiedenen Knoten (ca. 30 Stk.). Um die Ausführung möglichst zu vereinfachen, beschränkte sich die Planung auf zwei Innendämmstärken (20 cm Perlite und 8 cm Aerogel wo geometrisch erforderlich). Für beide Innendämmungen wurde der Feuchtetransport simuliert (WUFI). Zudem wurden alle Knoten mit besonderem Augenmerk auf Luftdichtheit, Dampfdiffusion und Konvektion konstruktiv durchgeplant.

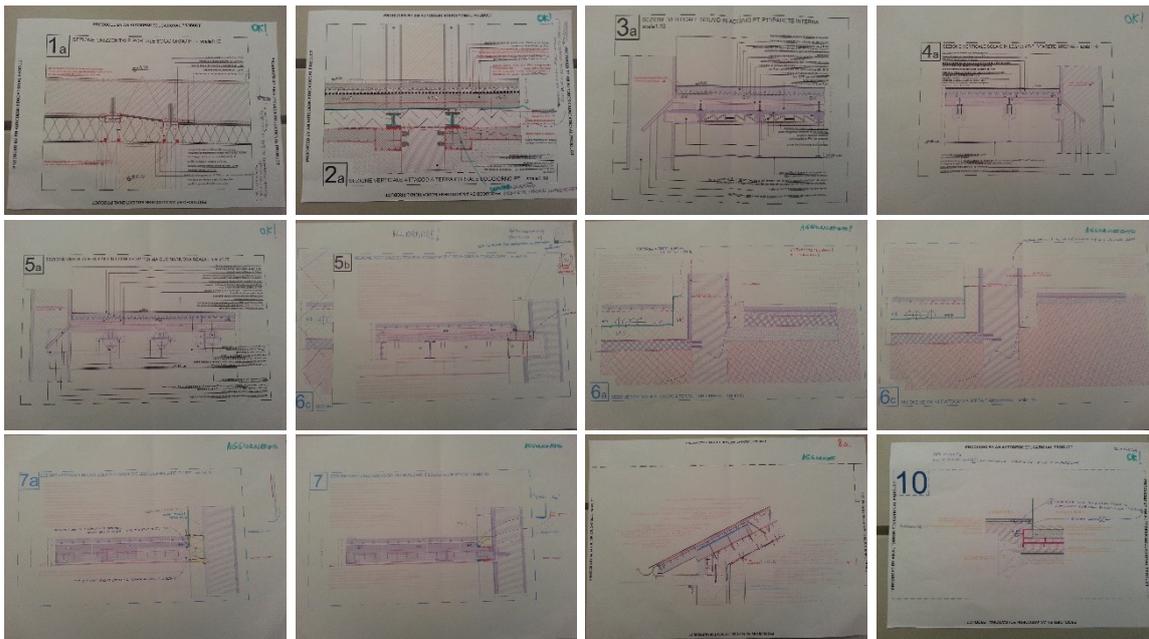


Abbildung 11: Auswahl analysierter Knotenpunkte

4 Hygrothermische Simulationen

Die Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports mit dynamischen Simulationsprogrammen wie z.B. DELPHIN oder WUFI erlaubt es, das Feuchte-Verhalten eines Konstruktionsdetails unter den real zu erwartenden Klimabedingungen zu bewerten. Außerdem können Feuchtespeicherung und kapillarer Flüssigwassertransport, feuchteabhängige Material-eigenschaften und Phasenumwandlung berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass manche Konstruktionen, welche nach EN 13788 ausgeschlossen werden müssten, sich bei der Berücksichtigung von Feuchtespeicherung und Kapillartransport doch als tauglich erweisen. Außerdem helfen die 2D Simulationen, Schwachstellen zu identifizieren und zu entschärfen.

Der Begrenzung des Inneren Kondensats (beim Monatsbilanzverfahren) entspricht die Analyse der Kondensations- und Trocknungszyklen, der Bewertung von Tauwasser und Schimmelrisiko mit dem Temperaturfaktor f_{RSI} die Auswertung von Temperatur und Feuchtigkeit auf der Innenwandoberfläche im Zeitverlauf, bzw. bei relativen Feuchtigkeiten über 75% im Isolethediagramm (siehe Abb 4.2). Neben der 1D-Berechnung des Wandaufbaus (siehe Abschnitt 4.1), wurden insbesondere zwei Details auch 2D simuliert: Die Balkenköpfe und das Anschlussdetail mit auf einem Metallprofil aufliegender Holzdecke.

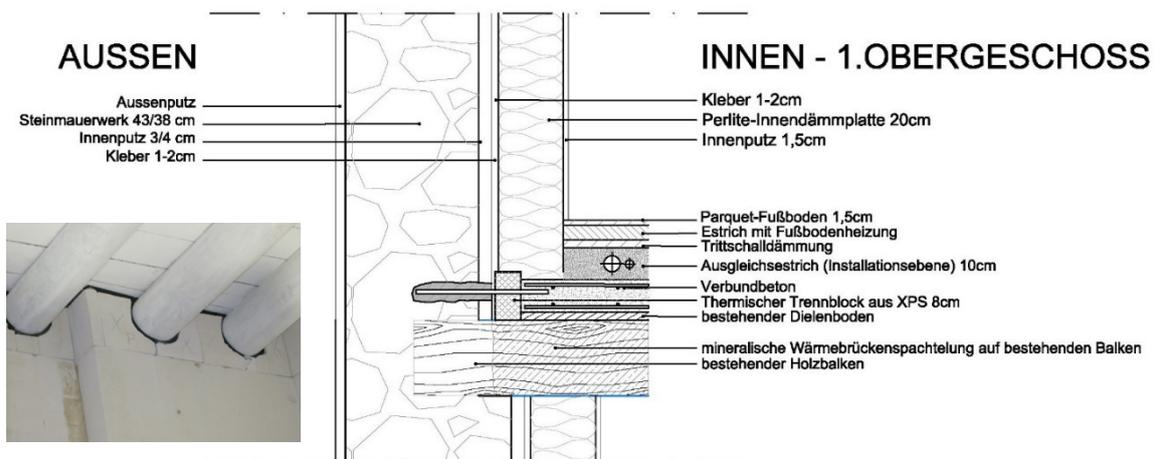


Abbildung 12 Zwischendeckenaufleger Balkenkopf auf Außenwand

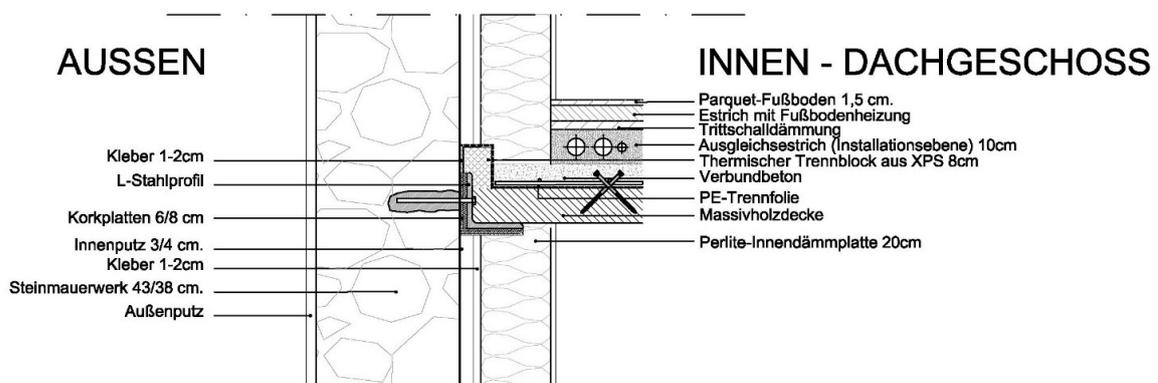


Abbildung 13 Zwischendeckenaufleger mit statischer Konsolidierung

4.1 Hygrothermisches Verhalten des Wandaufbaus

Die Jahreszyklen der Wasserbilanz des sanierten Bauteils unterscheiden sich nur gering von jener des Bestandes. Beide pendeln sich innerhalb von 2-3 Jahreszyklen ein, wobei sich die über den Winter im Bauteil angehäuften Feuchtigkeit, im darauf folgenden Sommer wieder komplett austrocknet. Einzig das Mittel der Wasserbilanz – über die Jahre betrachtet – erhöht sich geringfügig von $3,5 \text{ kg/m}^2$ auf $4,5 \text{ kg/m}^2$ (Wandaufbau mit Aerogel: $5,5 \text{ kg/m}^2$). Der Wassergehalt der Perlitedämmung pendelt sich genauso wie die Wasserbilanz des gesamten Aufbaues innerhalb von 2-3 Jahreszyklen ein. Der maximale Wassergehalt übersteigt ab dem 3. Jahreszyklus nicht die $1,95 \text{ [M.-%]}$ (Wandaufbau mit Aerogel: $3,50 \text{ [M.-%]}$).

Ergänzend und vergleichend zu dem mit WUFI berechneten hygrothermischen Verhalten der Wandaufbauten, wurde die Steinwand mit Perlitedämmung auch mit DELPHIN durchgerechnet – und zwar mit denselben Material- und Klimadaten die auch für die in Abschnitt 4 vorgestellten potentiell kritischen Knoten verwendet wurden. Für die Berechnung mit Schlagregen wurden in Colico gemessene Klimadaten herangezogen.

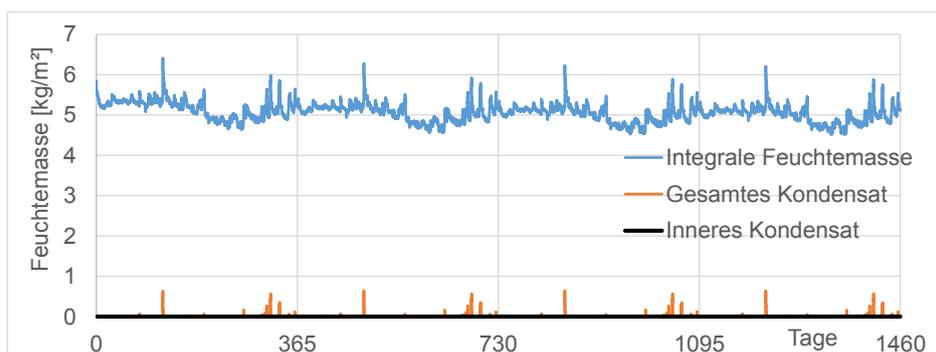


Abbildung 14: Konservatorische Restaurierung der Fassade

Die Graphik bestätigt die mit WUFI berechnete integrale Feuchtemasse und zeigt außerdem auf, dass es im Wandaufbau – abgesehen vom oberflächennahen Bereich außen – praktisch nie zu Kondensation (Kriterium: überhygroskopisches Feuchteintegral) kommt.

4.2 Hygrothermische Simulation von potentiell kritischen Knoten

Die in der Planungsdiskussion als kritisch eingestuften Punkte beim Detail mit dem umlaufenden Metallprofil haben sich in der Simulation als unproblematisch erwiesen: im Balkenkopf kommt es trotz durch das Metall unterbundenem Feuchtransport nicht zu einer Aufspeicherung von Feuchtigkeit und auch die Feuchtwerte im durch die Wärmebrücke kühleren Punkt in Kork und Perlitedämmung sind unkritisch. Während des gesamten Jahres kommt es im Klima am Comer See nicht zu Tauwasseranfall in der Konstruktion (bewertet über überhygroskopische Feuchte), für Klima Essen hingegen wäre sehr wohl ein Tauwasseranfall zu beobachten.

Auch an der oberen Raumecke des unten angrenzenden Raumes ist die Temperatur hoch genug, sodass Schimmelprobleme ausgeschlossen werden können.

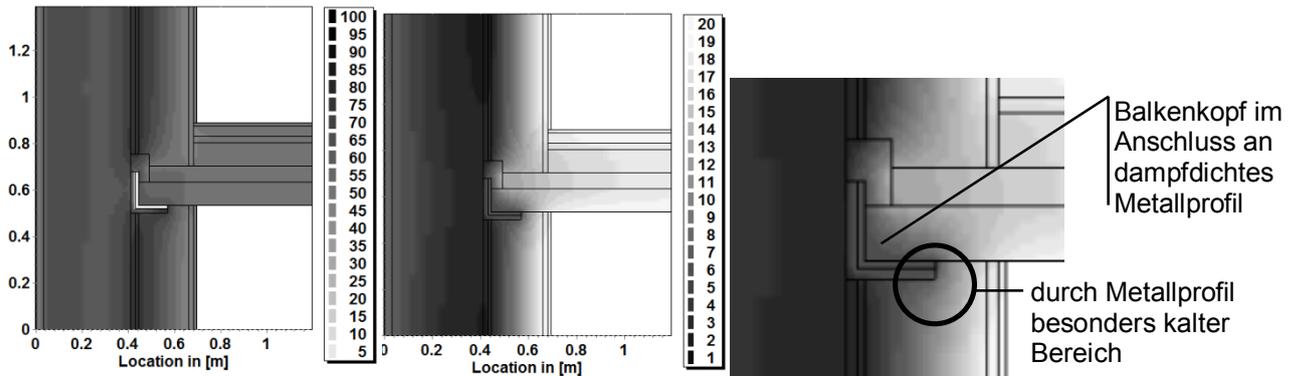


Abbildung 15: Als kritisch identifiziert und überprüfte Details im 2-dim. Feuchte- bzw. Temperaturfeld

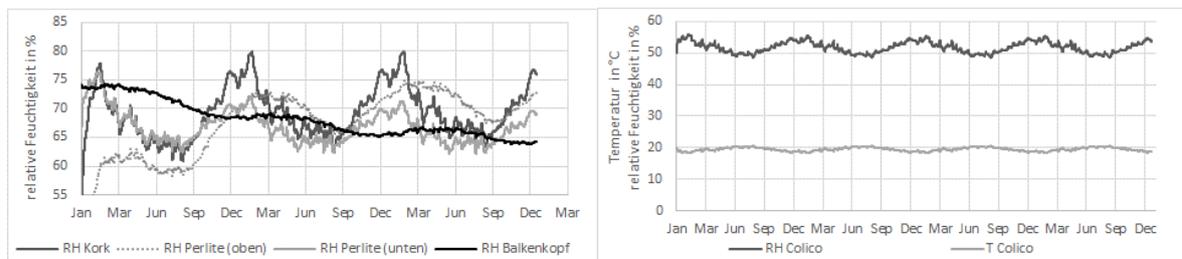


Abbildung 16: Relative Feuchtigkeit in der Konstruktion (links) und in der Raumecke (rechts)

Beim Balkenkopf zeigt die hygrothermische Simulation klar die Kältebrücke an, die Feuchtigkeit steigt aber nicht in kritische Bereiche. Insgesamt ermittelt die Simulation für das Klima am Comer See überhaupt keine Phasen mit Kondensation (Feuchtigkeit im überhygroskopischen Bereich). Auch hier verhält sich die Simulation für Klima Essen (jeweils mit Schlagregen) kritischer.

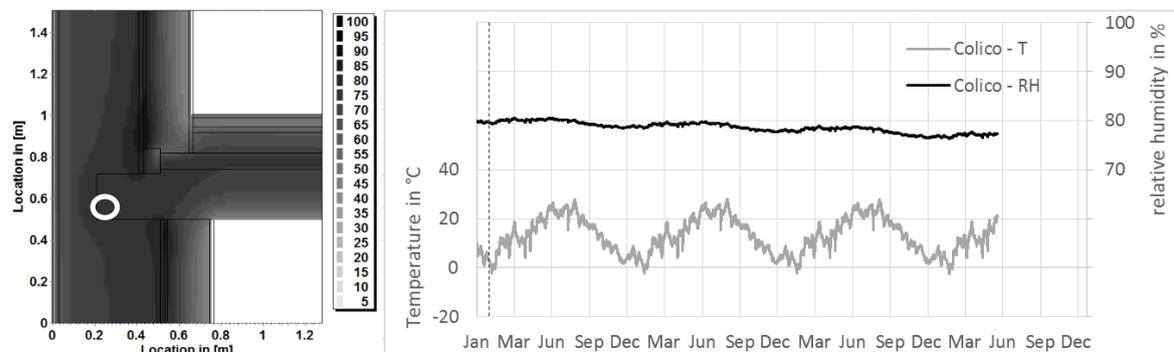


Abbildung 17 Knoten Zwischendeckenaufleger am 04.02. (400) (links) und relative Feuchtigkeit und Temperatur in der Konstruktion (rechts)

5 Umsetzung und Ergebnisse

5.1 Energieeffizienz

Der Heizwärmebedarf wurde von 248 kWh/m²a auf 18 kWh/m²a reduziert, was einer Einsparung von über 90% entspricht. Der Kühlbedarf hingegen erhöht sich durch die Entkoppelung der Masse der Außenwände durch die Innendämmung von 8,4 kWh/m²a auf 11,5 kWh/m²a.

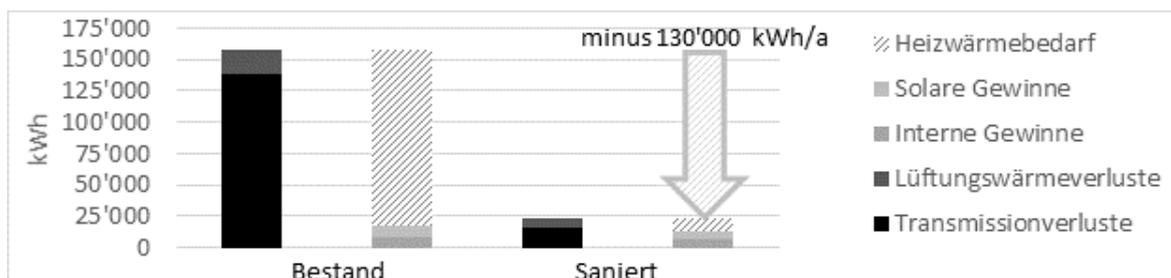


Abbildung 19: Energiebilanz – Bestand und sanierter Zustand

Inclusive der Warmwasserversorgung ergibt sich für das sanierte Gebäude eine Wärmebedarf von 14'500 kWh/a. Diese Wärme wird über die Wärmepumpe mit Tiefensonden bereitgestellt, die dafür 4'100 kWh/a an elektrischer Energie benötigt. Zu dieser hinzu kommen noch etwa 7'150 kWh/a für Hilfsenergie (Lüftung, Pumpen, etc), woraus sich ein elektrischer Energiebedarf von 11'250 kWh/a für Heizung von Warmwasser ergibt.

Die PV-Anlage wird etwa 10'400 kWh/a produzieren – das Ziel der Energieautonomie auf Jahresbasis wurde also tatsächlich so gut wie erreicht.

5.2 Qualitätskontrollen

Der Luftdichtheitstest ergab einen äußerst geringen Luftwechsel (n50) für das gesamte Gebäude von 0,41 1/h (EN 13829:2000 Methode B). Die Infrarotaufnahmen während des Blower Door Tests zeigten auch an kritischen Knotenpunkten wie den Fensterrahmen oder an der Lüftungsanlage nur geringe Leckagen. Die größten Undichtheiten waren bei den Dachfenstern zu finden. Mit dem Monitoring werden in den nächsten drei Jahren sowohl der energetische als auch der raum- und bauklimatische Erfolg der Sanierung bewertet werden.

6 Abschließend

Die Sanierung der Villa Castelli am Como See zeigt, dass eine energetische Sanierung auf beinahe Passivhaus-Niveau mit dem Denkmalschutz durchaus kompatibel ist. Wichtig ist es, das Gebäude gut zu analysieren und zu verstehen, die passenden Lösungen für die Vielzahl der „Spezialstellen“ im Team zu entwickeln und durch Berechnungen und Simulationen so weit abzusichern, dass sie auch die für den Denkmalpfleger wichtige Schadenssicherheit garantieren.