

Die Wies im Blick des Tragwerkingenieurs

«Wieskirche wegen Einsturzgefahr gesperrt, Tiefflieger zerstören Bayerns berühmte Wallfahrtskirche». Als diese Schlagzeilen im Herbst 1984 durch die Presse gingen, bewirkten sie bei den Fachleuten aus der Bau- und Kunstgeschichte geringere Aufregung als bei den interessierten Zeitungslesern aus allen Teilen der Bevölkerung. Daß die Wies nicht im besten Zustand war, wußten die Fachleute, die sie immer wieder in Augenschein genommen hatten, schon länger. Als jetzt aber die Zeitungen berichteten, Tiefflieger hätten der Wies so heftig zugesetzt, daß sie kurz vor dem Einsturz stehe, war das eher ein «Skandal» nach dem Geschmack der Sensationspresse.

So falsch diese Meldung bei genauerer Betrachtung auch gewesen sein mag, im Nachhinein hat sie sich als die Initialzündung für alle folgenden Schritte erwiesen, die letztendlich dazu geführt haben, daß die Wies heute, sechs Jahre danach, in einem Zustand vorgefunden werden kann, den damals kaum jemand zu erhoffen gewagt hatte. Jetzt war die Wies plötzlich in der Presse, jetzt gab es eine öffentliche Meinung, jetzt waren die Politiker aufgefordert, sich einzusetzen.

Daß die Geschichte mit den Tieffliegern sich sehr bald als völlig haltlos herausstellte, sei vorab festgehalten. Ebenso kann vorausgeschickt werden, daß die angebliche Einsturzgefahr heftig übertrieben war.

Das Schadensbild

Nun, was war geschehen? Ein Brocken aus dem Deckenputz war in den Kirchenraum gestürzt, groß genug, einen Menschen zu erschlagen und damit auch Anlaß genug, die Kirche zu sperren. Daß die Decke geschädigt war, konnte ja mit bloßem Auge an der Menge der Risse erkannt werden. Und daß der darüberliegende Dachstuhl vielleicht die Ursache für die Risse war und womöglich demnächst einstürzen könnte, war dem beobachtenden Laien eine naheliegende Befürchtung.

Die Erzählung, daß der besagte Putzbrocken justament in einem Augenblick aus der Decke gefallen sei, als ein Tiefflieger mit Überschallknall an der Wies vorbeigeflogen war, mag ein Gerücht sein. Vermutungen über derartige Zusammenhänge tragen zur Legendenbildung bei, können aber aus der Sicht des Ingenieurs in diesem Fall unterstützt werden. Es ist nach jetzigem Stand der Erkenntnisse denkbar, daß ein Überschallknall der letztendliche Auslöser für das Herausbrechen eines Putzbrockens aus der Decke gewesen sein kann, aus einer Decke freilich, die stellenweise derart marode war, daß dazu die geringste Erschütterung genügte, der berühmte Tropfen, der das volle Faß zum Überlaufen bringt.

Bleiben wir chronologisch: Der Kirchensperrung infolge des oben beschriebenen Putzabsturzes folgte neben der aufgeregten Pressemeldung umgehend das statische Gutachten. Dieses stellte als erstes fest, daß die vermeintliche Einsturzgefahr heftig übertrieben war. Der hölzerne Dachstuhl zeigte sich in bestem Zustand ohne Schadstellen durch Fäulnis oder Schädlingsbefall und in der Substanz unverändert, also fast «wie neu». Erschreckend war der Zustand der Deckenschale: fingerbreite Ris-

se entlang des Deckenrandes und senkrecht dazu, hohlliegende Putzflächen, herausgebrochene Putzbrocken, die auf einem Gesims über dem Kirchenraum lagen (und auf den nächsten Überschallknall warteten).

Das Gutachten nannte als Gründe für die Deckenschäden die mangelhafte Ausführung bei der Herstellung und die jahrhundertelange Korrosion bei den Nagelanschlüssen. Statische Ursachen wurden nicht angeführt, statisch-dynamische wie der vorgenannte Überschallknall lediglich als Möglichkeit angedeutet. Offen blieb die Frage, ob nicht die ganz normalen Bewegungen des Dachstuhls, die horizontalen Verformungen bei Windbelastung, das vertikale Setzen durch Kriech- und Schwindbewegungen und vielleicht auch Temperaturschwankungen einen Einfluß auf die Decke haben könnten.

An dieser Stelle setzte das Interesse des Verfassers an, der sich mit der vereinfachten Haltung der statischen Interpretation nicht zufrieden geben wollte und Zusammenhänge jenseits der fachgebundenen Denkweise nach DIN und Statiklehrbuch vermutete. So entstand am Lehrstuhl für Hochbaustatik und Tragwerksplanung der Technischen Universität München (Prof. Grimme) eine Dissertation mit dem etwas umständlichen Titel «Über die Wechselwirkungen zwischen den Holzkonstruktionen von Dach und Decke bei barocken Bauten, Untersuchungen am Beispiel der Wallfahrtskirche in der Wies».

Was passiert, wenn sich ein Bauingenieur mit Arbeitsschwerpunkt Tragwerksplanung (landläufig Statiker genannt) mit einer Konstruktion, wie sie in der Wies vorhanden ist, befaßt? Genauer: Wie stellt der Statiker Berechnungen an zu einem Bauwerk, das offensichtlich heutigen Normen nicht genügen kann (und soll!) und mit den gängigen Ansätzen kaum erfassbar ist? Und weiter: Wie geht der Statiker dann um mit einem Dachstuhl, der aus groben Balken konstruiert wurde, zusammengefügt mit Versätzen, Blattungen und Holznägeln? Wie berechnet er eine Decke aus Kalkputz, vermischt mit Kälberhaaren, aufgetragen auf einer kaum durchschaubaren Konstruktion aus Latten und Brettern? All das soll im folgenden beschrieben werden, zusammen mit der Zielrichtung der Untersuchungen, den Zwischen- und Endergebnissen, den Rechenmodellen zur wirklichkeitsnahen Erfassung der Tragweise und den Schlußfolgerungen für das Bauwerk. Zunächst aber noch zur Geschichte und Bauweise, an dieser Stelle durch die Brille des Tragwerkingenieurs.

Die Geschichte

Dominikus Zimmermann baut die Wies im Auftrag des Prämonstratenserklosters Steingaden 1745–49. Zwei besondere Randbedingungen sind von wesentlichem Einfluß auf die Entstehung des typischen Barockbaus. Die erste ist die Situation in der Landschaft, der Bauplatz auf der grünen Wiese. Keine Vorgaben bestehender Gebäude zwingen zum Barockisieren, es kann ein durch und durch reiner echter Barockbau entstehen. Die zweite ist der vorgegebene Zeitdruck, der geradezu frappierend an die heutigen Zustände im Bauwesen erinnert. Die Wies

sollte nämlich noch rechtzeitig zur Fünfhundertjahrfeier der Prämonstratenser in Steingaden fertig werden, als überwältigendes Geburtstagsgeschenk sozusagen.

Der Zeitdruck führte zur Ausführung einer «schnellen» Konstruktion unter Rückgriff auf Erfahrungen vorheriger Projekte. Zimmermann lehnt sich an zwei Konzepte an, die er bereits bei zwei früheren Projekten angewandt hat. Der Grundriß (seine Kenntnis sei an dieser Stelle vorausgesetzt) erinnert an die Wallfahrtskirche in Steinhausen (1727–32), das Deckengewölbe entspricht in der Bauweise dem der Frauenkirche in Günzburg (1736–41).

Die Bauweise

Die Außenwände der Wies sind bis zur Traufe gemauert, zum Teil mit Wandstärken bis zu einem Meter. Auf ihnen und einem Kranz von acht Säulenpaaren im Kirchenraum ist der Dachstuhl aufgesetzt, ein Kehlbalckendach mit zweigeschossigen liegenden Stühlen in jeder zweiten oder dritten Sparrenachse, das im Hauptdach fast 18m überspannt. Die Stühle sind untereinander mit Riegeln auf Höhe der Kehlbalcken verbunden, an diese schließt die Längsaussteifung durch Kopfbänder bzw. Andreaskreuze an. Mittig in jedem Stuhl ist eine vertikale Hängesäule angeordnet, die im obersten Geschoß über ein Sprengwerk auf den obersten Stuhl abgelastet wird.

Unter der Dachkonstruktion hängt eine verputzte hölzerne Deckenschale. Ihre Bauart erinnert an den Bootsbau. Gekrümmte Bohlenrippen, vergleichbar mit den Bootsspannen, laufen parallel zu den Kehlbalcken des Dachstuhls bzw. an den Stirnseiten senkrecht dazu. In den ausgerundeten «Ecken» stehen sie entsprechend schräg im Grundriß und sind aneinander geschifft. Diese Bohlenrippen bilden das Gerüst, die flächige «Beplankung» geschieht mit von unten vernagelten trapezförmigen Holzlaten. Die Fugen zwischen den Laten öffnen sich konisch nach oben und bieten so dem von unten angebrachten Putz für die Fresken und der Stukkatur einen guten Halt. Der Deckenputz ist eine Mischung aus Kalkmörtel und Kälberhaaren, also eine Art faserbewehrter Verbundbaustoff.

Die Konstruktion der Holzschale stellt eine Besonderheit dar, da die stehenden hölzernen Bohlenrippen (Spannen) einer Bauweise entsprechen, die bereits im 16. Jahrhundert in Frankreich von Philibert de l'Orme erfunden wurde. Der de l'Orme'sche Bohlenträger, ein Bogen aus zwei oder drei Lagen versetzt genagelter Brettstücke, wurde damals beim Bau von Tonnendä-

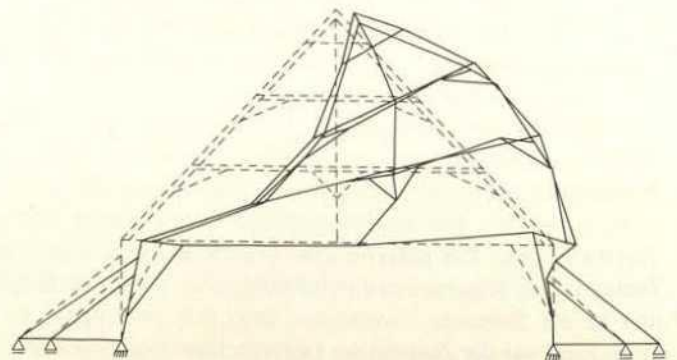
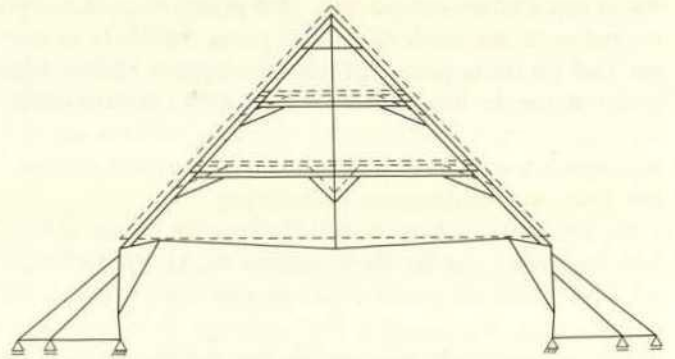
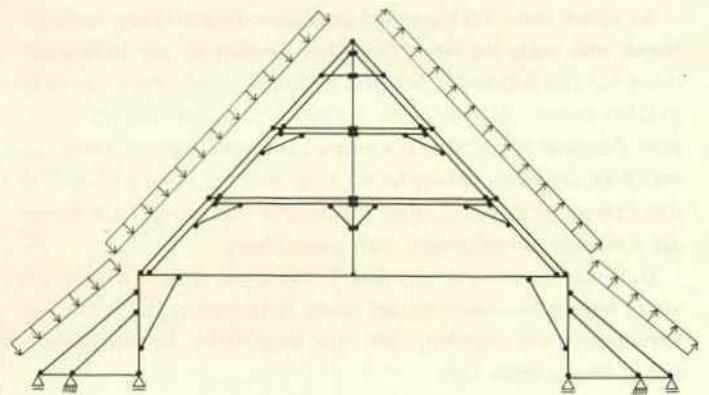
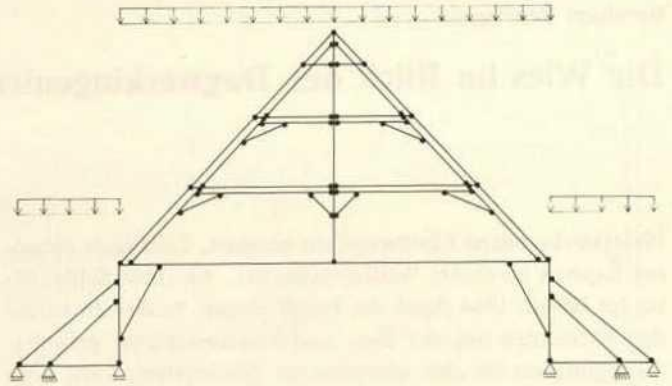


Abb. 1. Stabwerksystem Dachstuhl, vertikale Last

Abb. 2. Stabwerksystem Dachstuhl, Windlast

Abb. 3. Verformung aus vertikaler Belastung (überhöht)

Abb. 4. Verformung aus Windlast (überhöht)

Fig. 1. Framework system of the roof structure, vertical load

Fig. 2. Framework system of the roof structure, wind load

Fig. 3. Deformation caused by vertical load (excessive)

Fig. 4. Deformation caused by wind load (excessive)

chern mit fast zwanzig Metern Spannweite verwendet. Etwas verwegene Entwürfe zu Kuppeln mit fünfzig Metern Spannweite sind überliefert (Kloster Montmartre), wurden aber nicht in dieser Weise ausgeführt. Ob die barocken Baumeister (diese Bauweise taucht nicht nur bei Dominikus Zimmermann auf) de l'Ormes Erfindung kannten oder diese eigentlich naheliegende Idee für den Bau gekrümmter Träger selbst hatten, weiß man nicht. Sicher ist, daß durch den Einsatz der Bohlenträger als beliebig gekrümmte, statisch wirksame Bauteile eine frei geformte, bereichsweise statisch selbsttragende Deckenkonstruktion entstehen konnte, die als eigenständiges statisches Element wirkt, als «Deckenschale». Die Schalentragswirkung dabei kommt im wesentlichen durch den flächig wirkenden Putz und dessen Verbund mit den Latten und damit der Holzkonstruktion zustande, wesentlich für die Steifigkeit der Schale ist neben deren Geometrie deshalb vor allem die Dicke der Putzschicht und die Materialkennwerte des Putzes. In jedem Fall ist zu erwarten, daß die statisch wirkende Deckenschale mit der darüberliegenden Dachstuhlkonstruktion, mit der sie verbunden ist, statisch zusammenwirken und aus dieser auch Lasten übernehmen wird.

Statische Berechnungen

Systeme

Zur Klärung des Tragverhaltens der beiden Tragwerke «Dachstuhl» und «Deckenschale» sind beide Systeme getrennt betrachtet und berechnet worden. Der wesentliche Grund für die Berechnung in zwei Teilsystemen war der Wunsch nach Übersichtlichkeit und damit Überprüfbarkeit der Ergebnisse. Dazu muß erläutert werden, daß es mit den heutigen Rechenprogrammen und Rechenanlagen prinzipiell machbar wäre, komplette Gebäude aus unterschiedlichsten Baustoffen und Systemen in einer zusammenhängenden Finite-Elemente-Darstellung zu generieren. Es wäre also durchaus möglich gewesen, aus den flächigen Schalenelementen der Decke und den gerichteten Stabelementen des Dachstuhls ein Großsystem zu simulieren und berechnen zu lassen. Das hätte aber zu undurchschaubaren Systemen geführt, die zum einen schwer überprüfbar und deshalb sehr fehleranfällig sind, zum anderen eine Genauigkeit vorgaukeln, die auf Grund der Streuungen in den Eingangswerten (Materialeigenschaften) nicht vorhanden sein kann.

Damit ist schon der Punkt angesprochen, der bei der statischen Berechnung und Beurteilung derartiger Bauten von entscheidendem Einfluß ist. Falsche Eingangsgrößen hinsichtlich der Materialeigenschaften machen die schönsten Berechnungen zu sinnlosen Zahlenschaufeleien, weil bei derart hochgradig statisch unbestimmten Systemen wie den räumlich wirkenden Dachstühlen der Kraftverlauf durch die Steifigkeit (d.h. die Materialeigenschaften) entscheidend beeinflußt wird.

Das Teilsystem Dachstuhl wird als «ebenes Stabtragwerk» aus Einzelstäben mit verschiedenen Querschnitten, Anschluß- und Auflagerbedingungen generiert, die Deckenschale als «finite Elemente System» aus räumlich angeordneten Flächenelementen mit verschiedenen Dicken. Für jedes dieser Einzelsysteme können so die Grenzwerte der Tragweisen in Abhängigkeit von den Extremwerten der schwer erfaßbaren Material- und Systemkennwerte abgesteckt und mit einer «Grenzwertbetrachtung» in einem «von-bis-Bereich» ausgemacht werden.

Lasten

Als Belastung in vertikaler Richtung werden die Eigengewichte der Dach- bzw. Deckenflächen angesetzt, im Dachstuhl zusätzlich das Eigengewicht der Konstruktion. Horizontale Lasten ergeben sich aus Winddruck und Windsog (siehe Abb. 4).

Lasten aus einem Überschallknall wirken wie die Windlast senkrecht auf die Dachfläche und abgemindert auch auf die Decke darunter. Aus Messungen ist bekannt, daß der Schalldruck eines Überschallknalls je nach Flughöhe und -richtung bei 0,10 bis 0,30 kN/m² liegt. Für die Dachkonstruktion wird der Schalldruck damit nicht maßgeblich, die Windlast ist deutlich größer. Bei der Decke kann er aber lokale Schäden in den Bereichen verursachen, wo die Putzhaftung bereits reduziert ist. Für die Gesamtkonstruktion der Decke ist sein Einfluß vernachlässigbar.

System Dachstuhl

Für die Computerberechnung wird der Dachstuhl aus 73 Stäben und 51 Knoten generiert und mit den oben beschriebenen Lasten beaufschlagt (Abb. 1 und 2).

Die Systembesonderheiten einer historischen Dachstuhlkonstruktion mit unterschiedlichen Anschlußsteifigkeiten (Versätze, Blattungen, Holznägel, Querpressungen) können durch schrittweise Berechnungen erfaßt werden. Die einzelnen Iterationsschritte berücksichtigen, daß z. B. Streben mit Versatzanschluß, die keine Zugkräfte aufnehmen können, nach der ersten Berechnung eliminiert werden, wenn sie dort theoretische Zugkräfte aufweisen. Genauso werden weich angeschlossene Stäbe (z. B. Versätze oder Querpressungsanschlüsse) entsprechend ihrer Weichheit uminterpretiert und mit neuen Querschnittswerten in den nächsten Rechengang geschickt. Das gilt auch für die Auflagerbedingungen: «Weiche» Auflager, also z. B. Punkte, in denen der Dachstuhl auf Schwellen aufliegt, können so angesetzt werden, daß deren Setzungen durch Schwind- und Kriechverformungen berücksichtigt werden und damit bei der Gesamtverformung eingerechnet sind.

System Deckenschale

Die Deckenschale wird mit 196 Schalenelementen zwischen 236 Eckpunkten dargestellt (Abb. 5). Ausgesprochen schwierig faßbar sind die geometrischen und materialbezogenen Besonderheiten der Deckenschalenelemente. Hier ist die Analyse des Verhaltens eines Mischwerkstoffes aus Holz und Kalkputz erforderlich, bei dem zusätzlich berücksichtigt werden muß, daß dieser Werkstoff eine gerichtete Struktur hat, nämlich Steifigkeiten, die in Richtung der Latten deutlich größer sind als quer dazu (der Bauingenieur spricht von «orthotropem» Material). Bekannte Eingangsgrößen sind die Materialkennwerte der Holzbestandteile und die Bruchspannungen vergleichbarer Putzarten, experimentell ermittelt an Probekörpern, die nach «Originalrezept» hergestellt wurden (Dissertation von M. Ullrich 1975). Aus den Bruchspannungen kann der für die Berechnung wesentliche Elastizitätsmodul größenordnungsmäßig erfaßt werden.

Experimentelle Untersuchungen von Originalprobekörpern aus der Wies sind nicht möglich gewesen, Proben in der erforderlichen Größe von 5 x 10 x 80 cm standen nicht zur Verfügung.

Die zu erwartende Streuung der Materialeigenschaften des Putzes mußte deshalb mit der bereits angesprochenen Grenzwertbetrachtung berücksichtigt werden. In diese Betrachtung ging auch die Orthotropie mit ein, also die Tragwirkung quer oder senkrecht zur Lattung. Als Grenzfälle sind damit anzusetzen die «weiche» Schale mit niedrigem E-Modul des Putzes und Tragwirkung quer zur Lattung und die «steife» Schale mit hohem E-Modul des Putzes und Tragwirkung parallel zur Lattung. Als drittes System wurde die Schale mit Mittelwerten beider Grenzfälle betrachtet.

Systemkopplung

Die Berechnung der beiden Teilsysteme ergibt Schnittgrößen und Verformungen für die jeweiligen Einzelsysteme, also zum einen die Verformungen des Dachstuhls unter den tatsächlichen vertikalen und horizontalen Lasten, zum anderen die theoretischen Verformungen der Deckenschale unter angenommenen (der Statiker spricht von «virtuellen») Lasten in den betrachteten Grenzfällen. Als Verträglichkeitsbedingung für die statisch unbestimmte Berechnung der Kopplungskräfte zwischen beiden Teilsystemen sind deren jeweilige Verformungen anzusetzen. Die Kopplungskräfte sind dann wiederum diejenigen Lasten, die für die Deckenschale als äußere Lasten wirken, in dieser Spannungen hervorrufen und möglicherweise als Ursachen für die Bildung von Rissen anzusehen sind.

Einfacher formuliert lautet die Frage: Was passiert mit der Decke, wenn sich der darüberliegende Dachstuhl senkt oder waagrecht verschiebt? Setzt oder verschiebt sich dann auch die Deckenschale, oder ist sie so steif, daß sich der Dachstuhl auf sie setzen oder an sie lehnen kann? Verhindert die Decke also die Dachstuhlbewegungen (zumindest teilweise) und nimmt dann auch Kräfte aus dem Dachstuhl auf? Und wenn diese Kräfte auftreten, können sie dann auch weitergeleitet werden, ohne daß die Decke dabei Schaden nimmt? Diese letzte ist die entscheidende Frage, die Antwort darauf könnte wesentliche Zusammenhänge zwischen der Bauweise von Dach- und Deckenkonstruktion der Wies und dem jetzt vorgefundenen Schadensbild ergeben.

Zunächst die Frage nach dem Verhalten der Decke bei den verschiedenen Grenzfällen. Es zeigt sich, daß bei den Grenzfällen «weiche» und «steife» Schale gleichartige Tragweisen vorliegen. In vertikaler Richtung ist die Deckenschale sehr viel weicher als die Dachkonstruktion, sie wird sich also immer an den Dachstuhl hängen. Wenn sich der Dachstuhl setzt, geben die Aufhängepunkte der Deckenschale nach, sie muß dann ihr Eigengewicht vermehrt selbst abtragen. Ausschlaggebend für die dadurch hervorgerufene Änderung des Tragverhaltens der Decke sind die Maße der vertikalen Bewegungen des Dachstuhl, der Statiker spricht in diesem Fall bezogen auf die Schale, die am Dachstuhl befestigt ist von «Auflagersenkungen». Die Dachstuhlsetzungen wurden mit den vorne geschilderten Ansätzen einschließlich der Schwind- und Kriechverformungen mit ca. 2,5 cm in den Außenauflagern und über 4,5 cm in Dachstuhlmitte berechnet (Abb. 3).

Die theoretische horizontale Bewegung des Dachstuhls bei Windlast liegt bei ca. 3,5 cm (Abb. 4), wird jedoch durch die Kopplung mit der Decke reduziert, es entstehen horizontale Kopplungskräfte, die die Decke belasten. Auf diese Lasten reagiert die Deckenschale wesentlich steifer als der Dachstuhl. Im Grenzfall der »weichen« Schale übernimmt sie ca. 70% der

Horizontallasten aus dem Dach, im Fall der «steifen» Schale fast 100%.

Auf die zweite wesentliche Frage, was mit der Decke geschieht, wenn ihr jetzt diese unbeabsichtigten Lasten zugemutet werden, ist jetzt die Antwort in Sicht. Es sind zumindest die Zwänge, denen die Decke ausgesetzt wird, in ausreichend genauen Größenordnungen bekannt, nämlich die vertikale Zwangsverformung durch die Auflagersenkung und die horizontalen Zwängungskräfte aus der Kopplung mit dem Dachstuhl.

Rißprognosen

Für die Berechnung der Spannungen in der Deckenschale wird jetzt die räumliche Finite-Elemente-Struktur noch einmal berechnet, dieses Mal unter definierten Lasten und Zwangsverformungen. Ziel ist die Ermittlung der Spannungsverläufe in der Deckenschale. Die elektronische Berechnung wirft als Ergebnisse unter anderem die Zug- bzw. Druckspannungen in x- und y-Richtung sowie die Schubspannungen für jedes einzelne Element aus. Damit können die Hauptspannungen und deren Richtungen errechnet werden. Da die Bruchspannungen des Putzes bekannt sind, kann jetzt aus den Spannungsverläufen für die jeweiligen Lastfallkombinationen auf das Auftreten von Rissen und deren Lage geschlossen werden.

Die zwei statischen Lastfälle wurden oben genannt:

1. Eigengewicht und Auflagersenkung,
2. horizontale Kopplungskräfte.

Ein weiterer Lastfall wurde untersucht, der üblicherweise nicht zwingend im Repertoire der Statikbegutachtung vorkommt, nämlich:

3. Temperaturänderung.

Der dritte Lastfall setzt Längenänderungen durch Temperatureinflüsse als Lasten an und ermittelt die Spannungen, die sich auf Grund der Behinderung dieser Längenänderungen an den Auflagerpunkten in der Decke ergeben. Die Fragestellung bei diesem Lastfall geht davon aus, daß bei plötzlicher Änderung der Außentemperatur sich der Deckenteil, der im ungedämmten Dachraum liegt, wegen seiner geringen Masse sehr schnell abkühlen bzw. erwärmen wird, sich also zusammenziehen bzw. ausdehnen will. Der untere Teil und die anschließenden massiven Mauern sind thermisch träge, werden sich also nur langsam abkühlen oder erwärmen und deshalb den Temperaturverformungen der Decke einen Widerstand entgegensetzen.

Die Maximalspannungen ergeben sich aus der Überlagerung von Lastfällen, die jeweils gleichzeitig auftreten können:

- a) LF 1 und 2, also Setzung und Horizontalkräfte
- b) LF 1 und 3, also Setzung und Temperaturänderung.

Ein gleichzeitiges Auftreten einer plötzlichen großen Temperaturänderung und der maximalen Windlast ist äußerst unwahrscheinlich, deshalb werden diese Lastfälle nicht in Kombination betrachtet. Als Eingangswerte für die Berechnung werden die Mittelwerte der Materialkenngrößen angesetzt. Als thermische Kenngröße wird der Temperaturexpansionskoeffizient eines vergleichbaren Kalkbaustoffs angesetzt.

Spannungsverläufe, Rißbilder

Bereiche, in denen rißgefährdende Spannungen auftreten, sind in Abbildung 6 dargestellt.

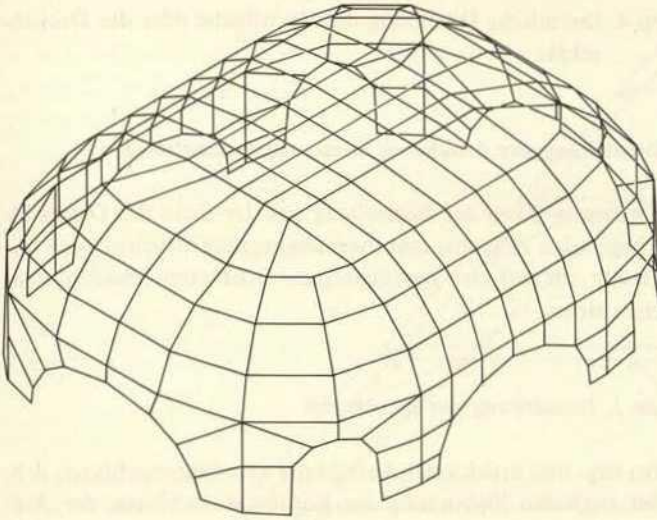


Abb. 5. Finite Elemente System Deckenschale
Fig. 5. Ceiling shell as finite element system

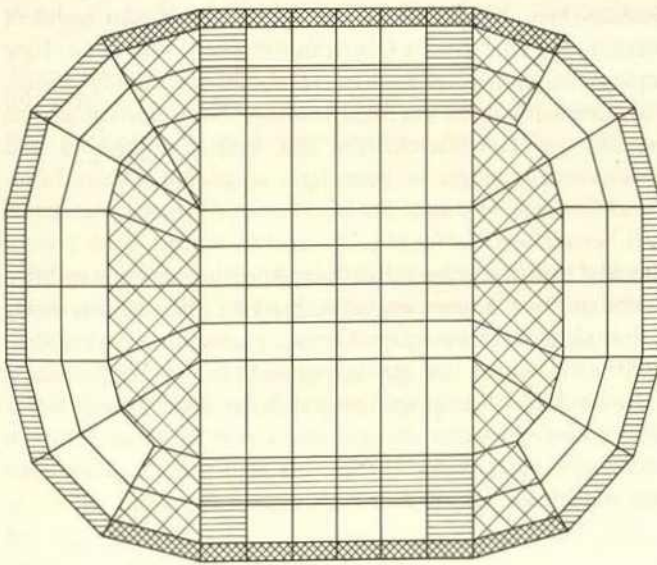
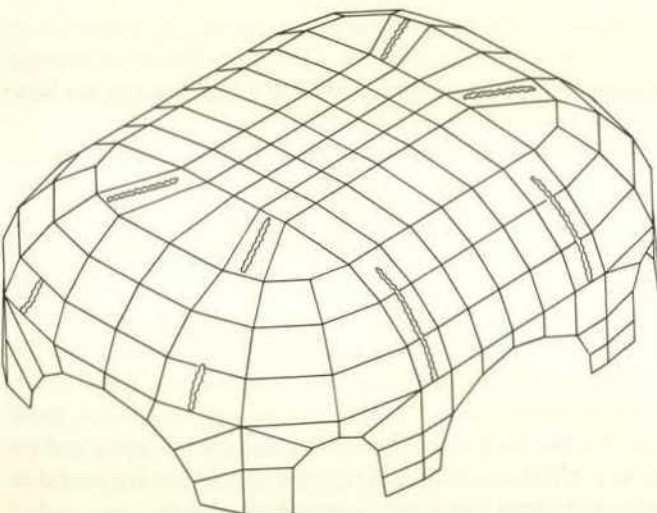
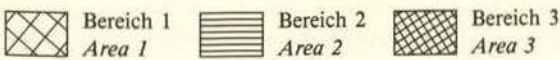


Abb. 6. Bereiche mit rißgefährdenden Spannungen (Draufsicht)
Fig. 6. Areas with tensions causing danger of cracks (top view)



- Im Bereich 1 erreichen die Zugspannungen gerade die Größenordnung der Bruchspannung. Der maßgebende Lastfall ist die Überlagerung a), also die Einflüsse des Dachstuhls vertikal und horizontal.
 - Im Bereich 2 liegen die Spannungen annähernd beim doppelten, im Bereich 3 sogar über dem dreifachen Wert der Bruchspannung. Diese Spannungen ergeben sich aus Überlagerung b), also der vertikalen Dachstuhlbewegung mit gleichzeitiger Temperatursenkung.
- Die Rißgrößen werden dabei vom Haarriß (Bereich 1) bis zum einige Millimeter starken Riß (Bereich 3) reichen.

Interpretation

Die Folgerung, daß alle Elemente, in denen Spannungen über der Bruchgrenze auftreten, reißen werden, ist naheliegend, aber nicht richtig. Vielmehr ist anzunehmen, daß in jedem der gefährdeten Bereiche zunächst das Element mit der größten Spannung als erstes reißen wird und sich danach die Zugspannungen auch in den Nachbarelementen reduzieren. Deshalb wird die Deckenschale erneut berechnet, dieses Mal im gerissenen Zustand (der Bauingenieur sagt «Zustand II»). Die Lage der als gerissen angenommenen Elemente ist in Abbildung 7 gezeigt.

Ergebnisse (Zustand II)

Frappierend sind die Rechenergebnisse bei der «gerissenen» Schale in zweierlei Hinsicht. Zum ersten bauen sich die Spannungen tatsächlich deutlich ab, lediglich einige wenige Randelemente sind bei Temperaturbelastung noch rißgefährdet. Zum zweiten ändert sich die Eigensteifigkeit der Deckenschale durch die Risse nur wenig, d.h. sie übernimmt immer noch einen Großteil der Windlasten aus dem Dach.

Damit läßt sich das wesentliche Ergebnis der Untersuchung formulieren: Die Deckenkonstruktion der Wies wirkt als statisches Element mit dem Dachstuhl zusammen. Die Lasteinflüsse aus dem Dachstuhl (vertikal und horizontal) und von diesen unabhängig die Temperaturbelastung bewirken Spannungen, die in der Deckenschale zu Rissen führen. Mit diesen Rissen entzieht sich die Schale den größten Spannungen, d.h. sie reißen sich frei. Nach der Rißbildung wirkt die Schale weiterhin mit nahezu unveränderter Steifigkeit. Die Risse sind als Selbstheilungseffekt zu sehen.

Die in der Wies festzustellenden Rißverläufe stimmen im wesentlichen mit dem hier theoretisch ermittelten Rißbild überein. Die großen Risse parallel und senkrecht zu den Rändern können damit eindeutig erklärt werden.

Schadensursachen

Die Ursachen für die Schäden in der Decke der Wies seien noch einmal in Stichworten zusammengefaßt:

Abb. 7. Rißverteilung (Zustand II)
Fig. 7. Distribution of the cracks (condition II)

1. Der barocke Dachstuhl ist so ausgebildet, daß er die anfallenden Lasten ausreichend sicher übernehmen kann, aber er verformt sich dabei. Elastische Verformungen sind dabei in der vertikalen Richtung untergeordnet, wesentlich sind die Kriech- und Schwindverformungen. Der Dachstuhl setzt sich um einige Zentimeter. Auf horizontale Lasten wirkt der Dachstuhl weich, bei Windlast bewegt er sich deutlich (ca. 3,5 cm), wenn er nicht durch andere Bauteile ausgesteift wird.
2. Die Deckenschale wirkt zwischen Wand (bzw. Pfeiler) und Dachstuhl für ihr Eigengewicht als freitragende Konstruktion in vertikaler Richtung. Setzungen des Dachstuhls verursachen in der daran hängenden Decke Zugspannungen, die zu Rissen führen.
3. In horizontaler Richtung ist die Deckenschale deutlich steifer als der Dachstuhl und wirkt deshalb für diesen als horizontale Aussteifung. Dabei übernimmt sie einen Großteil der Windlasten, die auf das Dach wirken. Diese verursachen in der Deckenschale Zugspannungen, die diese nicht aufnehmen kann. Die Schale wird in einigen Bereichen reißen, ist danach aber immer noch steif genug, um weiterhin horizontale Lasten aufzunehmen.
4. Die Deckenschale ist hohen Temperaturschwankungen ausgesetzt, also einem ständigen Ausdehnen und Verkürzen. Die Schale «arbeitet». Die nahezu unverschiebliche Auflagerung aus dem thermisch trägen Mauerwerk verhindert jedoch diese Temperaturverformungen weitgehend. So entstehen vor allem im Schalenrand Zwangsspannungen, die zu Rissen führen.

Diese vier Punkte sind *systembedingte Schadensursachen*, also «eingebaute Fehlerquellen». Überlegungen, die auf eine Sanierung im Sinn einer konstruktiven Änderung zielen, wären also hier anzusetzen.

Eine weitere Art von Schäden sei hier kurz genannt, die Fehlstellen, die eher als *zeitbedingte Schäden* zu sehen sind.

- Stuckteile sind abgebrochen, weil die darin liegende «Bewehrung» rostet.
- Die Vernagelung der Latten mit den Bohlenträgern ist bereichsweise durchgerostet oder hat sich gelöst, weil Latten gespalten oder Nägel genau in Fugen genagelt wurden.
- Deckenputz hat sich stellenweise flächig von der Lattung gelöst.

Diese Punkte sind also nicht statisch-konstruktiv relevant und eher auf alterungsbedingte Korrosionserscheinungen oder ursprüngliche Fehler in der Bauausführung zurückzuführen. Sanierungsvorschläge für derartige Fehlstellen sind deshalb den Restauratoren vorbehalten.

Sanierungsmodelle

Maßnahmen zur Behebung der statisch-konstruktiven Mängel (d. h. der systembedingten Schadensursachen) sind denkbar:

- zu 1. Verstärkung des Dachstuhls, Ausbildung von zug- und druckfesten Knoten, Ergänzung von Stäben;
- zu 2. Anhebung des Dachstuhls um den Betrag der Kriech- und Schwindsetzung, vertikale Entlastung der Deckenschale;
- zu 3. Ausbildung einer schubfesten Scheibe oder eines Verbands oberhalb der Deckenschale oder Abkopplung der Deckenschale in horizontaler Richtung, Einbau verschieblicher Abhängungen;
(die Maßnahmen 1. und 3. sind als Alternativen zu sehen)

zu 4. thermische Dämmung der Dachfläche oder der Deckenschale.

Beurteilung der denkbaren Sanierungsmaßnahmen

Unabhängig von der Beurteilung aus der Sicht der Denkmalpflege seien zunächst rein ingenieurgemäße Überlegungen angestellt, die auf eine Beseitigung der erkannten Schadensursachen zielen.

Zu 1. Verstärkung des Dachstuhls

Bei zug- und druckfester Ausbildung aller Stabanschlüsse, d. h. der zugfesten Verbindung der Kopfbandanschlüsse, der Ausschaltung von Schlupfverformungen in Versätzen usw. würde ein statisches System entstehen, das deutlich geringere Horizontalverformungen bei Windlast aufweist (ca. 4 mm!).

Die technische Ausführung ist denkbar z. B. mit Holz- oder Stahllaschen, die seitlich auf die Stäbe genagelt oder gedübelt werden, was aber gleiche Querschnittsbreiten voraussetzt. Eine andere Lösung aus dem modernen Holzbau ist ebenfalls vorstellbar: Gewindestangen aus Stahl werden in Bohrungen möglichst parallel zur Holzfaserrichtung mit Epoxidharzklebern und Quarzsandzuschlägen in Bohrungen eingeleimt. Dieses Leim-Sand-Gemisch wird auch für Injektionen eingesetzt, mit denen z. B. Versatzfugen kraftschlüssig ausgefüllt werden. Beide Lösungen sind jedoch problematisch in der Ausführung, wenn mehrere Stäbe an einem Knoten angreifen. Sind die Stäbe zudem räumlich angeordnet, werden diese Lösungen kaum mehr praktikabel.

Eine einfachere und statisch genauso wirksame Sanierung wäre die Änderung des Systems durch den Einbau zusätzlicher Stäbe. Eine mögliche Variante ist in Abb. 8 dargestellt. Ein Stabzug in Form zweier Holzspannen wird ergänzt. Diese Spannen werden seitlich an die Stühle gedübelt.

Zu 2. Anhebung des Dachstuhls

Die vertikale Zwangsverformung der Deckenschale durch die Kriech- und Schwindbewegungen des Dachstuhls liegt im Bereich von 2,0 cm. Es ist denkbar, diese Verformung rückgängig zu machen und den Dachstuhl um diesen Betrag abzuheben.

Das kann dadurch geschehen, daß an den Auflagern Unterfütterungen (Stahlbleche, Hartholzkeile) angeordnet werden, nachdem der Dachstuhl hydraulisch angehoben wurde. Es ist aber auch denkbar, in einzelnen Knoten der Binder Verformungen zu erzeugen (Auskeilen von Versätzen etc.), die in der Summe die erforderliche Anhebung ergeben.

Beide Maßnahmen wären grobe Eingriffe in das Tragwerk. Dabei ist die Lösung mit hydraulischer Anhebung und anschließender Unterfütterung so gleichmäßig praktikierbar, daß die Deckenschale ohne erneute Zwangsverformungen schonend entlastet werden könnte. Der Einsatz hydraulischer Hebezeuge in den schwer zugänglichen Fußpunkten der Deckenschalen ist aber kaum ohne Beschädigung dieser Bereiche machbar. Die Anhebung durch Veränderung der Knoten im Dachstuhl ist zwar praktisch machbar, erfordert aber ein schrittweises Vorgehen (Knoten für Knoten, Binder für Binder). Die damit verbundene schrittweise und einseitige Anhebung der Deckenschale verursacht neue unwägbarere Spannungszustände.

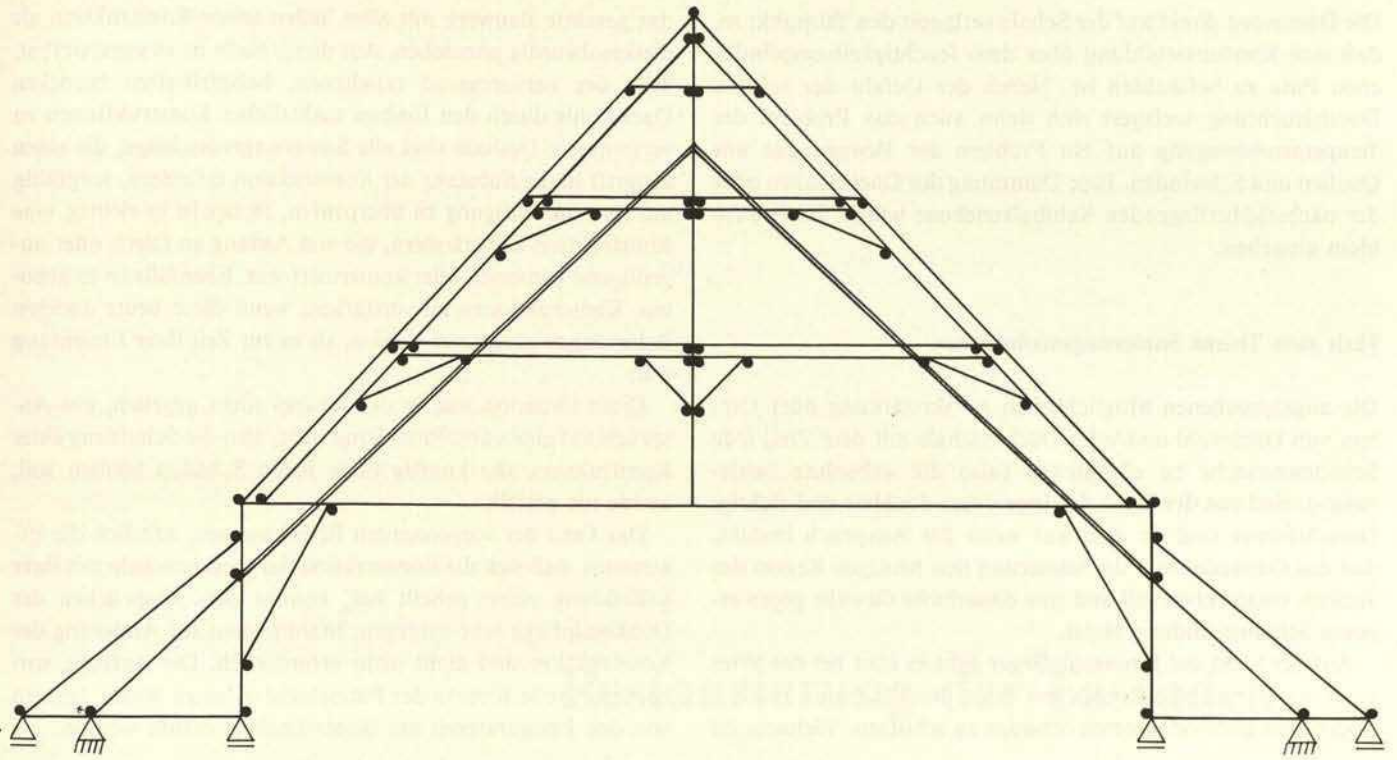


Abb. 8. Wie Abb. 1, mit Sicherungsstäben / Fig. 8. Same as fig. 1, with stabilization rods

Wenn davon ausgegangen werden kann, daß keine weiteren Setzungen des Dachstuhls mehr zu erwarten sind, stellt sich die Aufgabe der Anhebung der Dachkonstruktion nicht mehr. Spannungen aus der Zwangssenkung der Deckenschale sind durch deren Kriechverformungen abgebaut worden. Damit ist der Lastfall «vertikale Verformung» langfristig nicht mehr relevant. Das gilt aber nicht für den Fall lokaler Fehlstellen, z. B. verfallener Balkenköpfe oder Schwellen. Bei dadurch verursachten Setzungen ist der Vorschlag einer Anhebung sicher wieder sinnvoll.

Zu 3. Scheibe oder Verband oberhalb der Deckenschale

Eine horizontale Aussteifung des Dachstuhls ist denkbar durch den Einbau eines Verbandes, z. B. aus Flachstahldiagonalen auf der Balkenlage über der Deckenschale. Durch geeignete Anschlüsse an die Deckenbalken und Längsschwellen wird ein liegendes Fachwerk erzeugt, das als Systemhöhe die Breite des Dachstuhls besitzt.

In ähnlicher Weise ist die Konstruktion einer schubfesten Scheibe durch den Einbau einer Sperrholzplatte auf der untersten Balkenlage möglich. Dabei müssen die Plattenränder auf darunterliegenden Balken gestoßen werden, die Längsränder zudem durch angeschlossene Randbalken verstärkt werden. Die schubsteife Befestigung erfolgt durch Nägel, erschütterungsempfindliche Decken werden geschraubt.

Bei beiden Lösungen entsteht ein äußerst steifes Element, hervorragend geeignet, die horizontale Aussteifung zu gewährleisten. Bedingung dafür ist eine starre Festhaltung an den Endauflagern von Verband bzw. Scheibe, z. B. durch nachträglich einzubauende Ringanker in die gemauerten Giebelwände. Diese Möglichkeit ist in der Wies nicht gegeben, da die entsprechende Balkenebene nicht in einer Höhe bis zum Giebel bzw. zum

Turm verläuft. Um den vorhandenen Höhensprung mit Verband oder Scheibe zu überwinden, wären aufwendige räumliche Konstruktionen erforderlich.

Alternativ zu 3. Abkopplung der Deckenschale

Wechselwirkungen zwischen Dach und Deckenschale können natürlich vermieden werden, wenn beide Systeme voneinander getrennt sind. Im Fall der Wies sind die Bohlenträger fest mit der untersten Balkenlage des Dachstuhls vernagelt. Eine zumindest horizontale Trennung wäre möglich, wenn man z. B. die Bohlenträger über Zugstäbe an die nächsthöhere Balkenlage hängen und die vorhandene Vernagelung freibohren würde. Denkbar ist auch der Einbau einer zusätzlichen Balkenlage über der bereits bestehenden. Diese müßte dann freigeschnitten und horizontal verschieblich im Dachstuhl aufgehängt werden.

Bei beiden Lösungen ist jedoch zu befürchten, daß bei direktem Eingriff in die Konstruktion der Deckenschale Verformungen entstehen können, die größere Schäden verursachen, als sie beim statisch unveränderten System zu erwarten sind.

Zu 4. Thermische Dämmung

Die Hauptursache für das Auftreten von Rissen in der Deckenschale ist nach den vorne beschriebenen Berechnungen die thermische Belastung bei Abkühlung. Diese Belastung wäre deutlich zu reduzieren, wenn unter der Dachfläche bzw. über der Deckenschale eine Wärmedämmung angeordnet würde.

Auf der Schale wäre eine Dämmung sicher mit geringem Aufwand machbar, da hier die kleinste Fläche abzudecken wäre. Zu befürchten ist aber, daß dann durch die Änderung der bauphysikalischen Gegebenheiten andere Probleme auftreten.

Die Dämmung direkt auf der Schale verlagert den Taupunkt so, daß eine Kondensatbildung über dem feuchtigkeitsempfindlichen Putz zu befürchten ist. Neben der Gefahr der lokalen Durchfeuchtung verlagert sich dann auch das Problem der Temperaturbewegung auf ein Problem der Bewegungen aus Quellen und Schwinden. Eine Dämmung der Dachflächen oder der nächsthöherliegenden Kehlbalkenebene würde dieses Problem umgehen.

Fazit zum Thema Sanierungsmaßnahmen

Die angesprochenen Möglichkeiten zu Verstärkung oder Umbau von Dachstuhl und/oder Deckenschale mit dem Ziel, jede Schadensursache zu eliminieren (also die «absolute Sanierung»), sind aus der Sicht des Ingenieurs denkbar und richtig. Gerechtfertigt sind sie aber nur wenn der Anspruch besteht, daß das Gebäude nach der Sanierung den heutigen Regeln der Technik entsprechen soll und eine dauerhafte Gewähr gegen erneute Schadensbildung bietet.

Aus der Sicht der Denkmalpfleger geht es aber bei der Wies nicht nur darum, die Decken mit ihren unschätzbaren Fresken zu erhalten und vor weiteren Schäden zu schützen. Vielmehr ist

das gesamte Bauwerk mit allen Teilen seiner Konstruktion als denkmalwürdig anzusehen. Aus dieser Sicht ist es unvertretbar, Teile des hervorragend erhaltenen, beispielhaften barocken Dachstuhls durch den Einbau zusätzlicher Konstruktionen zu verfremden. Deshalb sind alle Sanierungsvorschläge, die einen Eingriff in die Substanz der Konstruktion erfordern, sorgfältig auf ihre Berechtigung zu überprüfen. Sicher ist es richtig, eine Konstruktion zu verändern, die von Anfang an falsch oder ungenügend bemessen oder konstruiert war. Ebenfalls ist es geboten, Konstruktionen zu verstärken, wenn diese heute anderen Belastungen ausgesetzt werden, als es zur Zeit ihrer Errichtung war.

Diese Situation war in der «Wies» nicht gegeben, ein Anspruch auf eine «absolute» Sanierung, also die Schaffung einer Konstruktion, die künftig ohne jeden Schaden bleiben soll, wurde nie gestellt.

Das Fazit der vorgenannten Berechnungen, nämlich die Erkenntnis, daß sich die Konstruktion der Deckenschale mit ihrer Rißbildung selbst geheilt hat, kommt den Ansprüchen der Denkmalpflege sehr entgegen. Maßnahmen zur Änderung der Konstruktion sind nicht mehr erforderlich. Die Auflage, vorhandene große Risse in der Putzschicht offen zu lassen, können von den Restauratoren mit einem Lächeln erfüllt werden.

Summary

Die Wies from the Perspective of a Structural Engineer

Following damage to Die Wies pilgrimage church in Bavaria, an investigation of the timber roof structure and soffit construction was made to determine what influence they have on each other. Timber soffits with a plaster covering are a common form of construction in late Baroque churches. Ceilings of this kind can be regarded as load-bearing shells that function as independent structural systems.

The connection with the load-bearing roof construction, however, represents a structural link between roof truss and soffit shell, which leads to an interaction between the structural behaviour of both systems.

Calculations reveal the influence of vertical and horizontal movements within the timber roof structure on the soffit shell; and, in addition, its behavior under fluctuations of temperature. From calculations of the strains resulting from a combination of structural

loads and the influence of changes in temperature, certain conclusions can be drawn concerning the formation of cracks in the soffit shell.

The calculation of the soffit as a shell fractured in certain areas shows that its rigidity is only minimally reduced through the formation of cracks. The actual strains causing the cracking, on the other hand, are clearly reduced. The formation of cracks can therefore be seen as a kind of rectifying self-defense mechanism within the soffit shell. The cracks function as joints through which movement within the soffit shell can be absorbed without leading to further cracking.

This means that costly measures to reinforce the roof or the shell construction are unnecessary. The historic, listed structure does not have to be changed (and thus destroyed). As part of the rehabilitation program for the ceiling, only the main cracks need to be retained as «expansion joints».