CFD-STRÖMUNGSSIMULATION ZUR SICHERSTELLUNG EINES BEHAGLICHEN UND ENERGIEEFFIZIENTEN SCHWIMMBADBETRIEBS

Mirko Klein, Harald Garrecht
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, Deutschland

KURZFASSUNG

Vielfach erfordert der Betrieb von Schwimmbädern einen höheren Energiebedarf als andere Nicht-Wohngebäude. Um die energetische Effizienz der Planung, des Bauens und des Betriebs von Hallenbädern zu bewerten und zu steigern, werden am neu errichteten Freizeitbad der Stadt Kelsterbach umfangreiche Forschungen und Entwicklungen vorgenommen, die im Rahmen des Förderprogramms „Energieoptimiertes Bauen“ unterstützt werden. Mit der Eröffnung der Schwimmhalle im Januar 2010 wurde ein zweijähriges Energiemonitoring gestartet, um Maßnahmen zur Optimierung des Betriebs der technischen Anlagen herauszuarbeiten. Neben dem umfassenden Energie- und Klimamonitoring werden auch theoretische Untersuchungen mittels Gebäude- und CFD-Strömungssimulationen vorgenommen, um jene Anlagenparameter und Betriebsoptionen der komplexen HVAC-Technik zu identifizieren, mit denen ein ressourcenschonender und energieeffizienter Schwimmbadbetrieb sichergestellt werden kann. Dabei sollen vor allem die Raumluftverhältnisse im jahreszeitlichen Betrieb untersucht werden, um den Badegästen stets einen behaglichen Aufenthalt zu bieten.

ABSTRACT

In numerous cases the energy consumption of public swimming pools is located far above the energy consumption of non-residential buildings. As a result a research study is conducted in order to assess the energy efficiency of public swimming pools, using the public swimming pool in Kelsterbach as an example. Within the scopes of “Energieoptimierten Bauens” the control of the swimming pools technical system is accompanied over a period of 2 years. Since its opening in January 2010 an elaborate energy- and climate monitoring is being used to identify and optimize system parameters and operation options of the highly sophisticated HVAC-system to assure a long term and efficient energy consumption as well as sustainable use of resources. By means of building performance and fluid dynamics simulations analyses of the indoor climate are included. At this the indoor air conditions of the seasonal operations are determined in order to guarantee high comfortableness for bathers.

EINLEITUNG

Ziel der Planungen aller bau- und analgentechnischen Maßnahmen des neuen Freizeitbades der Stadt Kelsterbach war es, ein zeitgemäßes, ansprechendes und vor allem energieeffizientes Gebäude zu entwickeln. Den besonderen Anforderungen an das Raumklima in Schwimmhallen ist zumeist ein hoher Energieverbrauch geschuldet, der deutlich über dem von anderen Nicht-Wohngebäuden liegt. Im Vergleich zu Wohn- oder Bürogebäuden sind zudem nur wenige innovative Maßnahmen bekannt, mit denen sich der Energieverbrauch in Schwimmbädern nachhaltig reduzieren lässt. Hieraus kann die Notwendigkeit abgeleitet werden, das energetische Verhalten von Bädern genauer zu untersuchen, um diverse Maßnahmen hinsichtlich ihres Beitrags zur Energieeffizienzsteigerung zu erproben und diese zielsicher auch auf künftige Projekte übertragen zu können.

Abbildung 1 Schwimmhalle

Zahlreiche energiesparende Maßnahmen sollten in der neuen Schwimmhalle der Stadt Kelsterbach zum Einsatz kommen. So beispielsweise eine hochwärmegedämmte Außenhülle, wie auch eine äußerst effiziente Wärmerückgewinnung. Entsprechend wurde ein ausgefeiltes Maßnahmenkonzept entwickelt, mit dem im Vergleich zu üblichen neuen Schwimmhallen in der Bilanzierung 50% des Primärenergieeinsatzes

eingespart werden können. Um dieses Ziel erreichen zu können, waren Bauherr und Betreiber neben den bau- und anlagentechnischen Maßnahmen von Beginn an auch an einem optimalen Betrieb des Schwimmbades und seiner technischen Anlage interessiert. Mit Hilfe der EnOB-Förderung des Forschungsvorhabens sollen daher über einen Zeitraum von zwei Jahren die Wirksamkeit der umgesetzten Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung analysiert und energieoptimierte Betriebsweisen der komplexen Anlagentechnik herausgearbeitet und erprobt werden. Über das reine Energiemonitoring der GLT hinaus wurde seitens der Verfasser ein ergänzendes Sensor-Netzwerk zum Klimamonitoring realisiert, mit dem die zur Bewertung der Raumluftverhältnisse erforderlichen Raumklimagrößen unter Berücksichtigung des jahreszeitlichen Badebetriebs erfasst werden. Insgesamt umfasst die ergänzende Messtechnik dabei mehr als 120 Sensoren, die in verschiedenen Raumbereichen und Höhenlagen der Schwimmhalle in minütlichem Abstand die raumseitigen Luft- und Oberflächentemperaturen, relativen Feuchten, Luftströmungen, Intensitäten der Strahlung (Global, UVA und UVB), CO_2, VOC etc. mittels rechnergestütztem Messsystem erfassen.

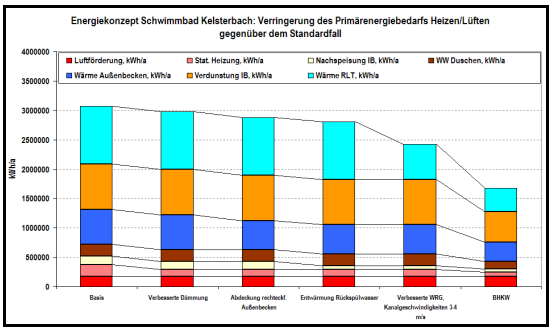

Abbildung 2 Energiekonzept zur Verringerung des Primärenergiebedarfs

Soll ein Freizeit- und Wellnessbad wirtschaftlich betrieben werden, ist es nicht alleine ausreichend Energie einzusparen. Gleichermaßen gilt es hier, den Badegästen auch einen hohen Komfort und einen angenehmen Aufenthalt bei möglichst geringem Energieaufwand bieten zu können. Entsprechend müssen die vielfältigen anlagentechnischen Komponenten für den Betrieb der Schwimmbad-, Sauna-, Wellness-, und Gastronomiebereiche in optimaler Weise zusammenspielen, bzw. sind diese so zu regeln, dass selbst unter widrigen Witterungsverhältnissen und hohen Besucherzahlen die Nutzungsanforderungen energieeffizient erfüllt werden können. In großvolumigen Räumen wie einer Schwimmhalle bestimmen die Temperatur-, Feuchte- und Luftströmungsverhältnisse infolge konvektiver Vorgänge die Behaglichkeit, die nach EN ISO 7730 oder ähnlichen Verfahren nur schwer bewertet werden kann.

Aus diesem Grund werden im laufenden Forschungsvorhaben neben dem Energie- und Klimamonitoring auch rechnerische Untersuchungen zu den Raumluftverhältnissen mittels CFD-Simulation durchgeführt. Einerseits gilt es hierbei die Raumluftströmungsverhältnisse, Temperatur- und Feuchteverteilungen zu analysieren, andererseits sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsszenarien der anlagentechnischen Komponenten erfasst und bewertet werden. Aber auch baukonstruktive Detaillösungen sollen im Bezug auf ihr bauphysikalisches Verhalten unter den extremen Randbedingungen eines Schwimmbadbetriebs untersucht werden, so z.B. das große öffenbare Folienkissendach der Schwimmhalle.

Mit dem Abschluss des Vorhabens sollen durch den Einsatz des Monitorings und den modernen Simulationsmethoden (CFD und FEM) hinreichende Erkenntnisse zum Raumverhalten und zu den Wirkungen der bau- und anlagentechnischen Gegebenheiten vorliegen, um geeignete Regelstrategien für einen optimalen Betrieb des Schwimm- und Wellnessbades hinsichtlich Nutzung und Energieeffizienz zu erarbeiten, die zusammen die Wirtschaftlichkeit des Badbetriebs bestimmen werden.

WESENTLICHE GEBÄUDEMERKMALE

Als eine der Besonderheiten des neuen Hallenbades kann die Dachkonstruktion aus Holzleimbindern mit einer Überdeckung in Form von Folienkissen als Hüllelementen genannt werden. Das Folienkissendach lässt die Schwimmhalle im Inneren sehr hell und lichtdurchflutet erscheinen. Die Folienkissenelemente selbst bestehen aus drei, durch transparente Membrane getrennte Druckluftschichten. In einem Teilbereich der Schwimmhalle, in dem sich das Kinderbecken befindet, kamen beschichtete Folien zum Einsatz, um den Eintrag schädigender UV-Strahlung zu reduzieren. Wesentliches Merkmal des Daches ist aber, dass das mittlere Drittel der Dachkonstruktion verfahrbar ausgebildet wurde, um einen beträchtlichen Teil der Dachfläche während der sommerlich warmen Schönwetterperioden öffnen zu können. Dadurch nimmt das Hallenbad aus Sicht der Nutzer einen Freibadcharakter an. Als energetischer Aspekt kann in dieser Zeit ein großer Teil der ansonsten für die Luftaufbereitung und Belüftung erforderlichen Energie eingespart werden. Aus bauphysikalischer Sicht interessant ist das thermische Verhalten der Folienkissenkonstruktion, die insbesondere unter den extremen Randbedingungen eines Schwimmbadbetriebs noch nicht hinreichend erforscht ist. Hier ist es vor allem die Wärmebrückenproblematik im Bereich des Anschlusses der Folienkissen an die

Trägerkonstruktion, die wärme- und feuchtetechnisch zu überprüfen und optimieren ist. Obgleich die Metallprofile als Anschlussdetail flächenmäßig nur 5 – 10 % der Dachfläche einnehmen, dürfte der hohe U-Wert im Bereich des Profils und der hier zusammenlaufenden Folienlagen einen maßgeblichen Einfluss auf das Transmissionswärmeverhalten des Folienkissendaches haben. Zudem gilt es, die Gefährdung der Dachkonstruktion durch Tauwasserausfall und Korrosion der Profile zu untersuchen. Zwar wurden zusätzliche Kondensatablaufrinnen beim Bau montiert, doch lässt sich bei Bedarf auch der Betrieb der Lüftungsanlage weiter optimieren, um erhöhte Tauwasserlasten mit Gefährdungspotenzial zu vermeiden. Völlig unbekannt sind auch die Auswirkungen der Öffnung des mittleren Drittels der Dachkonstruktion auf die Behaglichkeit der Badegäste im Innern der Schwimmhalle. Hier sollen das Monitoring und die CFD-Simulationen weiterführende Erkenntnisse liefern, um die nutzerspezifischen, energetischen und anlagenspezifischen Belange bei einer Teilöffnung des Daches zuverlässig bewerten zu können.

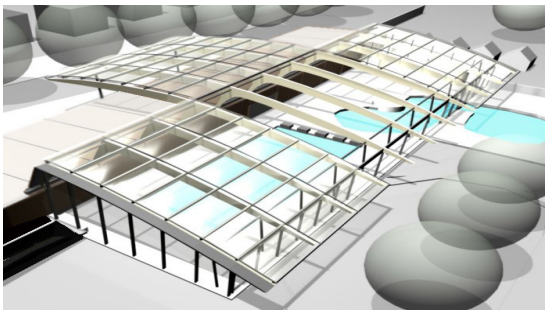

Abbildung 3 Schwimmhalle mit geöffnetem Dach

VORHABENSZIELE

Im Rahmen des Vorhabens sollen grundlegende Untersuchungen zur Bilanzierung des Energieverbrauchs beim Betrieb von Schwimmbädern vorgenommen werden. Das ergänzend zu dem über 900 Sensoren und Zähler umfassende Netzwerk der GLT adaptierte Netz von 120 Fühlern zur Charakterisierung der Temperatur-, Feuchte- und Strömungsverhältnisse innerhalb der Schwimmhalle soll eine differenzierte Bewertung aller Energieflüsse aber auch Raumluftzustände in den verschiedenen Raum- und Nutzbereichen des Schwimm- und Wellnessbades ermöglichen. Mittels rechnergestützter Visualisierung werden die von der GLT ausgelesenen, sowie auch die im ergänzenden Monitoring erfassten Daten in anschaulicher Weise dargestellt und hier weiter bearbeitet, sodass eine umfassende Bewertung aller Energieumsätze ermöglicht wird. Die unverzügliche Analyse aller Messdaten soll dann dazu genutzt werden, mögliche Energieeinsparpotenziale durch einen optimierten Betrieb der anlagentechnischen Komponenten ohne Komfortverlust herauszuarbeiten. Diese Informationen sollen dann über eine geeignete Schnittstelle der GLT übergeben werden, um entsprechende Regelkreisanpassungen vornehmen zu können. Mit den Erkenntnissen aus dem Monitoring wie auch der Simulationen soll das komplizierte Zusammenwirken der komplexen anlagentechnischen Komponenten optimiert werden, indem der GLT die erforderlichen Informationen übermittelt werden, mit denen ein energieoptimierter Betrieb des Bades bei Wahrung hoher Komfortansprüche erreicht werden kann.

Das Projektziel sieht daher die Erarbeitung eines Maßnahmenkataloges vor, der abhängig der sich im Jahres- und Tagesgang stets verändernden Witterungsverhältnisse unter Berücksichtigung der baukonstruktiven und anlagentechnischen Ausgestaltung des innovativen Freizeitbades, einen ökonomisch sinnvollen und behaglichen Schwimmbadbetrieb gewährt. Nicht zuletzt sollen dabei auch mögliche Gefährdungen schwieriger Bauteilanschlüsse, so z.B. im Bereich des Dachanschlusses der Folienkissen durch einen kontrollierten und optimierten Betrieb der Anlagen unterbunden werden.

KLIMAMONITORING

Um die Raumluftzustände abhängig der denkbaren und zu erprobenden Betriebszustände der verschiedenen Anlagenkomponenten für die Belüftung, Beheizung und Entfeuchtung in den verschiedenen Raumbereichen der Schwimmhalle erfassen und bewerten zu können, wurde seitens der TU Darmstadt das ehedem im Kontext mit dem Forschungsvorhaben stehende umfassende, mit Zählern und Sensoren ausgestattete, GLT-Konzept mit einem ergänzenden Messsystem erweitert, um zusätzliche Informationen zu den Raumluftverhältnissen in den verschiedenen Arealen von der Umkleidezone, über die Schwimmhalle, den Relax- und Gastronomiebereich wie auch von Sauna- und Wellnessbereich zu erhalten. Neben einem kabelbasierten Messwert-Erfassungssystem, das an der TU Darmstadt gemeinsam mit der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft entwickelt wurde und bislang in mehr als 40 Vorhaben mit je 100 bis 1400 Sensoren erfolgreich eingesetzt werden konnte, kommt dabei im Sauna- und Wellnessbereich auch ein neu entwickeltes funkbasiertes Messkonzept zum Einsatz. Ziel ist, die vielfältigen Informationen beider Messsysteme, dem der GLT und des ergänzenden Monitorings, zu verknüpfen, um über eine umfassende Datenbasis zu verfügen, mit der die Auswirkungen des Betriebs der diversen anlagentechnischen Komponenten sowohl hinsichtlich der Potenziale einer nachhaltigen

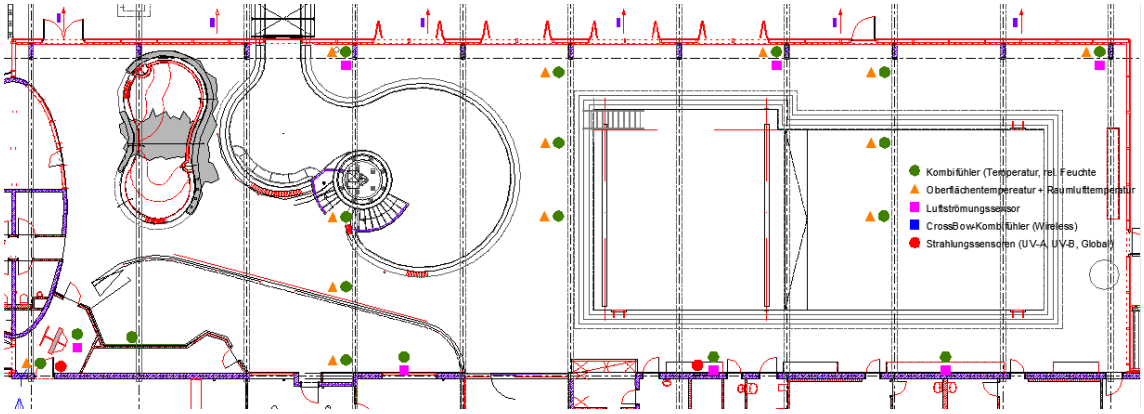

Abbildung 4 Sensoranordnung in der Schwimmhalle

Reduzierung des Energiebedarfs, als auch der Sicherstellung hoher Komfortansprüche untersucht werden können. Werden dabei Defizite oder Verbesserungsmöglichkeiten festgestellt, lassen sich daraus Optimierungspotenziale des anlagentechnischen Betriebs identifiziert, die dann besser aufeinander abgestimmt werden können.

Entsprechend sollen Regelszenarien entwickelt werden, mit denen durch die stete Bewertung und den Vergleich der Messgrößen, ein optimal aufeinander abgestimmter Betrieb gewährleistet werden kann, wobei stets zwischen alternativen möglichen Betriebsphasen, z.B. die Öffnung bzw. das Schließen des Folienkissendaches als Alternative zur alleinigen anlagentechnischen Belüftung und Luftentfeuchtung der Schwimmhalle zu entscheiden ist. Um die Betriebsführung nicht nur von den anlagenspezifischen Informationen abhängig zu machen, sondern auch die Empfindungen der Badegäste berücksichtigen zu können, werden wie bereits angeführt die Raumluftzustände mittels eines gesonderten Messsystems an zahlreichen Orten in Schwimmhalle, Umkleide-, Sauna- und Ruhebereich in kurzen Zeitabständen erfasst. Gemessen werden im Wesentlichen die Temperatur und die relative Feuchte der Raum- und Außenluft. Zusätzlich werden auch innerhalb und außerhalb der Schwimmhalle die Strahlungsintensität, wie auch die Intensität von UVA- und UVB-Strahlung bestimmt, um die über das transparente, teilweise beschichtete Folienkissendach einfallende Strahlung bewerten zu können. An weiteren Positionen werden im Bereich der Glasfassade, an der gegenüberliegenden Wand unmittelbar im Nahfeld der beheizten Sitz- und Ruhebänke und im Umfeld der Gastronomie die Luftströmungsverhältnisse gemessen. Darüber hinaus wird an einzelnen Stellen die Konzentration von CO_2 bzw. VOC gemessen. Um die Folge des Öffnens bzw. Schließens des verfahrbaren Folienkissendaches auf die sich verändernden Raumluftverhältnisse in der Schwimmhalle zu analysieren, wurden etwa 80 der insgesamt über 120 Sensoren an 20 im Raum verteilter Messstellen angeordnet. Einen Überblick über die Positionierung der Sensoren in der Schwimmhalle gibt Abbildung 4. Damit die attraktive Innenraumarchitektur der Schwimmhalle nicht negativ beeinflusst wird, befinden sich die Sensoren entweder nur im Randbereich der Schwimmhalle oder sind unterhalb der Holzträger der Dachkonstruktion angeordnet.

GEBÄUDESIMULATION

In großvolumigen Räumen, so auch der untersuchten Schwimmhalle, bilden sich große konvektive Luftströmungen aus, die sich witterungs- und nutzungsbedingt durch Temperaturunterschiede im Raum und an der Raumschale, abhängig des Betriebs der raumlufttechnischen Anlagen etc. einstellen. Grundsätzlich sind die sich so ergebenden Raumluftströmungen starken Schwankungen unterworfen, da sich die klimatischen Randbedingungen wie auch Intensität der Nutzung im Tages- und Jahresgang stets verändern. In statischen Bilanzierungsverfahren wird der Einfluss der Raumluftverhältnisse auf den Energiebedarf über Bemessungsgrößen näherungsweise abgeschätzt. Aber auch eine differenziertere Bewertung mittels dynamischer Gebäudesimulation stößt bei der Berücksichtigung des strömungs- und luftführungsbedingten Energiebedarfs an ihre Grenzen, soll die Untersuchung der Entwicklung nutzungs- und energieoptimierter Betriebsweisen dienen. Grundsätzlich bedarf es mit zunehmendem Raumvolumen großen Anstrengungen, um die für einen Schwimmbadbetrieb erforderliche Anlagentechnik in geeigneter Weise auszulegen, da sowohl in einer Schwimmhalle wie auch in Wellnessbereichen außergewöhnlich hohe Anforderungen an die Behaglichkeit gestellt werden, die hierauf abgestimmte Konzepte der Raumluftkonditionierung erfordern. Neben den Komfortansprüchen sind heute energieeffiziente Lösungen zu suchen, die infolge der extremen Raumklimabedingungen auch die Vermeidung von

Feuchteschäden an wärmetechnisch kritischen Anschlussbereichen gewährleisten müssen.

Der dynamischen Gebäudesimulation kommt dabei eine große Bedeutung zu, da sie eine realitätsnahe Bilanzierung aller Energieflüsse erlaubt und hierbei neben den Energiegewinnen und -verlusten über die Gebäudehülle auch die aus der Schwimmhallennutzung resultierenden analgentechnischen Energieumsätze zur Sicherstellung der Behaglichkeitsanforderung berücksichtigt. Mit der dynamischen Gebäudesimulation lassen sich die Energieumsätze innerhalb des Gebäudes wie auch die Wechselwirkung des Gebäudes mit seiner Umwelt abhängig der Nutzung analysieren. Werden energetische Betrachtungen einer Schwimmhalle vorgenommen, müssen darüber hinaus die aufzuwendenden Latentwärmemengen berücksichtigt werden, die mit dem Phasenübergang bei der Verdunstung von Wasser aus dem Becken wie auch bei der Entfeuchtung der Raumluft in den anlagentechnischen Systemen einhergehen.

Losgelöst der eigentlichen Ziele und Aufgaben des Forschungsvorhabens sollen daher mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulations-Software IDA Indoor Climate and Energy (ICE) 4.0 des schwedischen Softwareentwicklers EQUA Simulations AB die energetischen Verhältnisse des jahreszeitlichen Gebäudebetriebs erfasst und bewertet werden. Aktuell werden daher am Fachgebiet mehrere Bachelor- und Master-Thesen bearbeitet, die sich mit der Gebäudesimulation im Kontext mit dem Betrieb eines Freizeitbades befassen.

CFD-SIMULATION

Auch wenn mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation die Energieflüsse innerhalb des Gebäudes rechnerisch realitätsnah bilanziert werden können, lassen sich hiermit keine Aussagen zu den Raumluftverhältnissen in den verschiedenen Raumbereichen der großvolumigen Schwimmhalle erhalten. Auch das ergänzende Klimamonitoring liefert trotz der großen Zahl ergänzend der GLT in der Schwimmhalle installierten Sensoren nur begrenzte Informationen zu den Raumluftverhältnissen innerhalb der großen Schwimmhalle. Grund ist die Anordnung der Sensoren an den außenliegenden Wandflächen, die zur Vermeidung einer optischen Beeinträchtigung möglichst versteckt platziert und zur Vermeidung von Vandalismus in größerer Raumhöhe installiert wurden.

Um einen vollständigen Eindruck über die Raumluftverhältnisse innerhalb der Halle zu erhalten, sollten daher Simulationsrechnungen durchgeführt werden, mit deren Hilfe eine Analyse der Strömungsverhältnisse unter Berücksichtigung der geometrischen und klimatischen Randbedingungen möglich wird. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den gemessenen Werten an den Orten installierter Sensoren erlaubt dabei die Qualität der Simulation zu validieren, so dass eine Analyse zum Einfluss der Betriebsweise der diversen anlagentechnischen Komponenten auf die Raumluftverhältnisse innerhalb der Schwimmhalle vorgenommen werden kann. In erster Linie interessiert dabei das öffenbare Folienkissendach, dessen Auswirkungen auf das Raumklima im geschlossenen wie auch im offenen Zustand sich mit herkömmlichen Methoden wenn überhaupt nur schwer bewerten lassen. Neben den Effekten des Verfahrens des mittleren Dachdrittels interessieren dabei aber auch die Wirkweise der im Bad installierten HVAC-Systeme und welche Betriebsweisen nicht nur zu einem energieeffizienten Anlagenbetrieb, sondern auch angenehmen Raumluftverhältnissen führen.

Die Analyse der Raumluftverhältnisse wird mit Hilfe eines CFD-Strömungssimulationsprogramms vorgenommen, mit der die verschiedensten Nutzungsszenarien unter Berücksichtigung der äußeren Witterungseinflüsse untersucht werden sollen. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens angedachten Simulationsuntersuchungen untergliedern sich dabei in verschiedene Teilschritte, die von der Modellbildung als Pre-Processing über die eigentliche Berechnung selbst bis hin zur Auswertung der Berechnungsergebnisse mit einem geeigneten Post-Processing reichen müssen. Während die eigentliche Berechnung und Lösung des Problems nur durch den Einsatz von Software und entsprechenden Lösungsverfahren möglich ist, beeinflusst der Anwender derartiger Programme selbst die Aussagefähigkeit der Berechnungsergebnisse, in dem er ein geeignetes Modell des zu untersuchenden Raumes und die zutreffenden Randbedingungen formuliert. Dabei muss er die wesentlichen Einflussgrößen erkennen und entsprechend in seinen Eingabedatensätzen berücksichtigen. Da i.d.R. aber sehr viele Unsicherheiten im Hinblick auf die Übergabe der Daten zur Beschreibung der geometrischen und thermodynamischen Randbedingungen herrschen und auch die Volumenelementnetzbildung nicht beliebig genau vorgenommen werden kann, bleiben vielfach Unsicherheiten, inwieweit die Berechnungsergebnisse der CFD-Simulation zutreffen. In Verbindung mit parallel durchgeführten Messungen am Bauwerk vor Ort lassen sich aber die gewünschten Validierungen der Berechnungsergebnisse unter realen Randbedingungen realisieren, so dass dann Simulationsstudien zum Einfluss verschiedenster Parameter auf die Raumluftverhältnisse durchgeführt werden können. Ein wesentlicher Untersuchungspunkt der Simulationsstudie wird dabei auch dem bauphysikalischen Verhalten des Folienkissendaches zukommen. Hierbei werden die

sich im Tages- und Jahresgang abhängig der Witterungsverhältnisse innerhalb der durch die Folienmembrane getrennten Luftschichten einstellenden Temperatur- und Strömungsverhältnisse analysiert und auch die sich im Bereich der Befestigungsprofile gegebenenfalls einstellende Tauwassergefährdung beachtet. Um bei diesen Untersuchungen zunächst eine Validierung des Modellansatzes vornehmen zu können, wurden an zwei Stellen des Folienkissendaches Temperatursensoren in die drei unterschiedlichen Luftkissenlagen eingebaut, mit denen sich die im Innern der drei Folienkissenlagen abhängig der klimatischen Verhältnisse in der Schwimmhalle und der äußeren Witterungsverhältnisse erfasst und so mit den Berechnungsergebnissen verglichen werden können.

Für die Berechnung der Temperatur- und Strömungsverhältnisse wird das leistungsfähige Softwarepaket Star-CCM+ der Firma CD-adapco verwendet.

Schwimmhalle

Mit den CFD-Strömungssimulationen sollen in erster Linie die Einflüsse technischer Anlagen auf die Raumluftverhältnisse in der Schwimmhalle analysiert und bewertet werden. Besonders interessant sind dabei die Raumluftzustände, wie sie sich beim Öffnen des Folienkissendaches einstellen. Dabei müssen verschiedene Szenarien untersucht werden, um den Einfluss des Öffnungszustandes der Außentüren, Fenster etc. bei unterschiedlichen außenklimatischen Verhältnissen herauszuarbeiten. Zu berücksichtigen sind dabei auch die Energieaufwendungen wie sie eine Raumluftentfeuchtung oder auch eine Vermeidung der Tauwasserbildung im Anschlussbereich des Luftkissendachs erfordert. Die bisherigen Forschungsarbeiten konzentrierten sich insbesondere auf die Modellbildung, um die räumliche Geometrie der Schwimmhalle und die an der Gebäudehülle wirkenden äußeren Wärme- und Feuchtelasten möglichst genau abbilden zu können. Zur Darstellung der Raumstruktur muss hierfür ein dreidimensionales Volumenmodell gebildet werden. Dazu wurde die Geometrie der Schwimmhalle zunächst mit der CAD-Software AutoCAD generiert und das erzeugte 3D-Modell in die CFD-Software Star-CCM+ exportiert. Es wurden zwei Volumenmodelle gebildet. Das eine Modell weist eine stark vereinfachte Geometrie und eine reduzierte Detailgenauigkeit für die ersten Untersuchungen auf. Das zweite Volumenmodell ist detailgetreu, um die Strömungsverhältnisse und die Verteilung der Temperatur und der relativen Feuchte im Raum vergleichsweise realitätsnah abbilden zu können. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die beiden ins Designtool von Star CCM+ importierten Volumenmodelle. Je größer und komplexer die Oberfläche des Volumenmodells ausgebildet ist, umso mehr Zellen müssen für die Oberflächenvernetzung gebildet werden. Das erfordert einerseits einen deutlich höheren Rechenaufwand und führt zudem zu einer deutlich größeren Fehleranfälligkeit bei der Modellierung und der anschließenden Generierung 3D-Volumennetzes im Simulationstool von Star-CCM+.

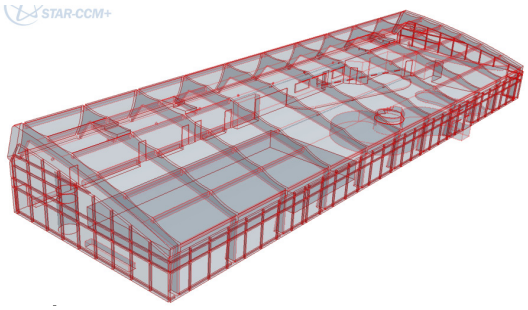

Abbildung 5 Detailliertes Raummodell

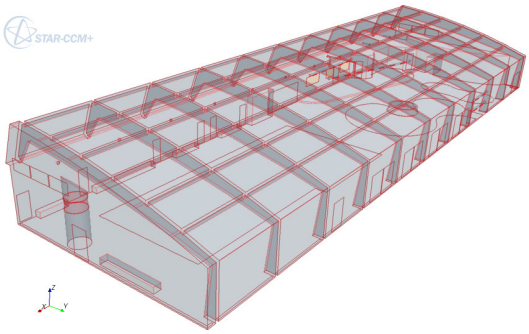

Abbildung 6 Vereinfachtes Raummodell

Nachfolgend werden erste Ergebnisse der Strömungssimulation vorgestellt, die mit dem einfacheren Volumenmodell gewonnen wurden. Abbildung 7 zeigt die Diskretisierung der inneren Raumschale der Schwimmhalle.

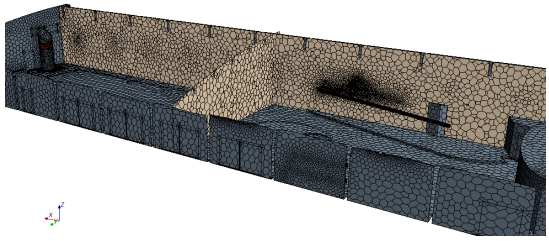

Abbildung 7: Generiertes Volumennetz

Im aktuellen Bearbeitungsstand wird das Modell für die Durchführung der Simulationsrechnungen in der Form vorbereitet, so dass die äußeren Randbedingungen (Außenluft, Strahlung, Beckenwasser etc.) wie auch die anlagentechnischen

Betriebszustände (Betrieb der Lüftungsanlage, Heizung etc.) berücksichtigt werden können.

Die bisherigen Simulationsrechnungen konzentrierten sich auf die Überprüfung der fehlerfreien Nutzbarkeit des einfacheren Volumenmodells nach Abb. 6. Darauf aufbauend werden in den weiteren Untersuchungen das Volumenmodell und die Randbedingungen sukzessive erweitert und auf diese Weise immer stärker den realen Bauwerksverhältnissen angepasst. Bei all diesen Untersuchungen lassen sich dann anhand der Messwerte des Klimamonitorings die sich aus den Simulationen ergebenden Raumluftverhältnisse überprüfen. So geben die nachfolgenden Abbildungen einen ersten Eindruck darüber, welche Möglichkeiten sich mit dem Einsatz der CFD-Simulation zur Analyse der Raumluftverhältnisse ergeben. Abhängig der an den Bauteilrändern wirkenden Wärme- und Feuchtelasten wie auch des jeweiligen Anlagenbetriebs stellen sich unterschiedlichste Temperaturverteilungen und Strömungsverhältnisse in großvolumigen Schwimmhallen ein, die das Behaglichkeitsempfinden der Badegäste maßgeblich bestimmen.

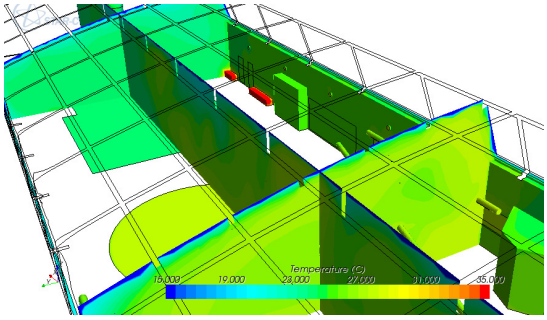

Abbildung 8 Temperaturverteilung in der Schwimmhalle

Desweiteren können Aussagen zur Tauwasserproblematik im Bereich der Wärmebrücken mit bekannter Oberflächentemperatur der Hüllflächenbauteile und den im Nahfeld vorherrschenden Raumklimaten getroffen werden. Im Anschluss daran werden Simulationsberechnungen zu verschiedensten Betriebsszenarien der heizungs- und lüftungstechnischen Anlagen unter Berücksichtigung möglichst realer Klima- und Konstruktionsrandbedingungen im winterlichen und sommerlichen Lastfall durchgeführt. Vor allem die Folgen des Öffnens des mittleren Drittels des Folienkissendaches soll im Rahmen der Simulationsstudien eingehend untersucht werden, schließlich könnten während der sommerlich warmen bis heißen Tagen durch das Öffnen des Daches große Mengen an Energie für die Lüftung und Entfeuchtung eingespart werden.

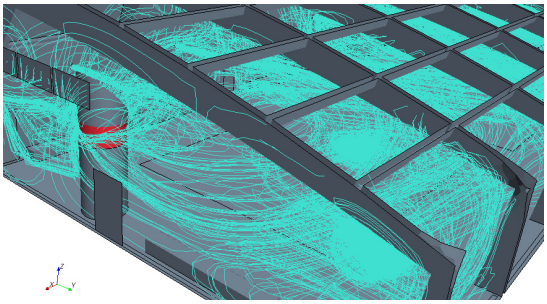

Abbildung 9 Strömungslinien bei geschlossenem Dach im Bereich des turmartigen Luftabzugs

Doch sind die Ergebnisse der Simulationsrechnung ohne eine Validierung durch zusätzliche Messungen vielfach fragwürdig, da sich reale Raumluftverhältnisse im Modell nur bedingt nachzeichnen lassen und eine enorme Rechenleistung erfordern. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens lassen sich aber die Ergebnisse der Simulationsrechnung mit den Messdatenreihen des Monitorings vergleichen und so die Qualität der Berechnung bewerten.

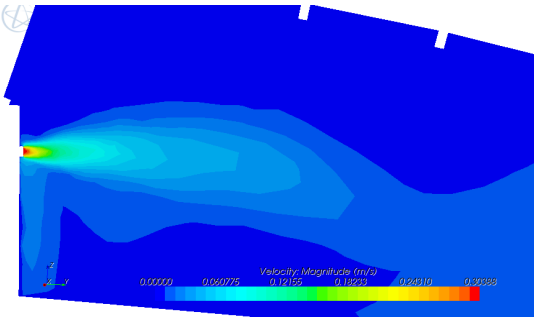

Abbildung 10 Verteilung der Luftgeschwindigkeit im Bereich einer Zuluft-Düse in der Schwimmhalle

Folienkissenelement

Konstruktionen in Form von Membrankissenelementen als thermische Gebäudehülle gewinnen in der modernen Architektur zunehmend an Bedeutung. Dabei ist deren bauphysikalisches Verhalten bisher nur wenig untersucht worden. Bekannt ist, dass der größte Wärmeverlust nicht in Form der Wärmeleitung, sondern in Form der Konvektion erfolgt. So weisen die jeweils unteren, der Schwimmhalle zugeneigten Folien der drei übereinander angeordneten Luftkissen höhere Temperaturen auf als die darüber gelegene Folie, so dass sich die innerhalb des Luftkissens befindliche Luft an der unteren Folie erwärmt und in Form der Konvektion zur oberen Folie hin bewegt. Hier angekommen, gibt die erwärmte Luft den zuvor aufgenommenen Wärmeinhalt wieder ab und fällt zurück. Dadurch und infolge der veränderlichen Dicke des Folienkissens kommt es im Dachanschlussbereich zu einer erhöhten

Wärmebrückenwirkung. Eine rein analytische Bestimmung des Wärmedurch-gangskoeffizienten ist entsprechend der komplexen geometrischen Ausbildung der Folienkissen mit stark gewölbtem Verlauf der Folien kaum möglich. Alternativ lassen sich die hier einstellenden Temperaturen und konvektiven Strömungen mittels CFD-Simulation berechnen. Vor allem im Bereich des Hallenbadbaus kommt den CFD-Berechnungen eine große Bedeutung zu, da neben einer Bewertung der Behaglichkeit auch baukonstruktive Fragestellungen, so z.B. die Tauwasserbildung infolge erhöhter Feuchtelasten in Wärmebrückenbereichen zu beantworten sind, um schadensfreie Konstruktionen durch den geeigneten Betrieb der verfügbaren Anlagentechnik sicherzustellen. Eine detaillierte Betrachtung der Membrankissenkonstruktion ist deshalb ein weiteres Ziel des Projektes. Entsprechend wurden wie bereits angedeutet zwei Folienkissenelemente in jeder Kammer mit einem Temperaturfühler ausgestattet, um den Temperaturverlauf über die Schichtgrenzen hinweg erfassen zu können. Werden nun die thermodynamischen Verhältnisse innerhalb der Folienkissenkonstruktion mittels CFD-Strömungssimulation im Tages- und Jahresverlauf analysiert, lässt sich so das bauphysikalische Dachverhalten abhängig der äußeren und raumseitigen Temperatur-, Druck- und Strömungsverhältnisse analysieren.

STAND DES VORHABENS

In einem ersten Arbeitspaket wurde die umfangreiche Sensorik für das Klimamonitoring des Schwimmbades installiert und die Ankopplung an die GLT vorgenommen, um die dort durchgeführten Messungen zu speichern und zu visualisieren. Diese Daten sollen über einen Zeitraum von zwei Jahren gesammelt und ausgewertet werden, um alle jahreszeitlichen Einflüsse zu erfassen. Parallel dazu werden Berechnungen zu den Temperatur- und Strömungsverhältnissen innerhalb der Schwimmhalle unter Berücksichtigung der Wirkung des Membrankissenelements durchgeführt und anhand der gemessenen Daten validiert. Erste umfassendere und auch technisch nutzbare Ergebnisse werden im Herbst 2010 erwartet. Bis dahin werden auch die laufenden Bachelor-Thesen beendet, deren Gegenstand die dynamische Gebäudesimulation unter Berücksichtigung vereinfachter Annahmen zur Schwimmhallennutzung und zum Betrieb der technischen Anlagen bilden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Erfassung von Messdaten im Rahmen des Klimamonitorings wie auch die parallele Untersuchung der Raumluftverhältnisse mittels CFD-Strömungssimulation sollen in der neuen Schwimmhalle des Freizeitbads der Stadt Kelsterbach durchgeführt werden, um eine Optimierung des Betriebs der anlagentechnischen Komponenten herausarbeiten zu können. Hierbei interessiert insbesondere die Bewertung des sommerlichen Energieeinsparpotenzials infolge des Öffnens des mittleren Drittels des Folienkissendaches. Neben den Zielen eines energieeffizienten Betriebs der Schwimmhalle hängt ein wirtschaftlicher Betrieb des Freizeit- und Wellnessbades auch von der Behaglichkeitsempfindung der Badegäste wie auch von einer schadensfreien Konstruktion ab. Entsprechend müssen im Rahmen des Forschungsvorhabens die Behaglichkeit der Badbesucher und die Konstruktion des Folienanschlusses hinsichtlich eines Feuchte- und Korrosionsschutzes zuverlässig bewertet werden. Auf diese Weise lässt sich dann der Badbetrieb mit einem minimalen Energieaufwand realisieren. Mit Hilfe der in den Untersuchungen neben dem Monitoring durchzuführenden CFD- und FE-Analysen kann dabei ein sicheres Verständnis zum bauphysikalischen Verhalten des Folienkissendaches geschaffen werden, das eine Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Bauwerke erlauben soll.

AUSBLICK

Aus bisher noch unbekannten Gründen sind die Verbrauchswerte der ersten Betriebsmonate des neuen Freizeitbades im Vergleich zu den bei der Planung prognostizierten Energieverbrauchswerten deutlich zu hoch. Da die Gebäudehülle in einem energetisch hochwertigen Standard errichtet wurde und so die Transmissionswärmeverluste hierfür nicht verantwortlich sein können, scheinen die Verluste auf einen nicht hinreichend optimierten Betrieb der technischen Anlage zurückzuführen sein. Eine Überprüfung der Anlagenparameter ist demzufolge dringend erforderlich, um den energieeffizienten Betrieb des Bades bei gleichzeitig behaglichem Aufenthalt sicherzustellen.

LITERATUR

CD-adapco. 2007: STAR-Design Users Guide

VDI 2089. 2005 „Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern“

Willems, Wolfgang M.; Dinter, Simone; Schild, Kai. 2006. Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1 Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung, Vieweg+Teubner Verlag.

Andreas Kaufmann. 2009. Bauphysikalisches Verhalten von Membrankissenkonstruktionen, 2. Fachsymposium zum konstruktiven Membrankissenbau, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Deutschland