

Der Dom digital

Nicht nur ein virtueller Zwilling – Erhaltung in 3D

Vorworte

Vom Maßstab zum Laserscan

Der Laserscan des Aachener Doms

Dokumentation des Unersetzbaren

Von Daten zu Wissen

Digitale Informationsmodelle für die Dachstühle des Aachener Doms

Die Akustik der Nikolauskapelle

Leuchtenkonstruktion auf Grundlage einer Punktwolke

Zwischen Stein, Geschichte und Datenpunkten

Das Diaarchiv des Dombaumeisters Hans-Karl Siebigs

Jahresrückblick 2025

Jahresschriften seit 1995



Foto: Christoph Hartmann

Impressum

Band 28 – 2026

Herausgeber:
Karlsverein-Dombauverein Aachen

Produktion:
VWB Media Service Verlag GmbH, Grüner Weg 106, 52070 Aachen

Verlag:
VWB Media Service Verlag GmbH, Grüner Weg 106, 52070 Aachen
Verantwortlich für Inhalt und Fotos sind die Autoren.

ISBN 978-3-9816010-0-8

Inhalt

Vorwort

Hubert Herpers, Vorsitzender Karlsverein-Dombauverein 6

Vorwort

Rolf-Peter Cremer, Dompropst am Hohen Dom zu Aachen 8

Vom Maßstab zum Laserscan – Wie die Dombauhütte Aachen den Dom digital bewahrt

Von Jan Richarz 11

Der Laserscan des Aachener Doms. Projektidee und Durchführung sowie Nutzung der Daten in der Lehrforschung der RWTH Aachen

Von Yannick Ley 27

Dokumentation des Unersetzbaren: Entwicklung eines standardisierten Workflows für die originalgetreue Dokumentation von baukulturellem Erbe

Von Douglas Pritchard 35

Von Daten zu Wissen. Forschungserfahrungen zum Aachener Dom

Von Carlo Bianchini, Martina Attenni, Roberto Barni, Marika Griffo 45

Digitale Informationsmodelle für die Dachstühle des Aachener Doms

Von Fabian Rolke, Xinyu Yu, Shiyi Xie, Anne Göbels, Oliver Schulz, Jakob Beetz 61

Kleine Kapelle – großer Klang. Die Akustik der Nikolauskapelle

Von Martin Zerwas 71

Leuchtenkonstruktion auf Grundlage einer Punktwolke – Beispiel Ungarnkapelle

Von Florian Tolksdorf 79

Zwischen Stein, Geschichte und Datenpunkten – Wie alte Baukunst im digitalen Zeitalter weiterlebt

Von Jan Richarz 86

Das Diaarchiv des Dombaumeisters Hans-Karl Siebigs: Digitalisierung und Erschließung eines unikalen Quellenbestandes

Von Christian von Lettow-Vorbeck 92

Jahresrückblick 2025 118

Die Jahresschriften seit 1995 122

Von Daten zu Wissen

Forschungserfahrungen zum Aachener Dom

Von Carlo Bianchini, Martina Attenni, Roberto Barni, Marika Griffo

Einleitung

Die Forschung zum Aachener Dom, die im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit zwischen der Sapienza-Universität di Roma, der Robert Gordon University in Schottland, der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und der Dombauhütte Aachen durchgeführt wird, ist Teil eines wachsenden Forschungsfeldes, das sich zunehmend auf fortschrittliche digitale Technologien stützt, um das architektonische Erbe zu verstehen und zu bewahren.

Das Aachener Domprojekt zielt darauf ab, eine umfassende Dokumentation des Denkmals und seiner Baumaterialien zu erstellen und dabei die entscheidende Rolle digitaler Innovationen für die Erforschung und den Schutz des kulturellen Erbes hervorzuheben. Vermessungskampagnen, die zwischen 2022 und 2023 durchgeführt wurden, ermöglichten die Verfeinerung von Methoden und Werkzeugen zur Erfassung hochpräziser geometrischer Daten. Die daraus resultierenden 2D- und 3D-Modelle bildeten die Grundlage für eine detaillierte Analyse der Architektur, sowohl in ihrer geometrischen und strukturellen Dimension [Attenni et al. 2022] als auch in ihren materiellen und konstruktiven Aspekten [Attenni et al. 2024].

Der ursprüngliche Kern der Kathedrale, die Pfalzkapelle, bewahrt trotz bedeutender Umgestaltungen – von der Hinzufügung des gotischen Chors [Knopp 2012] bis hin zu späteren, bescheideneren Erweiterungen [Siebigs 2000] – noch immer in bemerkenswertem Maße die authentischen Merkmale der karolingischen Architektur. Dieses außergewöhnliche Denkmal des frühen Mittelalters

ermöglicht somit weiterhin eine direkte und zuverlässige Interpretation seiner wesentlichen Bestandteile.

Auf dieser Grundlage konzentriert sich der vorliegende Beitrag auf die beiden bisher verfolgten Forschungsschwerpunkte: die geometrische und stereometrische Analyse des Gewölbesystems der Pfalzkapelle, mit dem Ziel, die Prinzipien zu rekonstruieren, die das Design und den Bau in der Karolingerzeit leiteten und oft unerwartete Lösungen offenbarten; sowie die Identifizierung der Materialien und Bautechniken der Kathedrale, die durch die experimentelle Anwendung von Algorithmen des maschinellen Lernens für eine fortgeschrittene und systematische Klassifizierung untersucht wurden.

Diese Untersuchungen sollen nicht nur unser Wissen über das Denkmal vertiefen, sondern auch innovative Werkzeuge testen, die eine umfassende Dokumentation gewährleisten und neue Perspektiven für die Verwaltung, Erhaltung und Interpretation der Kathedrale eröffnen können.

Was sich dabei abzeichnet, ist das Bild einer komplexen architektonischen Struktur, die sich einer eindeutigen Definition entzieht: Die Pfalzkapelle spiegelt die Kontinuität spätantiker und byzantinischer Traditionen wider [Heckner & Beckmann 2012] und weist gleichzeitig auffallend originelle Lösungen auf, wie beispielsweise die konischen Gewölbe der oberen Chorungänge. Gleichzeitig zeigt der Einsatz modernster Vermessungs- und Analysetechnologien, dass der Aachener Dom auch mehr als zwölf Jahrhunderte nach seiner Errichtung weiterhin als privilegiertes Testfeld für architektonische und technologische Forschung dient.

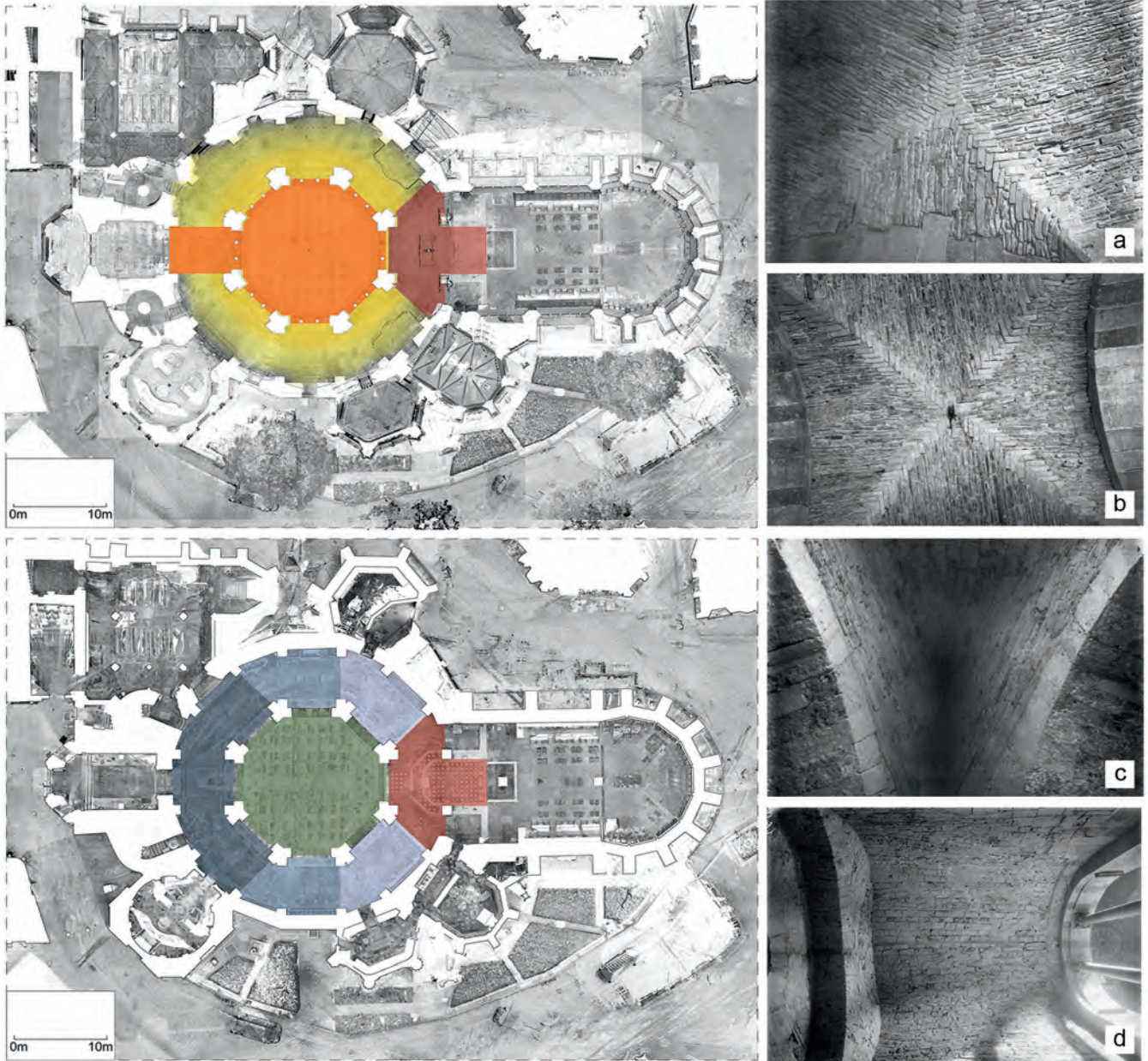


Abb. 1: Räumliche Anordnung der Pfalzkapelle nach Schindler: Erdgeschoss für die Gläubigen (blau) und Geistlichen (grün); kaiserliches achteckiges Oratorium (orange); erster Stock für den Hofstaat (gelb); Heiligtümer auf beiden Ebenen (rot). Rechts: Gewölbetypologien.

Foto: Archiv des Aachener Doms

Die Gewölbe der Pfalzkapelle

Wie Bruno Schindler [Pieper & Schindler 2017] hervorhebt, zeichnet sich die Pfalzkapelle durch eine komplexe vertikale Gliederung aus, die sowohl das zentrale Oktogon als auch den äußeren Ring der Chorumgänge prägt. Der Hauptraum erstreckt sich über drei Ebenen, um die herum zwei polygonale Ringe angeordnet sind. Obwohl sie bestimmte Merkmale gemeinsam haben, weisen diese Ringe doch grundlegend unterschiedliche räumliche Eigenschaften auf.

Wie bereits erwähnt [Bianchini 2024], offenbart die Gesamtkomposition eine deutliche Dissonanz, die durch die gegensätzlichen Spannungen innerhalb der Chorumgänge entsteht: zentripetale Kräfte im Erdgeschoss und zentrifugale Kräfte im Obergeschoss, die sich – wenn auch nur teilweise – innerhalb des hoch aufragenden zentralen Hohlraums aufzulösen scheinen. Diese raffinierte räumliche Anordnung lässt zusammen mit anderen Hinweisen auf ein sehr bewusstes und einheitliches Design schließen, das auf einem klaren Programm basiert, bei dem jede architektonische Komponente in Form, Funktion und Platzierung streng aufeinander abgestimmt wurde.

Eine entscheidende Rolle in dieser Konzeption spielt das Gewölbesystem dieser Räume. Seine ungewöhnliche Geometrie zeugt nicht nur von technischem Wissen, das für das 8. Jahrhundert fortschrittlich erscheint, sondern untermauert auch die Vorstellung eines autoritären Projekts, das von der Konzeption bis zum Bau konsequent kontrolliert wurde. In diesem Rahmen erscheint die Zuschreibung der Kapelle an einen einzigen, autonomen Entwerfer – in historischen Quellen als Odo von Metz identifiziert – plausibel.

Die Anordnung der Gewölbe unterstreicht die Unterschiede zwischen den beiden Ebenen zusätzlich. Im Erdgeschoss überspannt ein System von Kreuzgewölben viereckige und dreieckige Joche (Abb. 1a, 1b). Das Fehlen von Querbögen schafft einen kontinuierlichen, kreisförmigen Fluss, der die Verbindung zwischen dem zentralen Kern und dem umgebenden Weg verstärkt und damit der

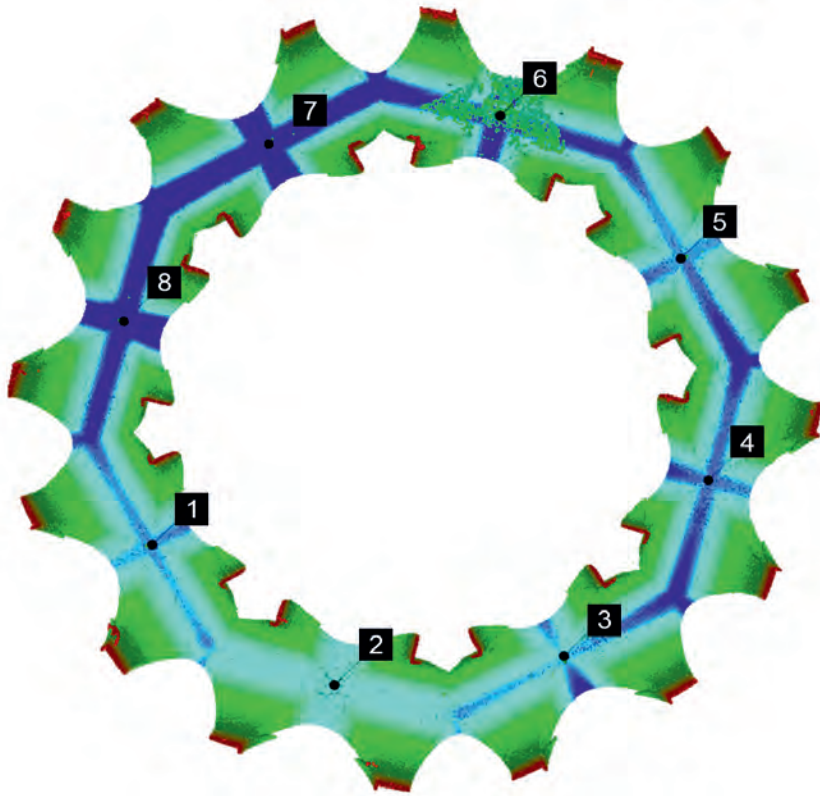
Prozessionsfunktion des Raumes entspricht. Die obere Ebene ist dagegen klarer gegliedert: Rundbögen verbinden die inneren Pfeiler mit denen der Außenwand und unterteilen den Chorungang in klar definierte Felder (Abb. 1c, 1d). Hier sorgen radiale Kapellen für einen Wechsel zwischen offenen und eher geschlossenen Räumen, die für bestimmte liturgische Funktionen vorgesehen sind, während dreieckige Sektoren als Übergangselemente zwischen den geneigten Tonnengewölben und dem äußeren Strukturraster dienen.

Die Kreuzgewölbe im unteren Sechzehneck

Die Untersuchung der Kreuzgewölbe im unteren Sechzehneck begann mit der Hypothese, dass sie durch den Schnittpunkt eines ringförmigen Gewölbes mit radialen zylindrischen Flächen entstanden sind. Um diese Idee zu überprüfen, wurden Vermessungsdaten untersucht, wobei der Schwerpunkt insbesondere auf der Visualisierung der Höhenkarte¹ (Abb. 2) lag, die die Kammhöhen der Gewölbe hervorhebt.

Die Ergebnisse zeigten, dass diese Kämme weder auf derselben Ebene noch entlang eines einzigen Umfangs liegen, wie es bei einer torusförmigen Konstruktion zu erwarten wäre. Direkte Messungen an der Punktwolke bestätigten diese Diskrepanz: Die Höhen liegen zwischen 4,83 m und 4,96 m, mit einer Gesamtabweichung von etwa 13 cm. Die meisten Joche weisen Abweichungen innerhalb von ± 2 –3 cm auf, mit der bemerkenswerten Ausnahme der Joche 5 und 6, wo eine stärkere Diskontinuität auftritt – wahrscheinlich das Ergebnis unterschiedlicher Bauphasen oder späterer struktureller Verformungen.

Um die Möglichkeit einer kreisförmigen Anordnung zu testen, wurde ein idealer Torus erzeugt, indem die aus radialen Schnitten des Rings gewonnenen Umfänge gemittelt wurden. Der Vergleich mit der Punktwolke ergab erhebliche Abweichungen, wobei nur ein kleiner Teil der Daten innerhalb von ± 5 cm lag. Dies bestätigte, dass die Gewölbe nicht aus einer ringförmigen Konstruktion abgeleitet waren. Ein weiterer Beweis ergab sich aus der Interpolation der Firstlinien zu einem achteckigen



h 1 =	4.854 m
h 2 =	4.845 m
h 3 =	4.874 m
h 4 =	4.896 m
h 5 =	4.833 m
h 6 =	4.927 m
h 7 =	4.953 m
h 8 =	4.965 m

Abb. 2: Oben: Numerisches Modell der Gewölbe; unten: Visualisierung der Höhenkarte und Analyse der Firsthöhe der vier-eckigen Gewölbe. Fotos (falls nicht anders gekennzeichnet): Autoren

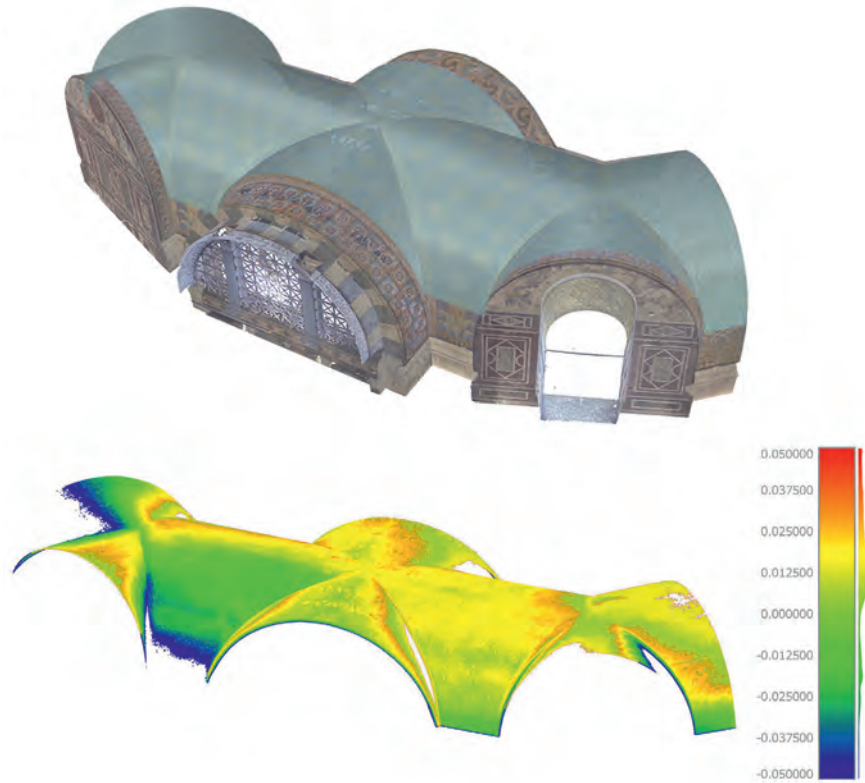


Abb. 3: Oben: Modellierung des Gewölbes mit viereckigem und dreieckigem Grundriss; unten: Abstand zwischen Punktwolke und Mesh innerhalb eines Bereichs von ± 5 cm.

Polygon, dessen Seiten im Durchschnitt 8,85 m lang waren – mit Ausnahme einer etwas längeren Seite von 8,99 m –, was mit dem ursprünglichen Grundriss der Kapelle übereinstimmt.

Nachdem die Torus-Hypothese ausgeschlossen worden war, konzentrierte sich die Analyse auf die Rekonstruktion der Gewölbe als Schnittpunkt zylindrischer Flächen. Für die viereckigen Joche wurden zwei Zylinder mit Radien von 2,52 m und 2,32 m identifiziert, deren Schnittpunkt die Profile der Rippen definierte. Die dreieckigen Joche erwiesen sich als komplexer und erforderten den Schnittpunkt von drei Zylindern: zwei mit einem Radius von 2,33 m, die an die viereckigen Gewölbe anschlossen, und

einen kleineren mit 1,99 m, um das dreieckige Joch mit dem Rest des Systems zu verbinden.

Die so erzeugten Idealmodelle wurden dann mit der Punktwolke verglichen und zeigten insgesamt eine starke Übereinstimmung mit Abweichungen von in der Regel ± 3 cm – Werte, die sowohl mit den Toleranzen mittelalterlicher Bauwerke als auch mit möglichen historischen Verformungen übereinstimmen. Einige Bereiche wiesen größere Abweichungen auf, insbesondere an den Verbindungsstellen zwischen dreieckigen und viereckigen Feldern, was auf eine gewisse Flexibilität bei der Ausführung und Anpassungen vor Ort während des Baus hindeutet (Abb. 3).

Aus konstruktiver Sicht werfen die Kreuzgewölbe des unteren Sechzehneckes interessante Fragen auf. Das Fehlen von Trennbögen lässt vermuten, dass die Gewölbe direkt auf das Mauerwerk gesetzt wurden, wobei modulare Zentrierungen wahrscheinlich für verschiedene Joche wiederverwendet wurden. Die Gleichmäßigkeit der Zylinderradien stützt die Hypothese, dass nur eine begrenzte Anzahl von Zentrierungsmodellen verwendet wurde, die jeweils an die spezifischen planimetrischen Anforderungen angepasst waren. Die generative Logik der Gewölbe beruht somit auf einem strengen geometrischen Prinzip – dem Schnittpunkt von Zylindern –, das entsprechend der Form der Joche moduliert wurde. Dies zeugt von einer bemerkenswerten Beherrschung der Baukunst, die in der Lage ist, einfache geometrische Schemata in ein komplexes und kohärentes System zu verwandeln, das sowohl der strukturellen Stabilität als auch der räumlichen Wirkung dient.

Die konischen Gewölbe des oberen Sechzehneckes

Nach der Analyse des Erdgeschosses richtete sich die Aufmerksamkeit auf die konischen Gewölbe des Sechzehneckes im Obergeschoss der Pfalzkapelle. Die geometrische Untersuchung verfolgte drei Ziele: die Identifizierung der theoretischen Referenzform, die für die Konstruktion des Gewölbes verwendet wurde, die Messung der Abweichung von der tatsächlich gebauten Oberfläche und die Einordnung dieser Lösung in den breiteren architektonischen Kontext der damaligen Zeit.

Um die Gültigkeit der konischen Hypothese zu überprüfen, wurden auch zwei alternative konoidale Oberflächen untersucht: eine, die durch eine kreisförmige vertikale Leitlinie und eine schräge Leitfläche definiert war, und eine andere, bei der eine solche Fläche gänzlich fehlte. In beiden Fällen ergaben die Vermessungsdaten eine weniger überzeugende Übereinstimmung als beim konischen Modell, das sich daher als dasjenige erwies, das am besten mit der gebauten Realität übereinstimmte.

Durch digitale Modellierung war es möglich, alle wesentlichen Elemente des Kegels präzise zu rekonstruieren: den

Scheitelpunkt (V), die zur Sprungebene geneigten Erzeugenden und die kreisförmige vertikale Leitlinie. So wurden die wichtigsten geometrischen Bezugspunkte identifiziert: die Achse des Kegels und die zugehörige Grundfläche [Olivier 1852; Salvatore 2012a; Salvatore 2012b]. Die Achse wurde durch Berechnung des Schwerpunkts eines Körpers bestimmt, der aus dem Schnittpunkt der konischen Fläche mit einer Kugel mit dem Scheitelpunkt als Mittelpunkt erhalten wurde, während die Grundfläche – obwohl nicht perfekt senkrecht zur Achse – als Ellipse erscheint. Durch Anwendung von Oliviers Methode und Rekonstruktion kreisförmiger Abschnitte war es möglich, die ursprüngliche Geometrie wiederherzustellen, die weitgehend mit der erfassten Punktwolke übereinstimmte (Abb. 4).

Diese geometrische Beschreibung des Gewölbes verdeutlicht, welche Elemente vor Ort materialisiert werden mussten, um die Form baubar zu machen, und unterstreicht ein überraschend hohes Maß an Meisterschaft in der Anwendung der Geometrie in der Baupraxis.

Die geneigten Tonnengewölbe

Eine ähnliche Analyse wurde an den angrenzenden geneigten Tonnengewölben durchgeführt, die zur achteckigen Kuppel hin zusammenlaufen. Obwohl diese Typologie auf den ersten Blick eher traditionell erscheint, zeigte die digitale Rekonstruktion charakteristische geometrische Merkmale und eine ausgefeilte Beherrschung konischer Formen.

Der erste Schritt bestand darin, die Aufsatzfläche zu identifizieren, indem die Punktwolke segmentiert wurde, um die gekrümmte Oberfläche von den vertikalen Wänden zu trennen. Anschließend wurde ein idealer Zylinder konstruiert, um die Oberfläche zu approximieren, die anhand von vertikalen und transversalen Schnitten relativ zum First analysiert wurde. Der transversale Schnitt erwies sich als kreisförmig, während der vertikale Schnitt elliptisch war, mit einer kleinen Halbachse, die dem Radius des Zylinders (2,61 m) entsprach, und einer großen Halbachse, die der vertikalen Höhe des Gewölbes (2,81 m) entsprach. Diese Konfiguration [Raabe et al. 2019] weicht

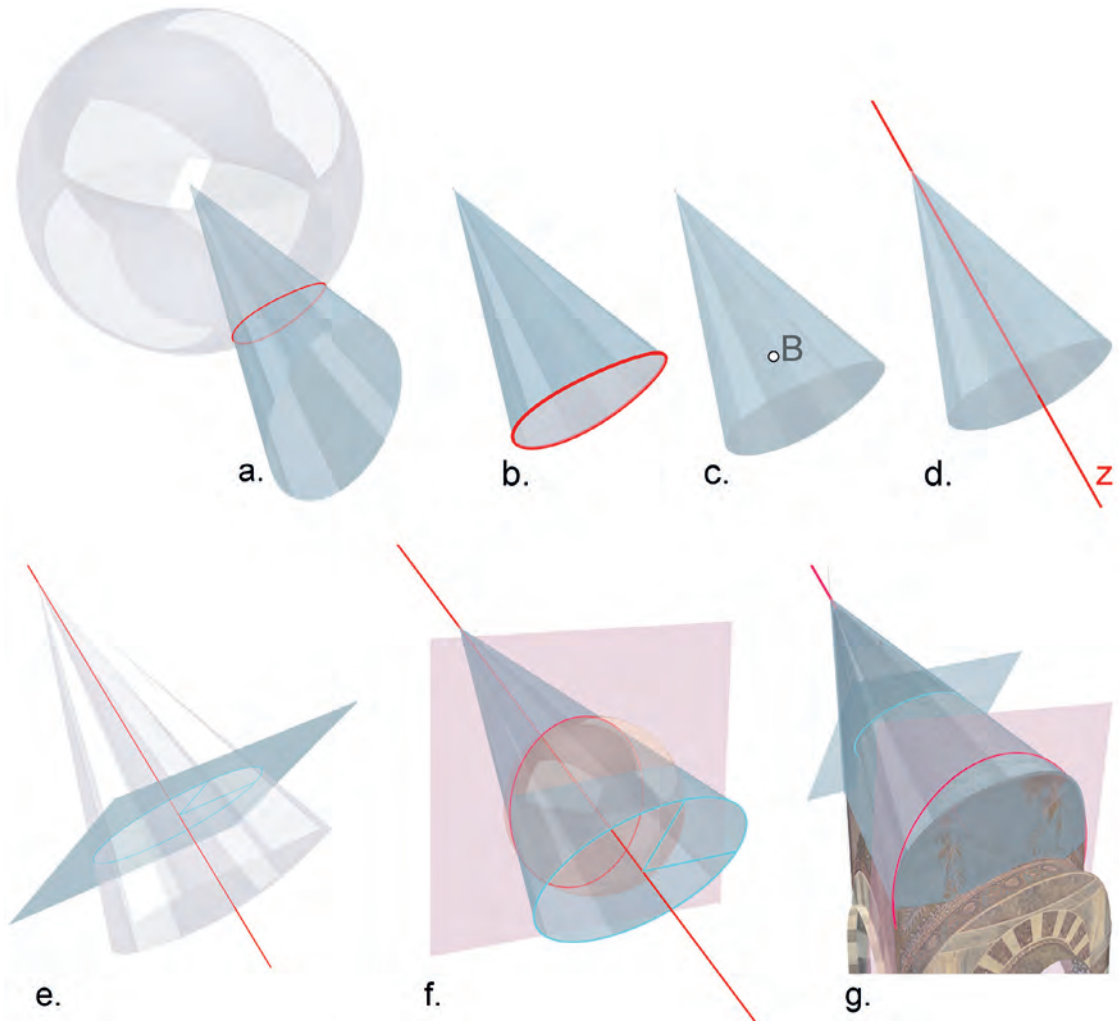


Abb. 4: Identifizierung der wichtigsten geometrischen Komponenten des Kegels. Von a. bis d., Konstruktion der Achse, e. Definition der Basis, f. Kreissektionen des Kegels, g. endgültige Rekonstruktion der Geometrie.

von der traditionellen Vorstellung von geneigten Gewölben als Übersetzung von Halbkreisen entlang einer geneigten Achse ab [Adam 2014 (Hrsg.), S. 189–211].

Die Rekonstruktion des Zylinders mit einer um $21,52^\circ$ geneigten Achse wurde mithilfe von Algorithmen zur

Formerkennung und Best-Fit-Algorithmen² erreicht [Bianchini et al. 2024]. Der erstgenannte Ansatz stieß aufgrund von Konstruktionsverformungen auf Schwierigkeiten, wodurch Teilzylinder mit lokalen Abweichungen entstanden. Die iterative Best-Fit-Methode ermöglichte jedoch die Definition eines einzigen geraden Zylinders,

wobei die Position der Achse, der Radius des Abschnitts und die Ellipse des Schnittpunkts mit der vertikalen Ebene bestimmt wurden.

Aus konstruktiver Sicht erforderte das Gewölbe, das aus heterogenen Sandstein- und Travertinblöcken errichtet wurde, eine anpassungsfähige Holzausrichtung. Die Verwendung einer vertikalen oder einer halbkreisförmigen Zentrierung führte zu Unterschieden in der Führungskurve: Erstere erzeugte einen elliptischen Abschnitt, während letztere einen geneigten Halbkreisbogen erzeugte. Die vor Ort gewählte Lösung, die wahrscheinlich auf einem geraden Zylinder und einer beweglichen Zentrierung basiert, die etwas kleiner als der Durchmesser des Gewölbes ist, deutet auf eine bewusste Designentscheidung und ein fortgeschrittenes Verständnis der geometrischen Eigenschaften von Kegelschnitten hin, die in der Baupraxis

angewendet werden, um sowohl Präzision als auch Kohärenz zwischen Entwurf und Ausführung zu gewährleisten.

Die Untersuchung der Gewölbe bot die Gelegenheit, die derzeit verfügbaren Strategien zu erkunden, mit dem Ziel, den vollen Informationswert der gesammelten Daten wiederherzustellen. Von der Anwendung von Algorithmen zur Formerkennung und Best-Fit-Algorithmen bis hin zum Einsatz traditionellerer mathematischer Modelle zeigt das Spektrum der Möglichkeiten, dass die Erforschung der Architekturgeschichte nicht mehr von fortschrittlichen Analysemethoden getrennt werden kann. Diese Werkzeuge ermöglichen nicht nur die Bearbeitung langjähriger Fragen, sondern eröffnen auch neue Untersuchungsansätze und Perspektiven und decken unerwartete Aspekte auf, die in der Struktur architektonischer Konstruktionen verborgen sind.

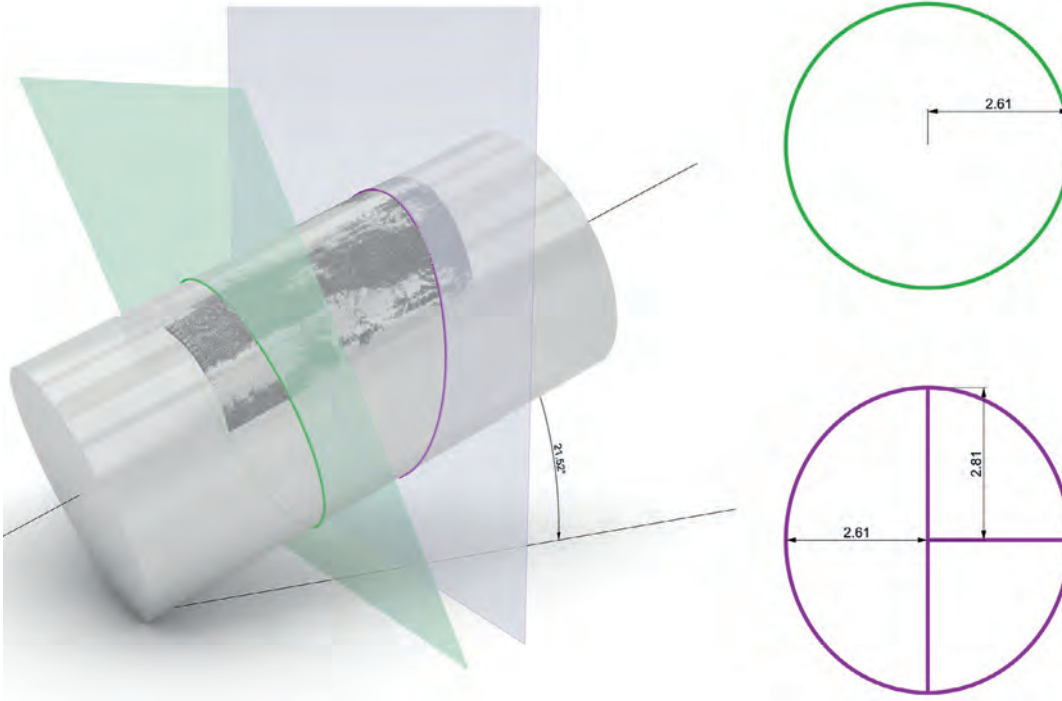


Abb. 5: Rekonstruktion des theoretischen Zylinders mit dem kreisförmigen geneigten Abschnitt und dem ellipsoiden vertikalen Abschnitt.

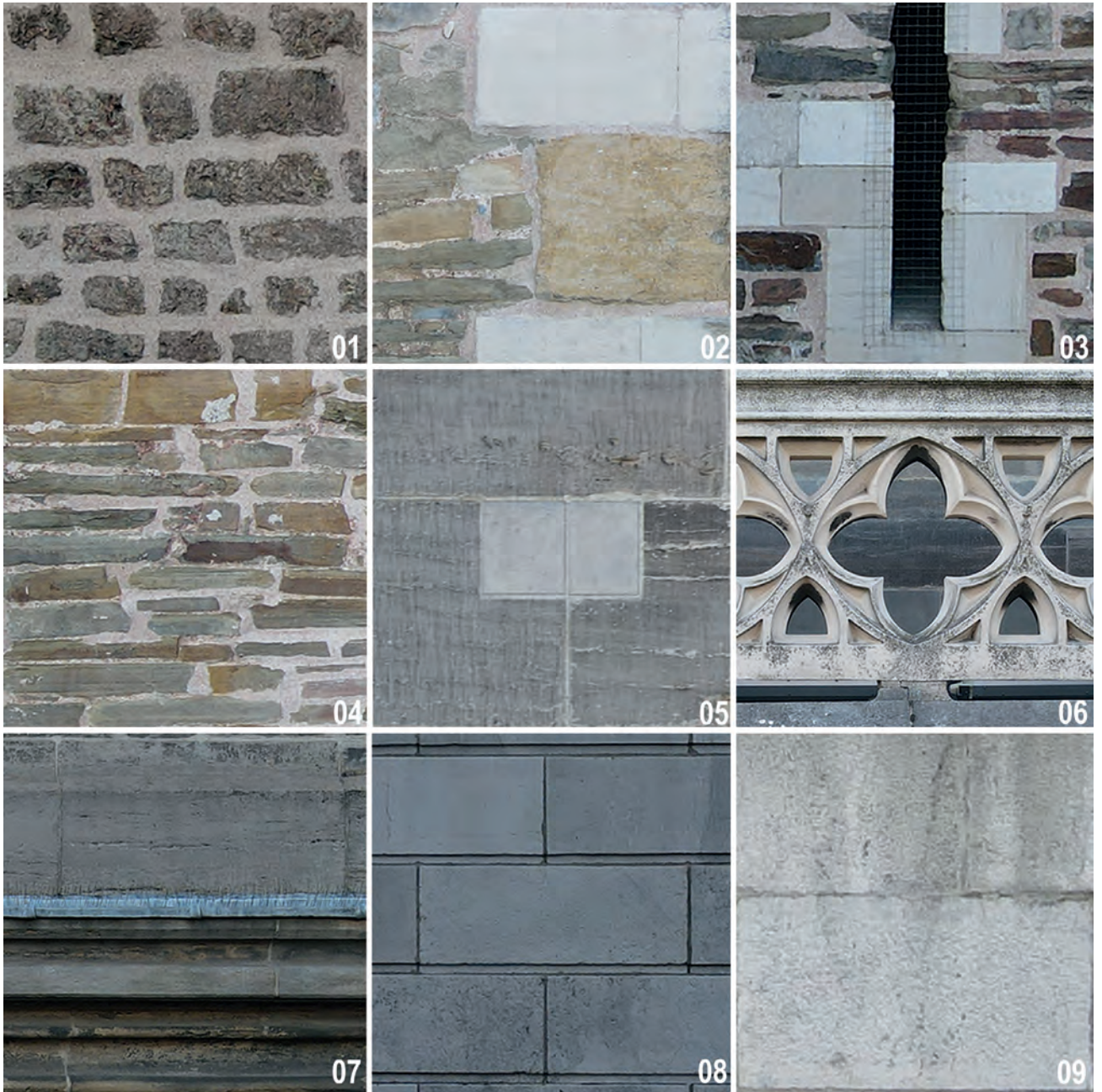


Abb. 6: Fotokatalog der Materialien und Mauerwerkstechniken des Westwerks.

Experimente mit maschinellem Lernen zur Oberflächenkartierung

Neben den geometrischen Untersuchungen befasste sich ein zweiter Forschungsweig mit der Anwendung von Algorithmen des maschinellen Lernens auf die Punktwolken des gesamten Komplexes. Ziel war es, eine semantische Klassifizierung zu entwickeln, mit der architektonische Elemente, Materialien [Maintz 2009, S. 81; Heckner & Beckmann 2012, S. 100] und die Bautechniken des Westwerks automatisch erkannt werden können.

Die Untersuchung verfolgte die verschiedenen historischen Phasen zurück, identifizierte die Materialien und unter-

schied die wichtigsten Steinsorten, die im Mauerwerk verwendet wurden – geschnitten, behauen und eingesetzt (Abb. 6). Die Außenflächen des Aachener Doms erscheinen wie ein echtes bauliches Palimpsest: Die der Pfalzkapelle wirken kompakt und massiv, nur unterbrochen von schmalen Schlitzfenstern, während die gotischen Anbauten durch eine größere Offenheit gekennzeichnet sind, die durch Fenster, Loggien und Balkone zum Ausdruck kommt. Architektonische und skulpturale Elemente, die sich über die Außenflächen verteilen, zeugen von handwerklichem Können und einer bemerkenswerten Präzision bei der Montage vor Ort. Auch die Dächer bereichern die Vielfalt des Komplexes, indem sie Kuppeln mit geneigten Dächern abwechseln.

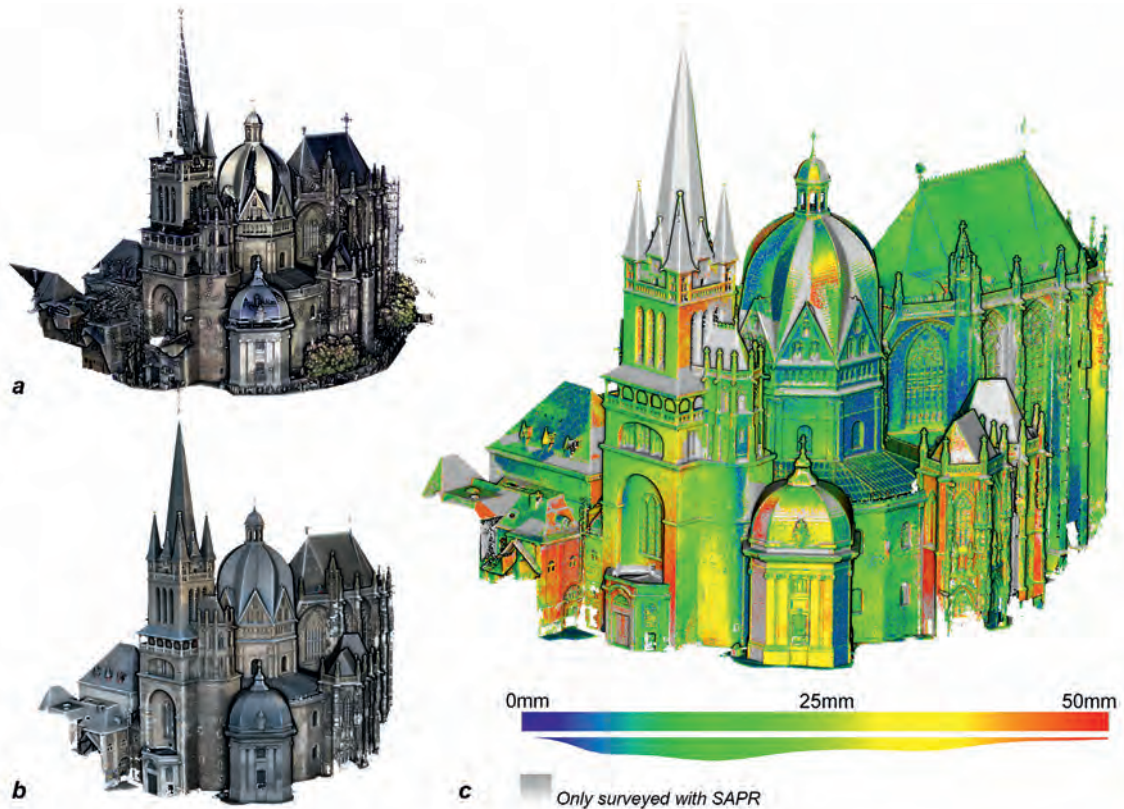


Abb. 7: Vergleich der Vermessungsdaten: a. LIDAR-Punktwolke; b. aus fotogrammetrischen Verfahren abgeleitete Punktwolke; c. Berechnung des Abstands zwischen den Punktwolken.

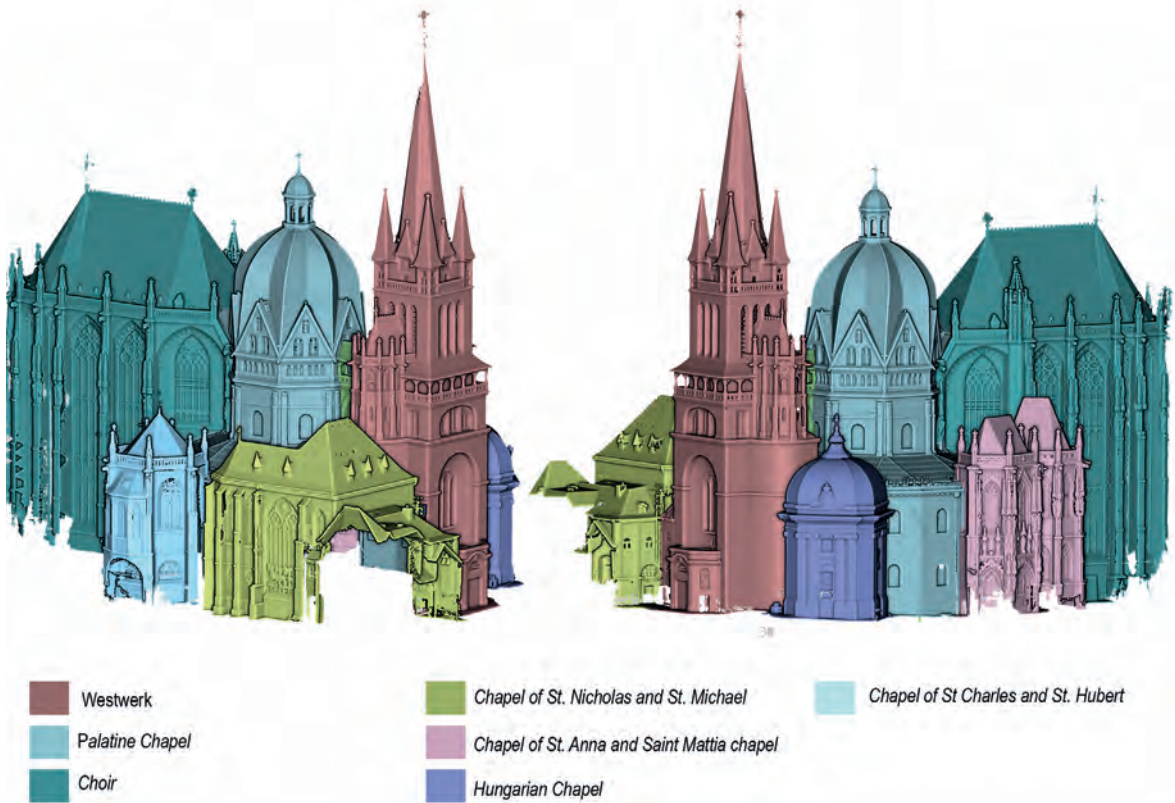


Abb. 8: Identifizierung der sieben homogenen Datensätze für die semantische Klassifizierung.

Die identifizierten Bautechniken umfassen ein breites Spektrum, von Mauerwerk aus kleinen, regelmäßigen Blöcken mit dicken Mörtelfugen über quadratische Blöcke mit dünnen Fugen bis hin zu gemischtem Mauerwerk, bei dem unregelmäßige Steine mit regelmäßigen abwechseln und oft mit dekorativen Schnitzereien verziert sind. Die Schächte der Pilaster bestehen aus quadratischen Platten, während die raffiniertesten Elemente aus fein geschnitzten Blöcken bestehen.

Das Experiment stützte sich auf Vermessungen des gesamten Denkmals, wobei die mit einem statischen Laserscanner erfasste Punktwolke mit der durch Fotogrammetrie gewonnenen (rund 3.000 Bilder) verglichen wurde.

Letztere, die mit einer Auflösung von 1 cm neu abgetastet wurde, erwies sich als homogener in der Punktverteilung und reichhaltiger an radiometrischen Details, wodurch sie sich besonders gut für die Aufbereitung von Daten zur Klassifizierung eignete (Abb. 7).

Für das Training und die Vorhersage wurde das Gebäude in sieben homogene Zonen unterteilt: das Westwerk, die Pfalzkapelle, den gotischen Chor, die Karls- und Hubertuskapelle, die Michaels- und Nikolauskapelle, die Annakapelle, die Matthiaskapelle sowie die Ungarnkapelle (Abb. 8). Durch die semantische Klassifizierung wurde die Punktwolke mit Informationen zu architektonischen Komponenten, Materialien und Bautechniken angereichert.

Die Vorbereitung des Datensatzes umfasste Rauschunterdrückung, Punktdezimierung und Unterteilung in überschaubare Teile, um die Berechnung zu optimieren. Der Random-Forest-Algorithmus [Grilli et al. 2019] wurde separat auf jeden Datensatz angewendet, nachdem die Klassen manuell annotiert und repräsentative geometrische Merkmale wie Oberflächennormalen, Gradienten und Krümmungen ausgewählt worden waren (Abb. 9).

Der manuell segmentierte und klassifizierte Teil bildete die Trainingsgrundlage für den Algorithmus und umfasste Dächer, vertikale Strukturen, Gebälke, Brüstungen,

Öffnungen, Fenster und dekorative Elemente. Das Training umfasste die Unterteilung in Trainings- und Testbereiche zur Leistungsbewertung: Die Vorhersagegenauigkeit erreichte 96 % für die Pfalzkapelle, 99 % für das Westwerk und 90 % für den gotischen Chor.

Auf dieser Grundlage wurde eine weitere Klassifizierung der Mauerwerkstechniken im Westwerk vorgenommen, wobei zwischen kleinen Blöcken mit 2–4 cm großen Mörtelfugen, quadratischen Blöcken mit dünnen Fugen und behauenen Blöcken für dekorative Elemente unterschieden wurde (Abb. 10).

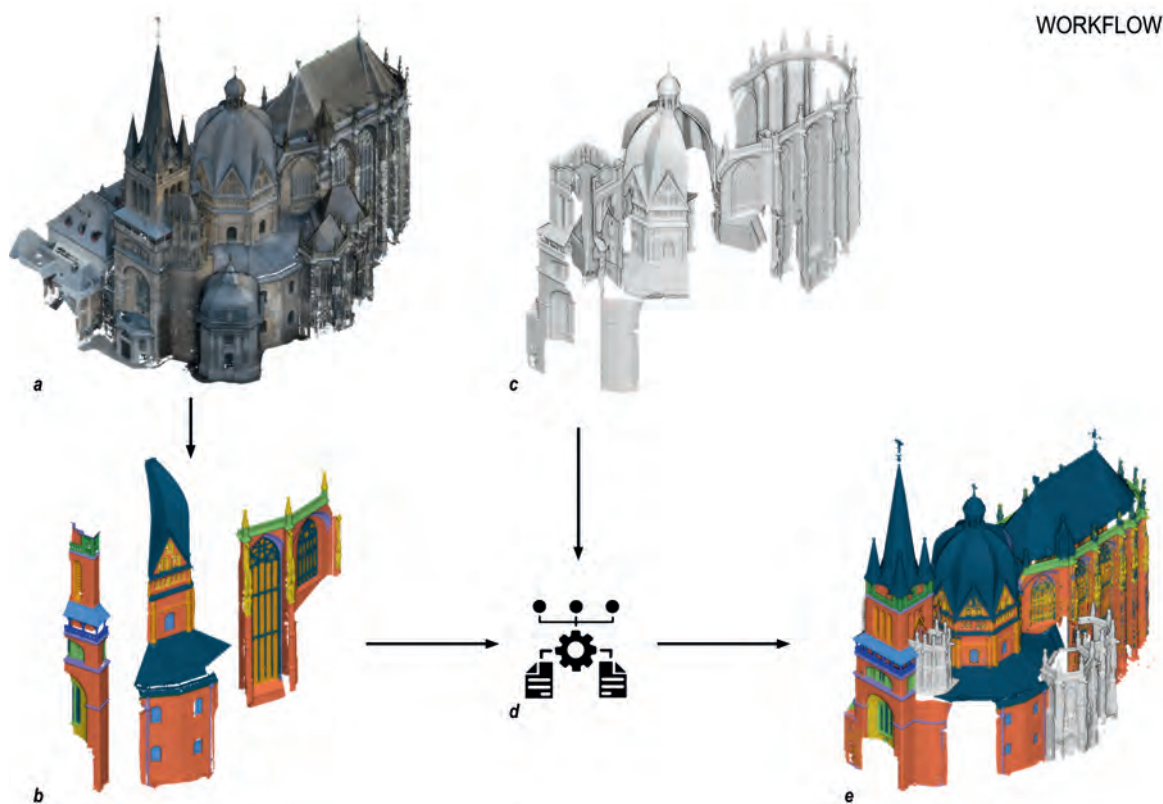


Abb. 9: Workflow-Diagramm für die geometriebasierte Segmentierung der Fallstudie: a. Eingabedatensatz; b. manuell annotierte signifikante Teile des Datensatzes; c. verbleibender nicht klassifizierter Teil der Punktwolke; d. Training des Vorhersagemodells; e. Ausgabe des Vorhersagemodells dargestellt als klassifizierte Punktwolke.

Dieses mehrstufige Experiment [Teruggi et al. 2020] ergab eine nach Flächen klassifizierte Punktwolke, die das Ausmaß der wichtigsten Bautechniken und Bestandteile auf den Oberflächen anzeigt. Eine solche Kartierung kann als äußerst wertvolles Instrument dienen, sowohl für die Verbreitung des über das Denkmal gewonnenen Wissens als

auch für die Unterstützung der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen an den Mauerwerksoberflächen. Letztendlich soll dieses Ergebnis die traditionellen 2D-Oberflächendarstellungen ergänzen und Informationen über die räumliche Verteilung der kartierten Klassen liefern.

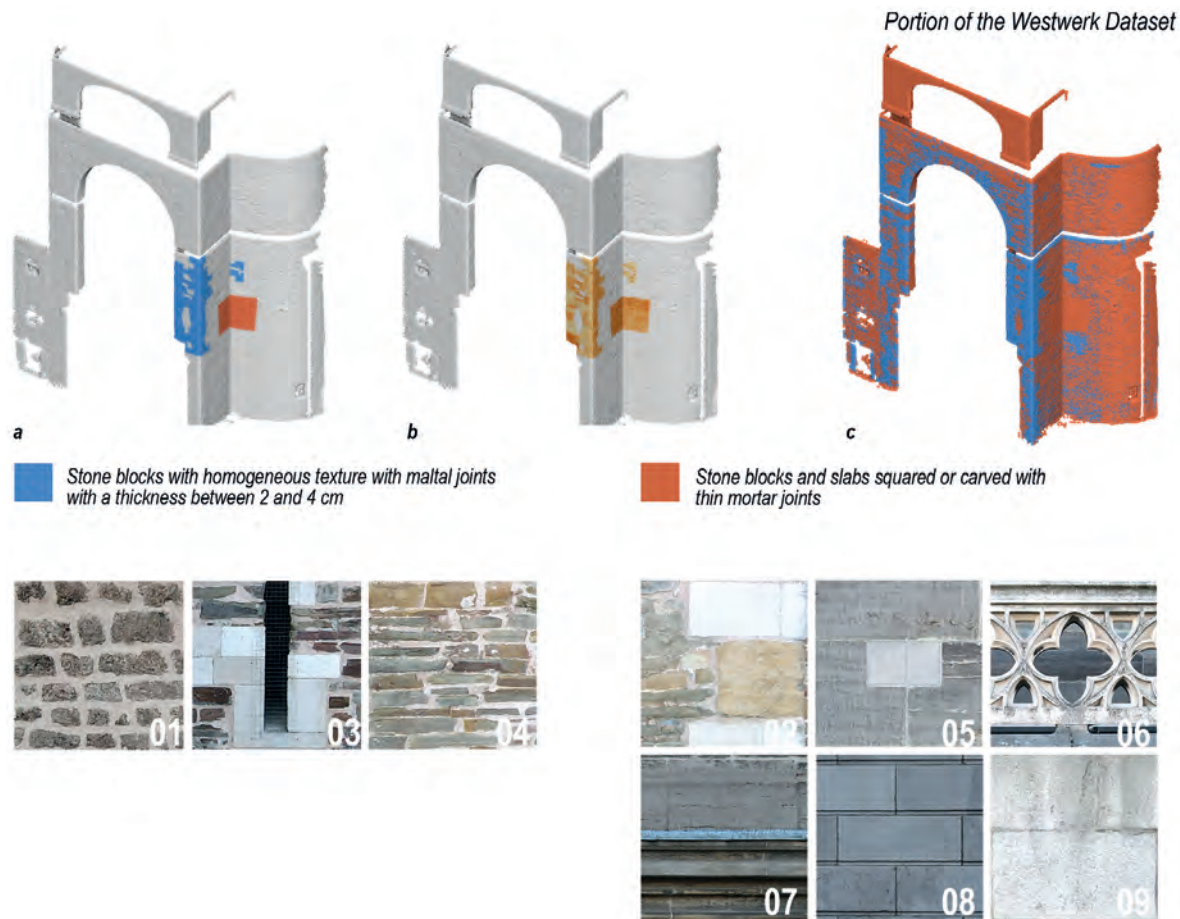


Abb. 10: Manuelle Annotation des Punktwolkenabschnitts, der als Training für die Erkennung von Bautechniken verwendet wurde, und das Ergebnis der automatischen Klassifizierung durch das Vorhersagemodell: a. Erkennung von Bautechniken und manuelle Annotation auf dem Punktwolkenabschnitt; b. Extraktion von Intensitätsdaten als Merkmal; c. Ausgabe der Vorhersage der Bautechnik.

Fazit

Die an der Kathedrale durchgeführten Studien, bei denen geometrisch-konstruktive Analysen mit digitalen Methoden zur Punktwolkenklassifizierung kombiniert wurden, zielen darauf ab, sowohl das Verständnis der frühmittelalterlichen Architektur als auch die Verwaltung dreidimensionaler Vermessungsdaten voranzubringen. Die Untersuchung der Gewölbe offenbarte eine außergewöhnliche Beherrschung der Geometrie im Bauwesen: Digitale Analysen und Modellierungen auf der Grundlage von Formerkennung und Best-Fit-Algorithmen ermöglichten die präzise Rekonstruktion der ursprünglichen Geometrien und zeigten, dass die Entwurfslösungen Teil eines kohärenten und sorgfältig kontrollierten Programms waren. Dies stützt die Hypothese eines einzigen Konstrukteurs – in den Quellen als Odo von Metz identifiziert –, der über für seine Zeit fortgeschrittene geometrische Kenntnisse verfügte und in der Lage war, römische und byzantinische Traditionen von der Konzeption bis zur Realisierung in einem einheitlichen Bauwerk zu integrieren. Die kompositorische Analyse der Gewölbe brachte auch innovative Merkmale ans Licht, wie beispielsweise die dynamische Beziehung zwischen den Räumen des Sechzehneckes und dem Luftraum des Oktogons, und eröffnete neue Interpretationsperspektiven hinsichtlich der Rolle der mittelalterlichen praktischen Geometrie als Vehikel für fortgeschrittenes Wissen [Bianchini 1995], das durch mündliche Überlieferung und handwerkliche Praxis weitergegeben wurde.

Gleichzeitig ermöglichte die Anwendung von Algorithmen des maschinellen Lernens auf die Punktwolken des gesamten Komplexes eine architektonische Segmentierung und die Identifizierung von Materialien und Bautechniken mit bemerkenswerter Präzision. Die semantische Segmentierung erleichterte die Klassifizierung von architektonischen Komponenten, Mauerwerk und dekorativen Elementen, während die Integration von geometrischen, radiometrischen und RGB-Informationen die Vorhersagekraft der Modelle verbesserte. Die Ergebnisse bestätigen die Wirksamkeit dieses Ansatzes und bieten eine thematisierte digitale Darstellung der Kathedrale, die sowohl für die

wissenschaftliche Forschung als auch für die Erhaltung des Kulturerbes nützlich ist. Die Klassifizierung der Mauerwerkstechniken offenbarte Bauweisen und lieferte Einblicke in die Bauphasen und die Verteilung der Materialien im Laufe der Zeit. Auf diese Weise trägt das Experiment zu einer fundierteren Verwaltung der Kathedrale bei und unterstützt die Überwachung der Restaurierung und die Wartungsplanung durch punktwolkenbasierte Informationssysteme.

Die Ergebnisse präsentieren somit eine ganzheitliche Sichtweise auf die Kathedrale, die Geometrie, Materialien, Techniken und Baugeschichte miteinander in Beziehung setzt. Sie zeigen, wie die zeitgenössische Forschung das historische Erbe nicht nur als materielles und künstlerisches Zeugnis, sondern auch als Archiv technischen und geometrischen Wissens betrachten kann, und bieten neue Interpretations- und Verwaltungsrahmen, die die Baugeschichte mit den Grenzen der digitalen Analyse und methodischen Innovation verbinden.

-
- 1 *Die Höhenkarte in Autodesk ReCap ermöglicht es, jedem Punkt in der Punktwolke entsprechend seiner Höhe relativ zu einer Referenzachse einen Farbwert zuzuweisen. Das Werkzeug generiert keine unabhängige metrische Analyse, sondern liefert eine farbcodierte Darstellung, die die visuelle Identifizierung von Höhenunterschieden oder lokalen Verformungen erleichtert.*
 - 2 *Best-Fit-Algorithmen sind Optimierungsverfahren, die die Parameter eines Modells schätzen, um die Differenz (Fehler) zwischen den beobachteten Daten und dem Modell selbst zu minimieren. Im Falle von Punktwolken werden sie verwendet, um geometrische Formen oder Oberflächen nach einem optimalen Approximationskriterium an die gemessenen Daten anzupassen. Der zylindrische Best-Fit-Algorithmus wurde im Rahmen der Doktorarbeit von Flavio Carnevale (National PhD in Heritage Science, Sapienza-Universität di Roma, Betreuer: Prof. Carlo Bianchini) entwickelt und getestet.*

Literaturverzeichnis

- Adam, J.-P. 1994. *L'arte di costruire presso i Romani. Materiali e tecniche* (M. P. Guidobaldi, Trad.; pref. di M. Torelli; ediz. illustrata). Milano: Longanesi.
- Attneni, M., Barni, R., Bianchini, C., Griffo, M., Inglese, C., Ley, Y., Pritchard, D., Villa, G., 2023. The vaulting system of the Palatine Chapel: the Aachen Cathedral World Heritage Site documentation project. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-2-2023, Atti del convegno CIPA 2023 – Documenting, preserving, understanding Cultural Heritage: Humanities and Digital Technologies for Shaping the Future, Firenze: 25–30 giugno, pp. 119–128.
- Attneni, M., Barni, R., Bianchini, C., Griffo, 2024. Sperimentazioni di *Machine Learning* per la mappatura della Cattedrale di Aachen. *Disegnare Idee Immagini* n. 68/2024, pp. 72–89.
- Bianchini, C. 1995. Tecniche medievali di rilevamento. *Disegnare Idee Immagini*, 18, 21–28.
- Bianchini C., 2024. Sulle unghie coniche della Cappella Palatina di Aachen / The conical vaults in the Palatine Chapel in Aachen. *Disegnare Idee Immagini* n. 68, pp. 56–71.
- Bianchini, C., Carnevale, F., Griffo, M., 2024. Algoritmi di best fit applicati allo studio dell'architettura storica. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (eds) *Measure|Out of Measure. Transitions*. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 879–898. ISBN: 9788835166948.
- Grilli E., Özdemir E., Remondino F., 2019. *Application of machine and deep learning strategies for the classification of heritage point clouds*. In *proceeding of The international ISPRS Geospatial Conference 2019, University of Tehran*.
- Knopp G., 2022. *Die gotische Chorhalle des Aachener Doms und ihre Ausstattung: Baugeschichte, Bauforschung, Sanierung*. Michael Imhof Verlag,
- Maintz H., 2009. *Dombaumeistertagung in Aachen*. Aachen: Thouet Verlag, p. 81.
- Olivier T. 1852. *Cours de Géométrie descriptive, première partie, Du point, de la droite et du plan*. Carilian-Goelry Vor Dalmont, Paris, 1852, pp. 199–202.
- Pieper, J., Schindler, B., 2017. *Thron und Altar, Oktogon und Sechzehneck. Die Herrschaftsikonographie der karolingischen Pfalzkapelle zu Aachen*. Berlin, Geymüller Verlag für Architektur.
- Raabe C., Trautz M., Di Pumpo C., 2019, *Karolingische Tonnengewölbe im Aachener Dom. Baugeschichte, Konstruktion und Technik*, RWTH publications, DOI: 10.18154/RWTH-2019-01489.
- Salvatore, M., 2012a. Il cono, i suoi assi, le sue sezioni piane, da Apollonio alla rappresentazione matematica. In Laura Carlevaris, Laura De Carlo, Riccardo Migliari (a cura di), *Attualità della geometria descrittiva*. Roma: Gangemi Editore, pp. 315–324. ISBN 978-88-492-2305-7.
- Salvatore, M., 2012b. La stereotomia scientifica in Amédée François Frézier: prodromi della geometria descrittiva nella scienza del taglio delle pietre. Firenze:Firenze University Press, 2012, pp. 151–154.
- Siebig H.K., 2000. *Die Ungarnkapelle am Dom zu Aachen. Bauliche Sanierungsmaßnahmen an der Ungarnkapelle des Domes zu Aachen in den Jahren 1991–1994* (= Schriftenreihe des Karlsverein-Dombauvereins. Band 3). Aachen: Thouet.
- Teruggi S., Grilli E., Russo M., Fassi F., Remondino F., 2020. A Hierarchical Machine Learning Approach for Multi-Level and Multi-Resolution 3D Point Cloud Classification. *Remote Sensing* 12, no. 16: 2598. <https://doi.org/10.3390/rs12162598>.
- Heckner U., Beckmann E.M., 2012. *Die karolingische Pfalzkapelle Aachen*. Landschaftsverband Rheinland / LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland.