

Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen



Auftraggeber:
Bädergesellschaft Lünen



BÄDERGESELLSCHAFT LÜNEN

Mit Förderung durch das
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit



August 2013

Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen

Autoren:

Dipl.-Ing. (FH) Søren Peper
MPhys. Jessica Grove-Smith

Unter Mitarbeit von:

Florian Gressier
Waldemar Rupps
Dr. Benjamin Krick
Esther Gollwitzer
Arthur Dumler

Herausgeber:

PASSIVHAUS INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstraße 44/46
D-64283 Darmstadt
Tel: 06151-82699-0
E-Mail: mail@passiv.de
www.passiv.de

Darmstadt, August 2013

Dieser Bericht entstand im Auftrag der Bädergesellschaft Lünen mit Fördermitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Wir danken Dr. Gerd Koch und Thomas Claus von der Bädergesellschaft Lünen für die gute Zusammenarbeit.

Insbesondere danken wir für die konstruktive Mitarbeit sowie die schnellen Antworten und guten Ideen dem Technikfachplaner des Bades Olaf Ahrens vom Ingenieurbüro ENERATIO Hamburg.

Alle Abbildungen und Grafiken dieses Berichtes sind Eigentum des Passivhaus Instituts. Abweichend sind jeweils die Quellen angegeben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zusammenfassung.....	1
2	Gebäudebeschreibung.....	8
2.1	Luftdichtheit	12
2.2	Wärmeversorgung	14
2.3	Beckenwasserkreisläufe	17
2.4	Lüftungstechnik.....	19
3	Messtechnik.....	23
3.1	Temperatur- und Feuchtemessung in den Räumen	23
3.1.1	Kalibrierung der Sensoren	24
3.1.2	Hallen-Mittelwerte: Temperatur und Feuchte.....	26
3.2	Beckenwassertemperatur	29
3.3	Lüftungsgeräte.....	29
3.4	Stromverbrauchsmessungen	31
3.4.1	Erzeugung Solarstrom (PV)	32
3.5	Weitere Sensoren.....	33
4	Messdatenauswertung.....	34
4.1	Besucherzahlen.....	34
4.2	Wetterdaten	36
4.3	Lufttemperaturen und Luftfeuchten im Gebäude.....	38
4.3.1	Oberflächentemperatur Verglasung.....	45
4.4	Wassertemperaturen	47
4.5	Lüftung	49
4.5.1	Volumenstrom Hallengeräte.....	49
4.5.2	Volumenstrom Geräte der Nebenzonen	52
4.5.3	Auswirkungen der Volumenstromänderungen (Geräte Nebenzonen).....	55
4.5.4	Stromeffizienz der Lüftungsgeräte	58
4.5.5	Durchströmung der Halle / Nebelversuche	59
4.5.6	Außenluftanteil	60
4.5.7	Änderung des Regelverhaltens.....	62
4.5.8	Luftgeschwindigkeit über der Wasseroberfläche	63
4.6	Versuchsreihen und geänderte Betriebsbedingungen.....	65
4.6.1	Variation der Hallenfeuchte.....	65
4.6.2	Reduktion der Zuluftmenge.....	68
4.7	Wasserverbrauch.....	70
4.8	Energieverbrauch	72
4.8.1	Wärmelieferung.....	74
4.8.2	Wärmeverbrauch.....	75
4.8.3	Stromverbrauch.....	80
4.8.4	Stromverbrauch und Durchfluss Beckenwasserkreisläufe	87
4.9	End- und Primärenergie.....	90
5	Optimierung durch Energiebilanzierung.....	93
5.1	Vergleich: Messdaten und berechneter Endenergiebedarf.....	94
5.1.1	Beckenwassererwärmung.....	95
5.1.2	Raumheizung	110
5.1.3	Trinkwarmwasser	116
5.1.4	Strom.....	119
5.2	Energiebilanzierung: Zusammenfassung & Aussichten.....	120
6	Perspektiven	124
7	Literaturangaben.....	126
8	Anhang: Entfeuchtungsleistung im Verlauf	128

1 Einleitung und Zusammenfassung

Der Energieverbrauch von Schwimmbädern ist, bedingt durch die hohe Raumlufttemperatur, den hohen Lüftungswärmeverlusten sowie der energieaufwendigen Wassertechnik sehr hoch. Bedingt durch den Bau vieler Bäder in den 70er Jahren stehen in vielen Städten und Gemeinden grundlegende Sanierungen bzw. der Abriss und ggf. Neubau von Hallenbädern an. Es ist ein Sanierungsstau entstanden und viele Städte und Gemeinden sind von den hohen Betriebskosten der alten Bäder stark belastet. In Deutschland gibt es nach [Heiden/Meyrahn 2012] allein 3.448 Hallen-, Freizeit- und Kombibäder - der Bedarf, energetisch verbesserte Lösungen zu entwickeln und umzusetzen, ist damit hoch.

Vor diesem Hintergrund wurde untersucht, wie sich das Passivhaus-Konzept als Leitprinzip auch auf Hallenbäder anwenden lässt: Das Ziel ist, ein Optimum an Behaglichkeit (z.B. durch hohe Oberflächentemperaturen auch an großen Verglasungsflächen) bei deutlich reduziertem Energieeinsatz zu ermöglichen. Die Potenziale wurden zunächst vom Passivhaus Institut in einer Grundlagenstudie für Passivhaus-Hallenbäder bestimmt [Schulz et al. 2009], um die konkreten Maßnahmen dann in Pilotprojekten umzusetzen.

Als Kernpunkte des Passivhaus-Hallenbad-Konzeptes kristallisierten sich heraus:

- Durch eine thermisch sehr hochwertige Gebäudehülle werden die Transmissionswärmeverluste signifikant gesenkt.
- Die thermisch verbesserte Gebäudehülle, insbesondere auch die transparenten Bauteile, bewirken höhere Oberflächentemperaturen und reduzierten Kaltluftabfall an den Bauteilen, insbesondere an der Verglasung und anderen Fensterkomponenten. Durch diese Qualität wird zum einen die Behaglichkeit erhöht, zum anderen kann das Bad mit höheren Luftfeuchten betrieben werden (bis zu 64 %), ohne dass es zu Kondensat Ausfall kommt.
- Durch die erhöhte Raumluftfeuchte werden die Wärmeabgabe durch die Verdunstung vom Beckenwasser sowie der Entfeuchtungsbedarf der Hallenluft erheblich gesenkt.
- Durch den Einsatz hochwertiger Lüftungswärmetauscher sowie einer angepassten Lüftungssteuerung können die Lüftungswärmeverluste sowohl in den Schwimmhallen als auch in den Nebenräumen deutlich reduziert werden.
- Der Strombedarf wird ebenfalls signifikant reduziert (z.B. durch Vermeidung hoher Umluftmengen und dem Einsatz von hocheffizienten Geräten wie Lüftungsmotoren, Leuchtmittel, Pumpen etc.)

- Verbesserte Schwimmbadtechnik mit energieeffizienten elektrischen Anlagen sowie die umfangreiche Wiederverwendung von Filtrerrückspülwasser (Abwasseraufbereitung) sind weitere wichtige Grundpfeiler des Konzeptes.

Die Grundlagenstudie zu Passivhaus-Hallenbädern wurde am Beispiel des geplanten Neubaus des Lippe-Bades vom Passivhaus Institut erstellt. Daran hat sich als Umsetzung der Bau des Lippe-Bades als Prototyp angeschlossen. Die Planung und der Bau des Bades wurden durch das Projekt zur integralen Planung begleitet [BGL 2011]. Das Bad ging im September 2011 in Betrieb. Da es sich damit bei diesem Gebäude um ein Pilotprojekt des Passivhaus-Hallenbadkonzeptes handelt, von dem grundlegende Erkenntnisse zu den Energieströmen in solchen Bädern erwartet werden, wurde ein umfassendes Monitoring durchgeführt. Dieser Bericht enthält die Auswertung der Messdaten aus dem ersten Messjahr und die daraus gewonnenen Erkenntnisse.

Bei dem Hallenbad handelt es sich um ein Sportbad mit insgesamt fünf Becken. Zusätzlich zum Grundlagenkonzept wird im Lippe-Bad für die Heizungs- und Warmwasserbereitung Niedertemperaturwärme aus der Gehäusekühlung sowie der Abgaskühlung (Brennwertnutzung) der beiden unmittelbar benachbarten Blockheizkraftwerke des Fernwärmenetzes Lünen genutzt. Damit wurde eine primärenergetisch extrem günstige Wärmeversorgung realisiert. Die Energiebezugsfläche (EBF) des gesamten Hallenbades beträgt 3.912 m², die Wasserfläche der insgesamt fünf Becken 850 m². Es gibt ein kombiniertes Eltern-Kind- und Warmbecken (175 m²), ein Lehrbecken (100 m²) mit Hubboden sowie zwei Sportbecken mit insgesamt neun Bahnen (Länge: 25 m / Fläche: 575 m²). Die Beheizung findet ausschließlich über die Zuluftnacherwärmung statt, auf statische Heizflächen sowie Fußbodenheizung konnte verzichtet werden, womit sich die Vorzüge des Passivhaus-Konzeptes in Bezug auf technische Vereinfachung hier zwanglos umsetzen ließen. Im Jahr 2012 haben über 208.000 Besucher das Hallenbad an der Lippe genutzt, insbesondere Vereine und Schulen sind dabei stark vertreten.

Das Gebäude wurde von dem Architekturbüro „nps tchoban voss“ (npstv) aus Hamburg entworfen und geplant. Die Planung der gesamten Haus-, Lüftungs- und Schwimmbadtechnik erfolgte durch das Ingenieurbüro ENERATIO aus Hamburg. Die energetische Beratung und Qualitätssicherung erfolgte durch das Passivhaus Institut, Darmstadt. Bauherrin und Initiatorin ist die Bädergesellschaft Lünen.

Details zum Gebäude, zur integralen Planung und Realisierung des Projektes sind in dem vorausgehenden Bericht zur integralen Planung des Bades [BGL 2011] dargestellt. Für die energetische Bilanzierung des Bades wurde in der Planungszeit, neben dynamischen Simulationen, ein speziell angepasstes Mehrzonen-PHPP (Passivhaus Projektierungs-Paket) für Hallenbäder entwickelt und angewendet [PHPP].



Abbildung 1: Luftbild des Lippe-Bades (Quelle: Bädergesellschaft Lünen)

Von Interesse für die energetische Gesamtbeurteilung des Bades sind zunächst die Endenergieverbrauchswerte, die vom Gebäude insgesamt bezogen wurden. Als spezifische Jahresverbrauchswerte des Lippe-Bades ergibt sich für den Jahreszeitraum April 2012 bis einschließlich März 2013 ¹:

Wärmebezug: 258 kWh/(m²_{EBF} a)
Strombezug: 156 kWh/(m²_{EBF} a)

Bezieht man diese gesamten Jahresverbrauchswerte auf die **Beckenfläche** von 850 m², so ergeben sich die folgenden spezifischen Verbrauchswerte:

Wärmebezug: 1.189 kWh/(m²_{Becken} a)
 Strombezug: 718 kWh/(m²_{Becken} a)

Der Vergleich mit anderen Bädern gestaltet sich nicht einfach, denn es sind nur wenige verlässliche bzw. geeignete Vergleichsdaten bekannt. Bei den verfügbaren Literaturangaben [ages 2007], [DGfDB R 60.04], [Schlesiger 2001] und [VDI 2089-Blatt 2] handelt es sich um keine einzelnen Bäder, sondern um Mittelwerte oder Bandbreiten von ganz unterschiedlichen Bädern oder Bädergruppen, daher ist die Schwankungsbreite der angegebenen Energieverbräuche sehr groß. Um dennoch eine erste Einordnung des Lippe-Bades vornehmen zu können, wurden die Angaben aus der Literatur gemittelt und deren Schwankungsbreite (Größt- und Kleinstwert) angegeben (Abbildung 2).

¹ Insgesamt zwölf Monate, d.h. ein vollständiges Jahr. Der Zeitraum enthält einige Interpolationsrechnungen bei Zählerausfall und Zählerumbau und inkludiert einen Zeitraum von sechs Wochen mit Revisionsarbeiten im Sommer 2012.

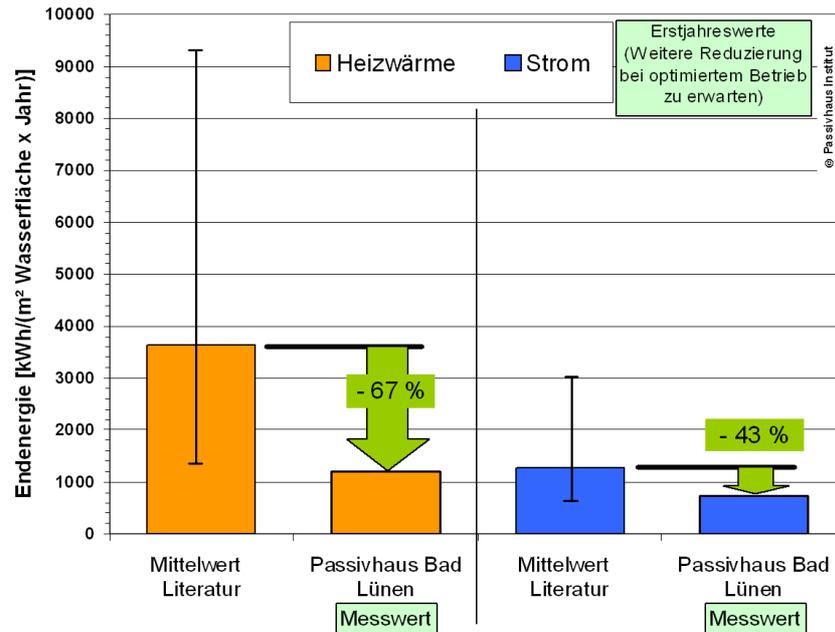


Abbildung 2: Vergleich der gemessenen Verbrauchswerte für den gesamten Wärme- und Strombezug (Endenergie) des Hallenbades Lünen mit Werten aus der Literatur. Die Schwankungsbreite der Literaturwerte ist durch die Größt- und Kleinstwerte (schwarze vertikale Linien) angegeben.

Bereits diese erste Orientierung zeigt deutlich, dass die Verbrauchswerte in Lünen bereits im ersten Betriebsjahr deutlich unter den Mittelwerten der Literatur liegen: Im Wärmebereich liegt der Messwert fast 70 % unter dem Literaturmittelwert, beim Strom sind es mehr als 40 %. Das erste Betriebsjahr im Lippe-Bad war, wie es bei gerade in Betrieb genommenen Neubauten generell der Fall ist, gekennzeichnet durch die Einregulierung der komplexen Gebäudetechnik. Die Auswertung der Messdaten in diesem Bericht verdeutlicht, dass im Betrieb durchaus ein weiteres Optimierungspotential vorhanden ist und in der Zukunft noch niedrigere Verbrauchswerte erwartet werden können.

Wärmeverbrauch im Hallenbad Lünen

Der Wärmeverbrauch teilt sich in drei Verbrauchsbereiche auf:

- Beckenwassererwärmung / 123,4 kWh/(m²a)
- Nachheizung Lüftung (Luftbeheizung) / 93,7 kWh/(m²a)
- Warmwasserbereitung (Duschen/Reinigung) / (35,0 kWh/(m²a))

Die Beckenwassererwärmung hat in diesem Bad mit 49 % den größten Anteil am Wärmeverbrauch. Innerhalb des zweitgrößten Teilbereichs, der Luftnachheizung, benötigt die Beheizung der vier Hallen dominante 72 % des Wärmeverbrauchs. Die geringe Differenz (2,3 %) zwischen der Wärmelieferung an das Bad und dem Wärmeverbrauch der Teilbereiche ist in der Wärmeabgabe des Leitungsnetzes sowie Messabweichungen der Wärmehöher begründet.

Eine in Lünen installierte umfangreiche Abwasseraufbereitungsanlage kann maximal etwa 70 % des Filtrerrückspülwassers aufbereiten und in die Beckenwasserkreisläufe einspeisen. Diese große Wassermenge (bis über 15.000 m³/a) muss nicht mit Kaltwasser von außen nachgespeist und aufgeheizt werden. Die Anlage war während der überwiegenden Zeit des Monitorings *nicht* in Betrieb. Nach technischer Anpassung soll sie zeitnah wieder angeschlossen werden. Damit einhergehend ist eine erhebliche weitere Einsparung von ca. 50 bis 60 kWh/(m²a) zu erwarten.

Wärmelieferung an das Hallenbad Lünen

Die Lieferung der Wärme für alle Verbraucher erfolgt aus diesen vier Quellen:

- Direktbezug vom Biogas-BHKW (ab Juni 2012) (33,9 %)
- Abgaswärmetauscher von zwei BHKWs (Brennwertnutzung) (33,5 %)
- Gehäuseabwärme von zwei BHKWs (16,6 %)
- Fernwärmenetz Stadt Lünen (16,0 %),

Damit ist eine primärenergetisch sehr günstige Lösung realisiert worden, weil durch die zwei direkt benachbarten BHKW-Anlagen Wärme auf niedrigem Temperaturniveau genutzt werden kann. Im Normalfall würde diese als Abwärme weggeleitet bzw. als Abgaswärme freigesetzt werden. Zudem verfügt das Fernwärmenetz aufgrund eines hohen Anteils regenerativer Energie über einen sehr niedrigen Primärenergiefaktor. Durch die hohe Effizienz des Bades selbst reicht sowohl das Temperaturniveau als auch das Mengengerüst dieser Quellen aus: Die Anlage ist ein gutes Beispiel dafür, wie Energieeffizienz bei Gebäude und Technik sowie die Nutzung erneuerbarer Energie zu Synergien führen, die eine wirklich überzeugende Gesamtlösung ermöglichen.

Stromverbrauch im Hallenbad Lünen

Die Stromversorgung des Bades wird durch Netzbezug sowie eigene Solarstromproduktion sichergestellt. Das Bad verfügt über eine große PV-Anlage auf dem Dach (91 kWp) sowie zwei im Außenbereich aufgestellte PV-Tracker (19,7 kWp). Zeitweilige Stromüberschüsse sowie die komplette Stromproduktion der PV-Tracker werden in das öffentliche Netz eingespeist. Von den verbrauchten 156 kWh/(m²a) Strom im Hallenbad konnten knapp 12 % von Solarstrom gedeckt werden. Zusätzlich wurden 6,2 kWh/(m²a) Solarstrom eingespeist (entspricht absolut über 24.200 kWh). Beim Strom liegt in diesem Fall trotz der sehr hohen Effizienz somit immer noch ein deutlich höherer Verbrauch im Hallenbad vor, als mit der PV-Anlage im Jahresdurchschnitt erzeugt werden kann. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Entwicklung und des Einsatzes stromeffizienter Techniken.

Den mit Abstand größten einzelnen elektrischen Verbrauchsbereich stellt die Lüftungstechnik dar (34 %), gefolgt von den Umwälzpumpen der Beckenwasserkreisläufe (24 %).

Lüftungskonzept

Zur Versorgung der unterschiedlichen Gebäudebereiche werden insgesamt sechs Lüftungsgeräte mit Nachheizregistern betrieben, welche sich im Keller des Gebäudes befinden. Eingesetzt werden zwei unterschiedliche Gerätetypen. Bei den Hallengeräten handelt es sich um eine Sonderanfertigung mit je zwei Kreuzstrom- und einem Gegenstromwärmeübertrager in Reihe. Eines der Geräte ist mit einer Wärmepumpe ausgerüstet, um der Fortluft weitere Wärme zu entziehen (Enthalpierückgewinnung). Wegen der thermisch hochwertigen Gebäudehülle ist es nicht mehr notwendig, die Pfosten-Riegel-Fassaden mit trockener Luft anzublasen.

Der Lüftungstechnik kommt in einem energieoptimierten Hallenbad eine Schlüsselfunktion zu. In der Einregulierungsphase konnte – trotz der bereits guten Ergebnisse – noch nicht das vollständige Potenzial ausgenutzt werden: Die Hallenfeuchte kann noch weiter erhöht werden, die Regelung der Geräte muss noch weiter optimiert werden.

Die Analyse zeigt außerdem, dass der Umluftvolumenstrom in Summe aller Geräte des Hallenbades im Mittel etwa 70 % beträgt, der Außenluftvolumenstrom dagegen nur 30 %. Nur Letzterer ist für die Entfeuchtung der Hallen und für die Einhaltung der Luftqualität (Abtransport von Schadstoffen) notwendig. Der Umluftvolumenstrom dagegen ist nur vorgesehen, um eine gute Durchmischung der Hallenluft sicherzustellen, wozu auch geringere Umluftvolumenströme ausreichen würden. Dies haben die durchgeführten Versuche zur Hallendurchströmung gezeigt (Nebelversuche). Ziel des Passivhaus-Konzeptes für Hallenbäder ist letztlich eine Betriebsweise vollständig ohne Umluftanteil, da dies eine erhebliche Reduktion des Stromverbrauchs der Lüftungsgeräte mit sich bringt.

Im Zuge des Monitorings wurden verschiedene Versuchsreihen zur Auswirkung der höheren Hallenfeuchte und des geringen Umluftvolumenstroms durchgeführt. Damit konnten die erheblichen Auswirkungen auf den Heizwärme- und Stromverbrauch aus der Grundlagenuntersuchung auch in der Praxis bestätigt werden.

Optimierung durch Energiebilanzierung

Die Möglichkeit, bereits während der Planungsphase den Energiebedarf eines Gebäudes verlässlich voraussagen zu können, ist eine grundlegende Voraussetzung, um hohe Energieeffizienz erreichen zu können. Sie ermöglicht die Optimierung einzelner Komponenten sowie des ganzheitlichen Gebäudekonzeptes. Die Energieströme in einem Hallenbad sind aufgrund vieler Wechselwirkungen und Regelungen sehr komplex und daher nur schwer erfassbar. Aus diesem Grund

wurde das oben erwähnte Mehrzonen-PHPP entwickelt. Das Tool wurde während der Planungsphase des Bades für die entstehenden Anforderungen angepasst und befindet sich auch weiterhin in der Entwicklung.

Die vorliegenden Messdaten aus dem Monitoring wurden verwendet, um die Annahmen, Ansätze und Berechnungsmethoden der Energiebilanz zu überprüfen und weiter zu verbessern. Nur im Bereich der Beckenwassererwärmung war eine größere Anpassung der Berechnungsannahmen notwendig. An dieser Stelle lagen die Messdaten deutlich unter den prognostizierten Werten. Die Hauptursache für diese Abweichung waren die während der Planungsphase bewusst auf der sicheren Seite eher hoch angesetzten Verdunstungsmengen, da keine verlässlichen Daten für eine plausible Einschätzung vorlagen. Die vorgestellten Messdaten bestätigen, dass die mittleren Verdunstungsmengen in der Praxis während der Nutzungsstunden deutlich niedriger ausfallen als in der [VDI 2089] zur Auslegung der Lüftungsgeräte angegeben (dabei handelt es sich korrekterweise um die Spitzenlast). Die Größenordnung der tatsächlich vorliegenden Messwerte liegt zwischen ca. 20 % und 40 % der VDI-Auslegungsdaten, je nach betrachtetem Beckenkreislauf und gegebenen Randbedingungen.

Abgesehen von der Beckenwassererwärmung wurde die Größenordnung der restlichen Hauptverbraucher (Raumheizung, Wassererwärmung und Strom) in der Energiebilanz der Planungsphase korrekt abgebildet. Die Übereinstimmung der Messdaten mit den Berechnungen bei angepassten Randbedingungen ist im Rahmen der vorhandenen Unsicherheiten gut, womit der Rechenansatz prinzipiell bestätigt wird und sich eine validierte Grundlage für Folgeprojekte ergibt.

Gesamtbewertung

Das Lünener Hallenbad hat trotz der zu erwartenden Abweichungen aufgrund der typischen Effekte der Einregulierungszeit einen sehr guten Energiekennwert im ersten Messjahr erreicht. Die Maßnahmen aus der Planung haben den beabsichtigten Erfolg erzielt. Wie an verschiedenen Stellen in diesem Bericht beschrieben, ist die energetische Optimierung hinsichtlich der Betriebsweise trotzdem noch nicht ausgeschöpft. Die aktualisierte Energiebilanz für das Bad unter den angestrebten Randbedingungen (z.B. 64 % Hallenfeuchte, reduzierte Umluftvolumenströme, 70 % Filterspülwasseraufbereitung) zeigt, dass eine weitere betriebliche Reduktion des Endenergiebedarfs um bis zu ca. 100 kWh/(m²a) möglich ist. Den größten Anteil dieser orientierenden Berechnung macht hierbei die Einsparung durch die Filterspülwasseraufbereitung aus. Auch der Strombedarf kann durch Reduktion der Umluftmenge deutlich weiter reduziert werden, was bei der primärenergetischen Betrachtung von hoher Relevanz ist.

Das Monitoring wurde im Auftrag der Bädergesellschaft Lünen mit Fördermitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

2 Gebäudebeschreibung

Das Hallenbad „Lippe-Bad Lünen“ wurde als Passivhaus-Hallenbad nach dem Konzept der Grundlagenuntersuchung des Passivhaus Instituts [Schulz et al. 2009] errichtet und ging im September 2011 in Betrieb.

Die Grundgedanken des Konzeptes bestehen aus folgenden Bausteinen: Durch die thermisch sehr hochwertige Gebäudehülle kann der Transmissionswärmebedarf gegenüber Standard-Neubauten signifikant gesenkt werden. Aus der thermischen Verbesserung der Gebäudehülle, insbesondere auch der transparenten Bauteile, resultieren höhere minimale Oberflächentemperaturen, wodurch die Möglichkeit gegeben ist, das Bad mit höheren Luftfeuchten zu betreiben (bis zu 64% rF). Diese Maßnahme senkt die Verluste durch Verdunstung von Beckenwasser und den entstehenden Entfeuchtungsbedarf erheblich. Durch den zusätzlichen Einsatz hochwertiger Lüftungswärmetauscher sowie intelligenter Lüftungssteuerung werden die Lüftungswärmeverluste deutlich reduziert.

Im Lippe-Bad nutzen die verschiedenen Heizkreise die Niedertemperaturwärme aus der Gehäusekühlung (Raumabwärme) sowie der Abgaskühlung (Brennwertnutzung) der beiden unmittelbar benachbarten Blockheizkraftwerke des Fernwärmenetzes Lünen. Damit wurde eine primärenergetisch sehr günstige Wärmeversorgung realisiert. Des Weiteren werden diverse energieeffiziente elektrische Anlagen eingesetzt (Beleuchtung, Pumpen, Motoren). Auch im Bereich der Wassertechnik sind diverse Optimierungen realisiert worden.

Die Energiebezugsfläche (EBF) des gesamten Hallenbades beträgt **3.912 m²**, die Wasserfläche der insgesamt fünf Becken **850 m²**. Es gibt ein kombiniertes Eltern-Kind- und Warmbecken (175 m²), ein Lehrbecken (100 m²) mit Hubboden sowie zwei Sportbecken mit insgesamt 9 Bahnen (Länge: 25 m, 575 m²). Die Beheizung findet ausschließlich über die Lüftung statt, statische Heizflächen sind nicht vorhanden, auch keine Fußbodenheizung.

Das Gebäude wurde von dem Architekturbüro „nps tchoban voss“ (npstv) aus Hamburg entworfen und geplant. Die Planung der gesamten Haus-, Lüftungs- und Schwimmbadtechnik erfolgte durch das Ingenieurbüro ENERATIO aus Hamburg. Die energetische Beratung und Qualitätssicherung erfolgte durch das Passivhaus Institut, Darmstadt. Bauherrin ist die Bädergesellschaft Lünen.

Details zum Gebäude, zur integralen Planung und Realisierung des Projektes sind in [BGL 2011] dargestellt. Die folgenden Abbildungen geben einen Eindruck vom Gebäude:



Abbildung 3: Westfassade des Bades mit Haupteingang (links) und Halle 1+2 (rechts unten)



Abbildung 4: Luftbild des Bades (Quelle: Bädergesellschaft Lünen)

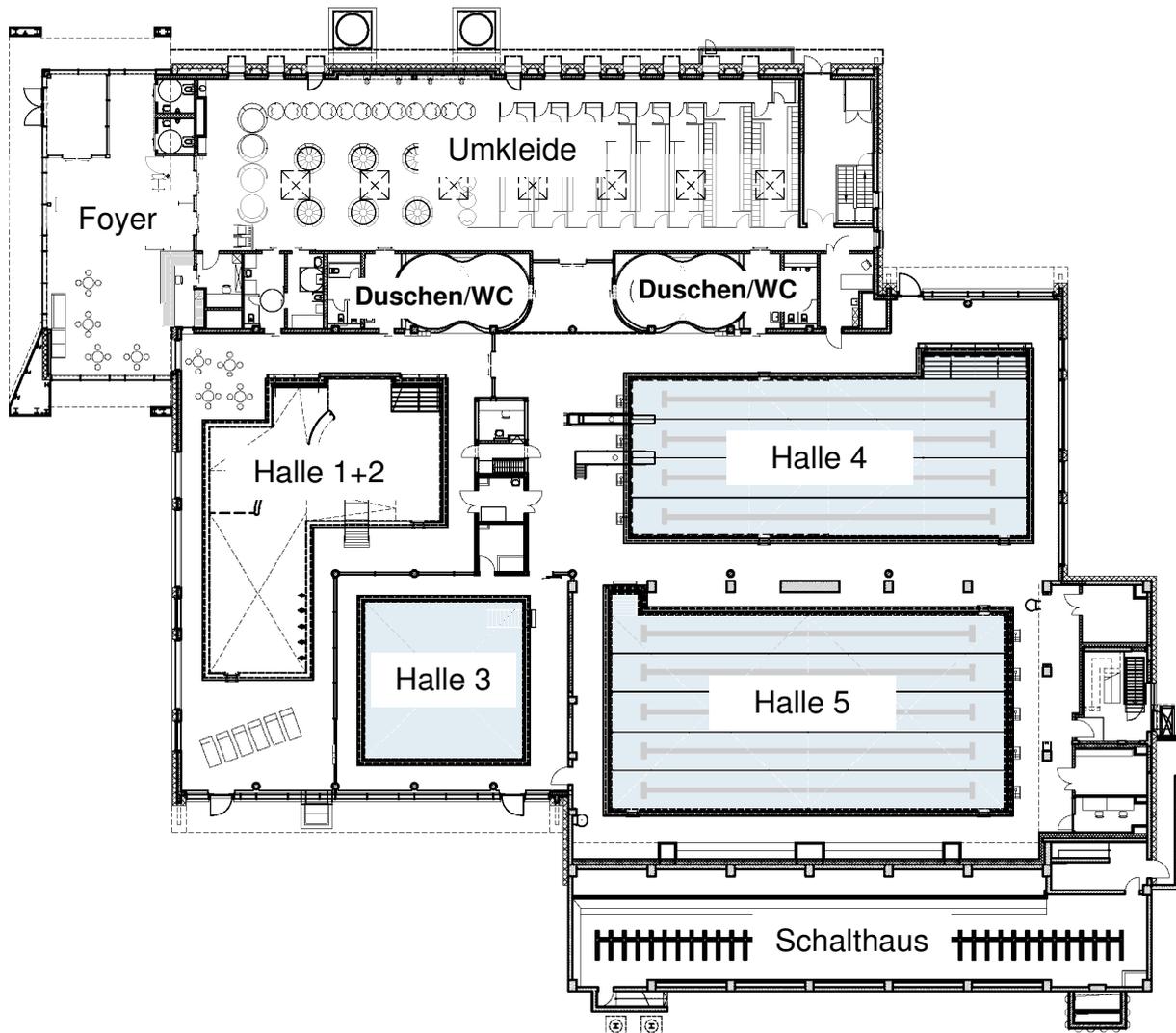


Abbildung 5: EG Grundriss des Gebäudes mit den unterschiedlichen Nutzungsbereichen (Quelle: npstv)

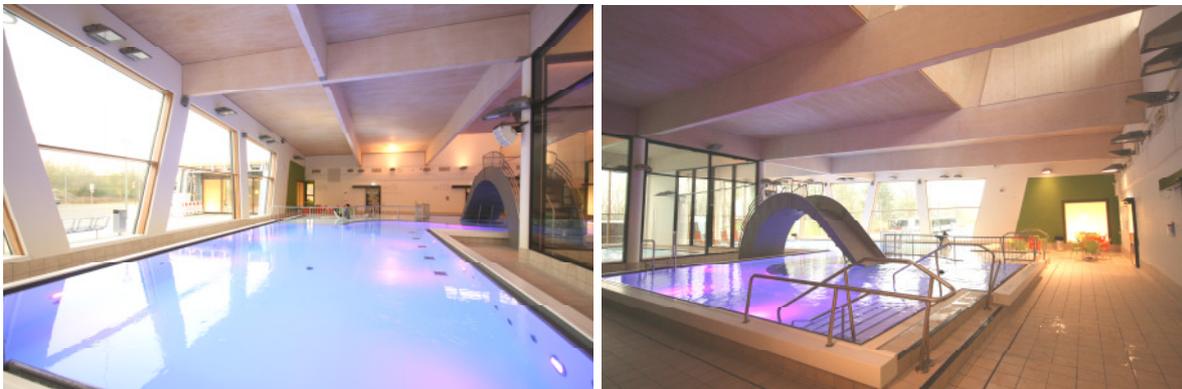


Abbildung 6: Innenansichten von Halle 1+2 mit dem Freizeitbecken und Eltern-Kind-Bereich (links von Süden, rechts von Osten)



Abbildung 7: Innenansichten von Halle 3 mit dem Lehrschwimmbecken mit Hubboden (links von Süden, rechts von Nord-Osten mit Zuluftelement)



Abbildung 8: Innenansichten von Halle 4 mit vier 25-Meter-Bahnen (links von Westen, rechts von Süden)

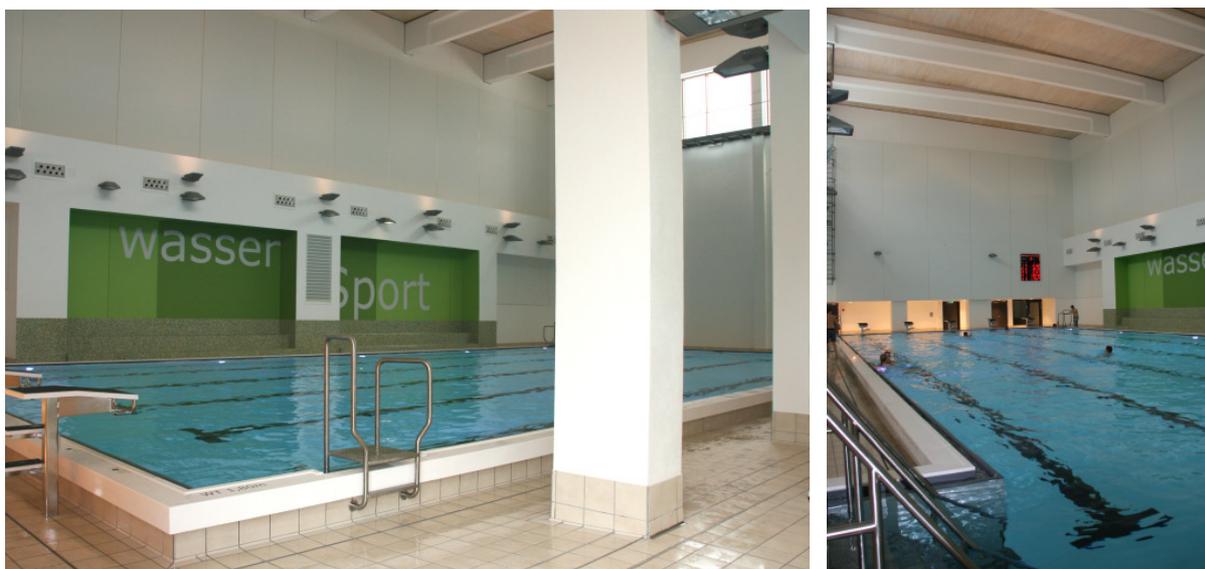


Abbildung 9: Innenansichten von Halle 5 (im Altbauteil) mit fünf 25-Meter-Bahnen (links von Osten, rechts von Westen)



Abbildung 10: Duschen (links) und Umkleide (rechts)



Abbildung 11: Eingangsbereich/Foyer mit dem Kassenbereich



Abbildung 12: Wassertechnik (Filter) im Keller (links) und Lüftungsgeräte im Keller (rechts)

2.1 Luftdichtheit

Die Luftdichtheit eines Schwimmbades ist aufgrund der erhöhten Raumluftfeuchte von ganz besonderer Wichtigkeit. Aufgrund dieser Tatsache und der Größe des Gebäudes (Luftvolumen: 23.962 m³) wurde der Anforderungswert bereits in der Planungszeit auf $n_{50} = 0,2$ 1/h festgelegt. Bei großen Gebäuden ist - aufgrund des deutlich günstigeren A/V-Verhältnisses (hier 0,39 1/m) - der n_{50} -Wert nur von untergeordneter Aussagekraft. Von Bedeutung ist der hüllflächenbezogene Kennwert q_{50}

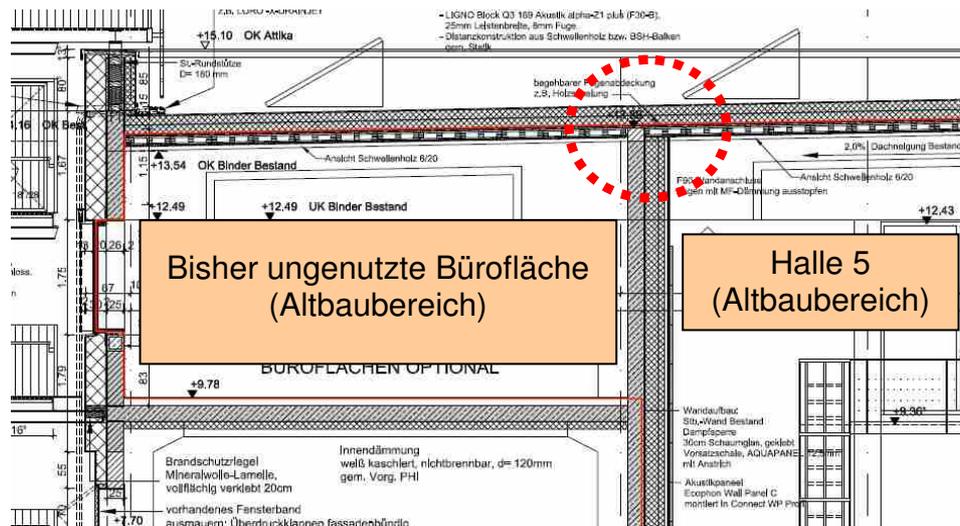
mit der Einheit [$\text{m}^3/(\text{h m}^2)$]. Bei diesem Gebäude ergibt sich bei der Anforderung $n_{50} = 0,2 \text{ 1/h}$ der Kennwert zu $q_{50} = 0,52 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$.

Vom PHI wurde am 12.08.2011 die erste Luftdichtheitsmessung des Gesamtgebäudes mit intensiver, mehrstündiger Leckagesuche durchgeführt. Es wurden neben kleineren Einzelleckagen insbesondere Undichtheiten an der Pfosten-Riegel-Fassade sowie im Deckenbereich von Halle 5 zum bisher ungenutzten Bürobereich lokalisiert (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15). Diese vorläufige Messung ergab einen Messwert der deutlich über dem Zielwert von $n_{50} = 0,2 \text{ 1/h}$ lag.

Bei der nachträglichen Klärung wurde ein systematischer Fehler beim Anschluss aller Oberlichter im Umkleidebereich ausgemacht und später behoben. Weitere Kontrollmessungen durch einen Dienstleister ergaben weitere Verbesserungen der Luftdichtheit. Die Leckagen im Dachbereich von Halle 5 konnten bisher nicht nachgearbeitet werden. Dies ist für die nächste Revisionsphase geplant. Unter anderem auch aus diesen Gründen können in dieser Halle bisher nicht die geplanten, erhöhten Raumlufffeuchten verwirklicht werden.



Abbildung 13: Beispiele für die Leckagesuche bei 50 Pa Unterdruck im Bereich der Dachgaube (Halle 1+2) (links) und an den Fenstern im oberen Bereich von Halle 5 (mitte) sowie die abgelöste Verklebung an der Abdichtung der Pfosten-Riegel-Fassade zur Brüstung (rechts)



- Fernwärmenetz der Stadt Lünen
- Abgaswärmetauscher vom Erd- und Biogas-BHKW (Brennwertnutzung)
- Wärmelieferung Biogas-BHKW direkt (Nachrüstung Juni 2012)

Durch die unmittelbar räumliche Nähe der Versorgungsanlagen und dem Bedarf an Wärmenutzung auf niedrigem Temperaturniveau zur Beckenwassererwärmung (ca. 28 bis 32 °C) war es möglich, auch Wärmequellen zu erschließen, welche sonst nicht sinnvoll genutzt werden könnten (Brennwertnutzung Abgas). Es wurde zusätzlich noch ein zweites hydraulisches Netz, nur zur Grundlastversorgung der drei Beckenwasserkreisläufe installiert. Dieses Netz wird aus der Abwärme der **Gehäusekühlung** der beiden BHKWs gespeist und verfügt damit über ein niedrigeres Temperaturniveau (bezeichnet als „NT“ für „Niedertemperatur“). Diese Wärme wird jeweils vor der Nacherwärmung über das HT-Netz in die Beckenwasserkreisläufe eingespeist (siehe auch Abbildung 19 im folgenden Abschnitt).

Durch die Ausnutzung dieser Wärmequellen und dem Einsatz von Biogas ergeben sich für das Bad sehr günstige Primärenergiekennwerte (vgl. [BGL 2011]).

Die Beheizung des Bades erfolgt ausschließlich über die Nacherhitzung der Luft in den Lüftungsgeräten. Statische Heizflächen, Wärmebänke oder Fußbodenheizung sind nicht vorhanden.

Schema Wärmeversorgung

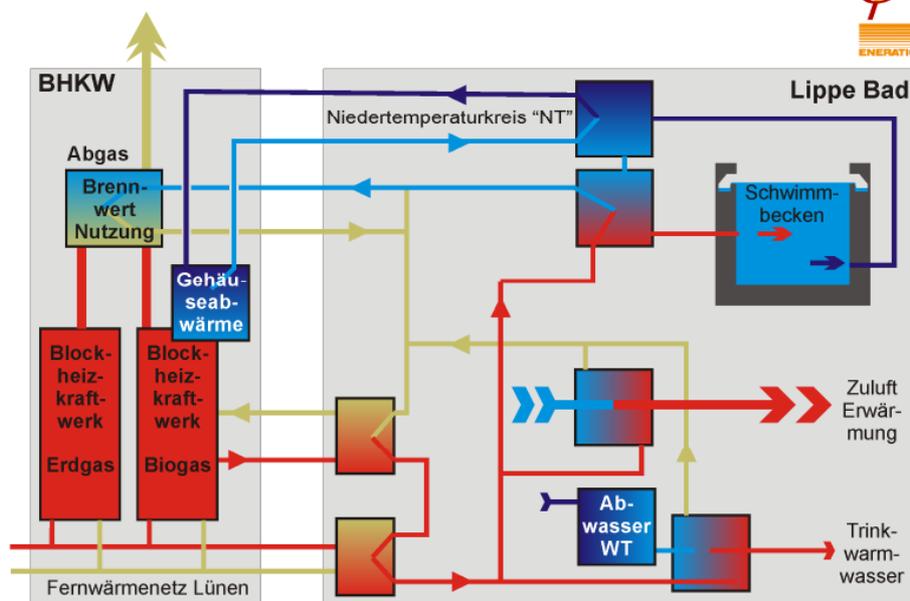


Abbildung 16: Schema der Wärmeversorgung des Hallenbades aus dem Fernwärmenetz, durch das Biogas-BHKW (direkt), Abgas-Brennwertnutzung beider BHKW-Anlagen, sowie der Abwärme aus den beiden BHKW-Gehäusen (angepasst nach [BGL 2011])



Abbildung 17: Heizungsraum im Keller (Altbaubereich) mit den beiden BHKW-Anlagen (links) und einem der beiden Abgaswärmetauscher (rechts)

Die unterschiedlichen Bereiche der Wärmeversorgung werden mittels Wärmezählern (WMZ) gemessen. Dazu sind insgesamt 19 Wärmezähler im Einsatz (siehe Tabelle 1). Die Wärmelieferung wurde im Juni 2012 durch einen direkten Wärmebezug vom Biogas-BHKW ergänzt. Zuvor speisten die beiden BHKWs nur direkt in das Fernwärmenetz ein und das Bad wurde aus diesem Netz versorgt. Der neue Zähler wurde am 21.09.2012 auf die GLT-Anlage aufgeschaltet. Der von diesem Zusatzzähler gemessene Verbrauch zwischen Einbau und Aufschaltung wurde gleichmäßig auf diesen Zeitraum verteilt.

Für die vollständige Erfassung der bezogenen Energie sind alle vier Versorgungszähler notwendig (Bilanzerstellung), für die Aufteilung nach den Abnahmebereichen alle restlichen Wärmezähler. Aufgrund von technischen Verzögerungen kann die vollständige Bilanz erst nach einigen Betriebsmonaten berechnet werden.

Tabelle 1: Einsatzbereiche und Anzahl der verwendeten Wärmezähler

Bereich	Anzahl	Teilbereiche
Wärmeversorgung HT	4 Stück	Fernwärme, Abgaswärmetauscher, Wärme Biogas-BHKW Direktbezug
Lüftungsgeräte	6 Stück	Luftheizregister
Nacherhitzer Lüftung	2 Stück	Luftheizregister Duschen
Warmwasserbereitung	1 Stück	Duschen und Kleinverbraucher
Beckenwasser HT	3 Stück	Drei Kreisläufe
Beckenwasser NT	3 Stück	Drei Kreisläufe (Gehäuseabwärme BHKW)
Summe	19 Stück	

Das NT-Netz wird durch die Gehäuseabwärme der beiden BHKWs versorgt. Dabei wird nicht zwischen Lieferung (von den Gehäusen) und den einzelnen Verbrauchsmessungen (= Abnahme) unterschieden. Es gibt nur die drei Wärmezähler vor den drei NT-Wärmeübertragern der Beckenwasserkreisläufe (= Verbraucher) (siehe nächster Abschnitt). Der Leitungsverlust wird aufgrund der geringen Vorlauftemperatur von ca. 32 bis 34 °C und der Kellertemperatur von knapp 27 °C verhältnismäßig niedrig ausfallen. Bei der Auswertung wurde der Leitungsverlust vernachlässigt und die gemessenen Verbrauchsmengen der drei WMZ identisch als Lieferwert verwendet.

2.3 Beckenwasserkreisläufe

Das Hallenbad verfügt über 4 Becken, wobei es sich bei dem einen um ein kombiniertes Becken mit zwei Bereichen handelt („Warm- und Eltern-Kind-Becken“).

Tabelle 2: Wasserflächen, -volumen und Beckentiefen

	Wasserfläche [m ²] (inklusive Treppen)	Wasservolumen [m ³]	Wassertiefe [m]
Becken 1+2 (Warm- und Eltern-Kind-Becken)	175	185	0,3 bis 1,35 m
Becken 3 (Lehrschwimmbecken mit Hubboden)	100	230	2,3 m
Becken 4 (Sportbecken 1 mit Sprungturm, 4 x 25 m Bahnen)	260	509	bis 3,5 m
Becken 5 (Sportbecken 2; 5 x 25 m Bahnen)	315	565	1,8 m
Summe	850	1.489	---

Der Betrieb der Becken erfolgt über drei getrennte Beckenwasserkreisläufe für Becken 1+2, Becken 3 und Becken 4+5. Jeweils sind Schwallwasserbehälter, Pumpengruppe, Wasseraufbereitung sowie Nachheizung über eine Niedertemperatur-Wärmetauscher (NT) und einen nachgeschalteten Wärmetauscher des Haupt-Heizungsnetzes (HT) installiert. Die Chlorung des Badewassers erfolgt im Lippe-Bad durch die Aufspaltung des zugesetzten Soleanteils mittels Elektrolysezellen. Die schematische Darstellung eines Wasserkreislaufs ist in Abbildung 18, die Anordnung der Nachheizung ist in Abbildung 19 dargestellt.

Zur Verbesserungen der Beckenwasserqualität wurde die temporäre Zudosierung von Aktivkohle nachgerüstet, welche ursprünglich nicht vorgesehen war. Dann wurden in allen drei Beckenwasserkreisläufen Kornkohlefilter nachgerüstet und die Zudosierung wieder rückgebaut (zuletzt Ende April 2013). Die Aufbereitung des

Rückspülwassers wird seit dem 09.07.2012 nicht betrieben. Zur Zeit muss daher das Spülwasser komplett als Abwasser entsorgt werden. Geplant waren etwa 70% des Rückspülwassers mit der Anlage aufzubereiten. Aus diesem Grund wird z.Z. deutlich mehr Frischwasser benötigt als geplant und damit ist auch ein zusätzlicher Energieaufwand zur Aufheizung des Frischwassers notwendig. Die Wasseraufbereitung soll nach Anpassung an die geänderten Filtergrößen etc. wieder in Betrieb genommen werden.

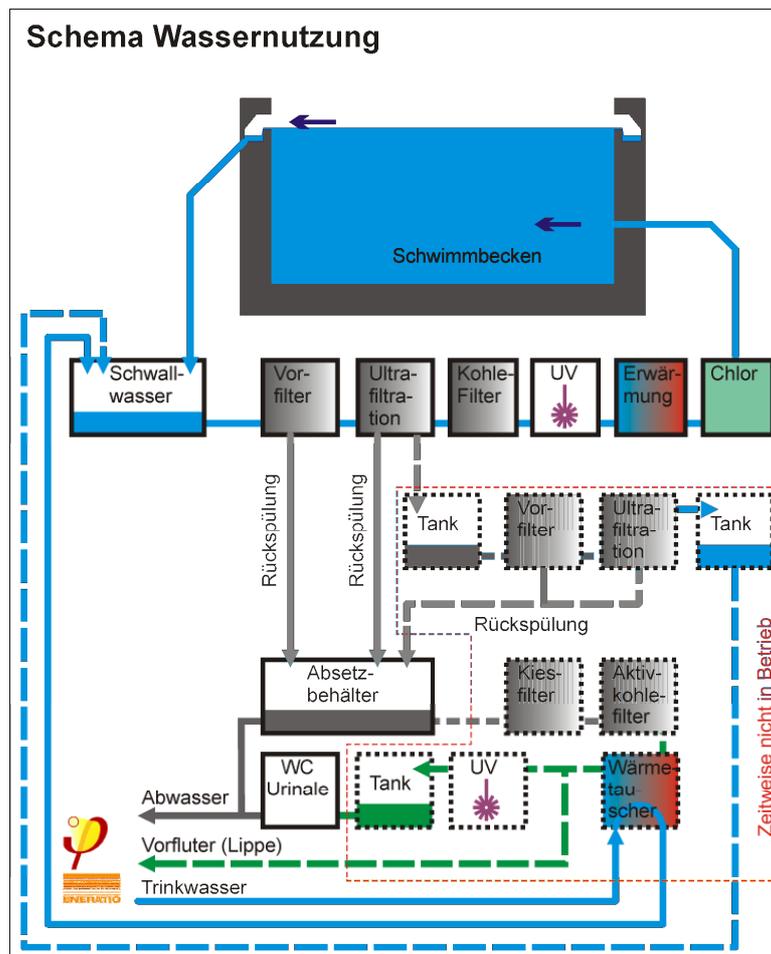


Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Beckenwasserkreislaufes im Lippe-Bad. Der Bereich der Aufbereitung des Rückspülwassers ist seit Juli 2012 nicht in Betrieb (ergänzt nach [BGL 2011]).

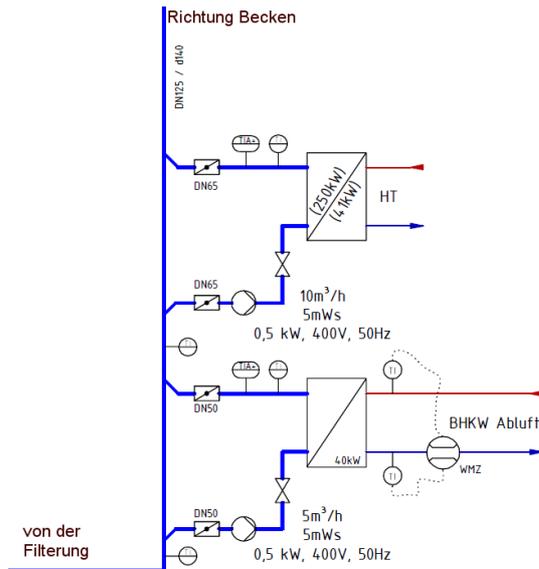


Abbildung 19: Links: Detail der Wärmeversorgung mit NT- („BHKW Abluft“) und HT-Netz aus der Ausführungsplanung zum Beckenwasserkreislauf von Becken 3 (Quelle: Eneratio). Rechts: Foto von einem Wärmeübertrager des Beckenwasserkreislaufs.

2.4 Lüftungstechnik

Zur Versorgung der unterschiedlichen Gebäudebereiche mit Außenluft, zur Luftentfeuchtung der Schwimmhallen sowie zur Beheizung werden insgesamt sechs Lüftungsgeräte mit Nachheizregistern betrieben, welche sich im Keller des Gebäudes befinden. Die Ansaugung der Außenluft und das Abführen der Fortluft erfolgt gemeinsam für alle Anlagen über zwei zentrale Bauwerke. Diese werden mit zwei kurzen (wenige Meter) Kanalschleifen angefahren, welche durch das Erdreich verlegt wurden.



Abbildung 20: Lüftungstürme für die zentrale Außen- und Fortluft aller sechs Lüftungsanlagen (Links) und Lüftungsgerät „Umkleiden/Duschen“ im Keller (rechts)

Bei den vier Hallengeräten handelt es sich um Anlagen der Fa. Menerga vom Typ „ThermoCond“ in modifizierter Bauweise und Regelung. Das Gerät für Halle 1+2 verfügt zusätzlich über eine Wärmepumpe mit der Wärmequelle (Verdampfer) in der Fortluft nach dem Wärmeübertrager und dem Kondensator im Zuluftstrom vor dem Nachheizregister.

Die beiden Anlagen für Umkleiden, Duschen, Foyer und Nebenräume inkl. Keller etc. sind vom Typ „Dosolair“ des gleichen Herstellers. Beim Bereich Umkleide/Duschen gibt es zusätzliche Stützventilatoren im Keller, welche den Lufttransport von den Umkleiden in die Duschen sicherstellen. In diesen beiden Strängen (Dusche und WC Damen sowie Herren) werden nach den Zusatzventilatoren zusätzliche Nachheizregister betrieben, um die höhere Lufttemperatur in den Duschen zu realisieren.



Abbildung 21: Kanalführung mit Zusatzventilator und Nacherhitzer für die Zuluft Duschen Herren

Tabelle 3: Übersicht Lüftungsgeräte (Bereiche, Typen und Volumenströme)

Anlage	Gerätetyp	Wärmeübertrager	Auslegungsvolumenstrom
Halle 1+2	ThermoCond	2 Kreuzstrom + 1 Gegenstrom in Reihe	14.500 m ³
Halle 3	ThermoCond		8.150 m ³
Halle 4	ThermoCond		12.000 m ³
Halle 5	ThermoCond		15.100 m ³
Umkleide/Duschen	Dosolair	2 Kreuzstrom in Reihe	10.000 m ³
Nebenräume	Dosolair		8.875 m ³
Summe			68.625 m³

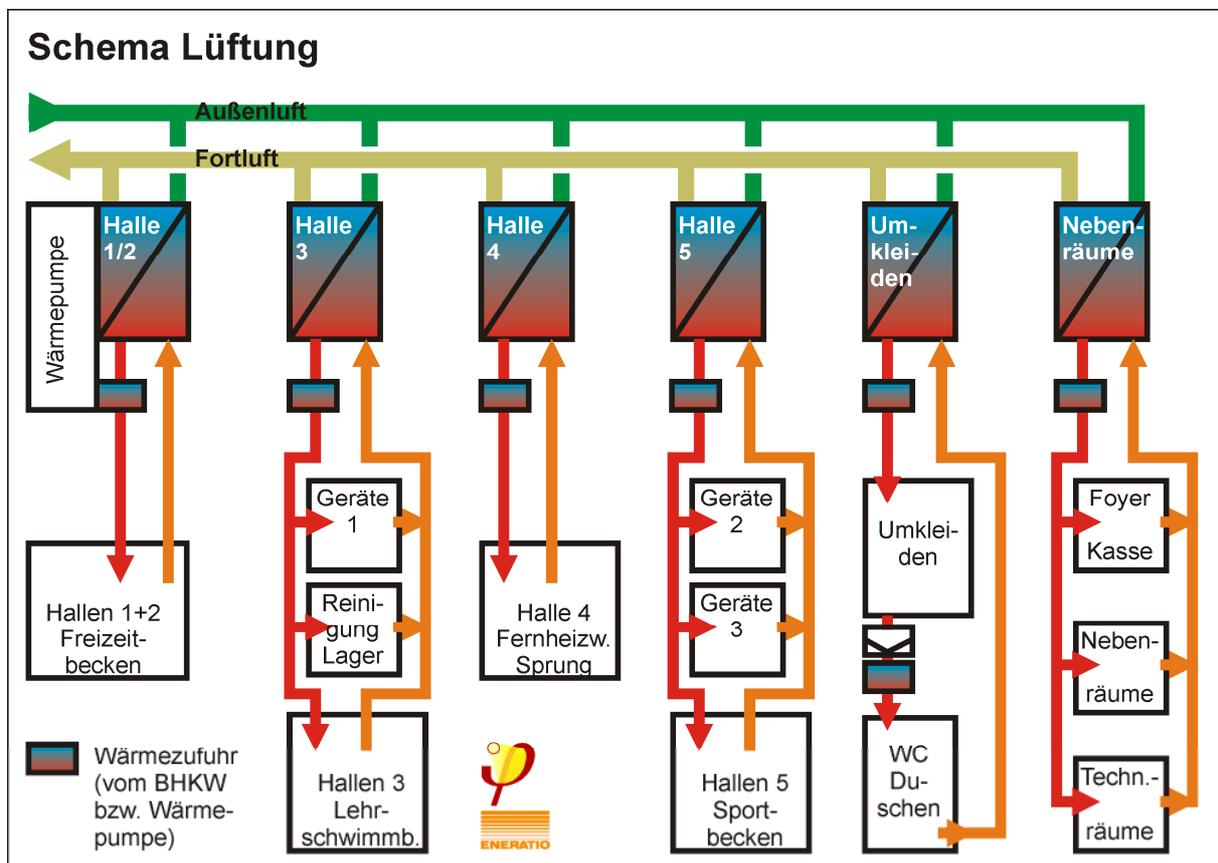


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Lüftungstechnik des Hallenbades (ergänzt nach [BGL 2011])

Aufgrund der thermisch hochwertiger Gebäudehülle ist es nicht mehr notwendig die Pfosten-Riegel-Fassaden mit trockener Luft anzublasen. Üblicherweise werden in einem Bad die Lüftungsgeräte während der Betriebszeiten immer mit dem Auslegungsvolumenstrom betrieben. Dabei wird der Außen- und Umluftanteil mit Hilfe von Klappen geregelt. Dieser dauerhaft hohe Betrieb verursacht einen hohen Stromverbrauch für die Luftförderung. Die vom PHI angestrebte Betriebsweise der

Hallengeräte verzichtet daher vollständig auf einen Umluftanteil. Dies konnte im Lippe-Bad bereits in der Planungsplanungsphase nicht vollständig erreicht werden. Es wurde aber ein deutlich reduzierter Umluftvolumenstrom vorgesehen. Das Kanalnetz inkl. Steuerung der Lüftungstechnik ist daher für die vier Hallen bereits in der Planung so angelegt worden, dass Klappen im Kanalnetz einen reduzierten Luftvolumenstrom (bis etwa halbe Luftmenge) ermöglichen. Durch die Klappen wird sichergestellt, dass eine noch ausreichende Druckdifferenz an der dann reduzierten Anzahl der Weitwurfdüsen vorhanden ist (Motorklappen siehe Abbildung 23). Diese Betriebsweise wurde später getestet (siehe Abschnitt 4.5.5).

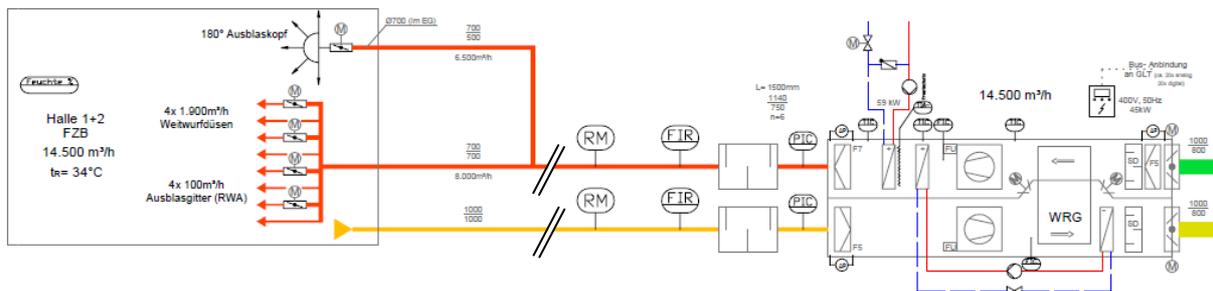


Abbildung 23: Ausschnitt vom Gerät Halle 1+2 aus der „Ausführungsplanung Schema Lüftung“ (Quelle: Eneratio)



Abbildung 24: Weitwurfdüsen für die Zuluft in Halle 3. Die unteren und oberen beiden Reihen der Düsen können getrennt angefahren werden. Links im Bild befindet sich die Abluftöffnung (mit Lamellen).

In den Bereichen Foyer und Umkleide bzw. Duschen sind CO₂- bzw. Feuchte-sensoren mit einer entsprechenden Regelung realisiert worden. Damit werden geringere Volumenströme als im normalen Regelbetrieb möglich.

3 Messtechnik

Im Gebäude ist eine Gebäude-Leit-Technik (GLT) realisiert, mit der der gesamte Betrieb des Gebäudes (Heizung, Wassertechnik, Beleuchtung etc.) geregelt wird bzw. bei der die Informationen aus gesonderten Regelungen zusammenlaufen und Sollwerte vorgegeben werden. Der Leitrechner wird auch genutzt um alle im Bad befindlichen Zähler und Sensoren auszulesen. Zur Speicherung der ca. 700 Kanäle ist durch die GLT-Firma Hermes ein zweiter PC eingesetzt worden, welcher ebenfalls per Fernzugriff erreichbar ist. Für das Monitoring sind diverse zusätzliche Zähler und Sensoren montiert worden, von denen die für das Monitoring entscheidenden hier beschrieben werden.

3.1 Temperatur- und Feuchtemessung in den Räumen

Die Messung der Raumluftparameter Temperatur und Feuchte erfolgt im Gebäude überwiegend mittels der Kombi-Sensoren vom Typ LC-FTA54VV des Herstellers Fa. Thermokon. Bei der Dauermessung via GLT sind 36 Kombi-Sensoren und sieben Temperatur-Sensoren in den Hallen, Umkleiden, Duschen, Foyer und Nebenräumen im Einsatz. An den Verglasungen von Fenstern und Türen in den Hallen 1+2, 3 und 4 sind insgesamt sechs Oberflächensensoren montiert (Fa. Thermokon, Typ OF14).



Abbildung 25: Kombisensor zur Temperatur-und Feuchtemessung der Raumluft

Tabelle 4: Anzahl der im Gebäude eingesetzten Sensoren zur Messung der Raumluftparameter in den Räumen/Hallen und der Oberflächentemperatur der Verglasung

Anzahl	Kombi-Sensoren (Temp./rF)	Temperatur- Sensoren	Oberflächentem- peratur-Sensoren
Halle 1+2	10	-	2
Halle 3	6	-	2
Halle 4	3	-	2
Halle 5	3	-	-
Umkleide, Duschen	8	4	-
Nebenräume, Foyer	6	3	-
Summe	36	7	6

In den Hallen 1+2 und 3 sind an fünf Wandbereichen jeweils drei Kombi-Sensoren übereinander angeordnet (z.B. in ca. 2, 4 und 6 m Höhe) um Aussagen zu möglichen Schichtungen machen zu können (siehe auch Abbildung 26 im nächsten Abschnitt).

3.1.1 Kalibrierung der Sensoren

Für eine wissenschaftliche Messung ist die Qualität der eingesetzten Sensoren nicht ausreichend, außerdem können Einflüsse durch unterschiedliche Kabellängen nicht ausgeschlossen werden. Daher wurden am 28. und 29.03.2012 mit Datenloggern Kalibriermessungen an allen zugänglichen Temperatur-Feuchte-Sensoren und Temperatur-Sensoren durchgeführt. Es wurden 28 Kombi-Sensoren und vier Temperatur-Sensoren vermessen, insgesamt konnten damit 60 Messkanäle überprüft und kalibriert werden. Die dazu eingesetzten 16 Datenlogger (Fa. Onset, Typ: HOBO Pro V2) wurden vorher in der Klimakammer des PHI bei zwei unterschiedlichen Temperaturen und relativen Feuchten mit Referenzgeräten (Fa. Ahlborn, Temperatursensor ZA 9030-FS2 und Psychrometer FN A846) kalibriert.

Bei der Kalibrierung im Lippe-Bad wurden die Sensoren der Datenlogger direkt an dem jeweiligen Sensor der Dauermessung positioniert und mindestens eine Stunde Messdaten aufgenommen (Messintervall 1 Minute). Die entsprechenden Messdaten der Dauermessung (GLT) wurden mit den Messdaten verglichen und Offsetwerte ermittelt. Alle Messdaten werden mit diesen Kalibrierwerten vor der weiteren Verwendung verrechnet.

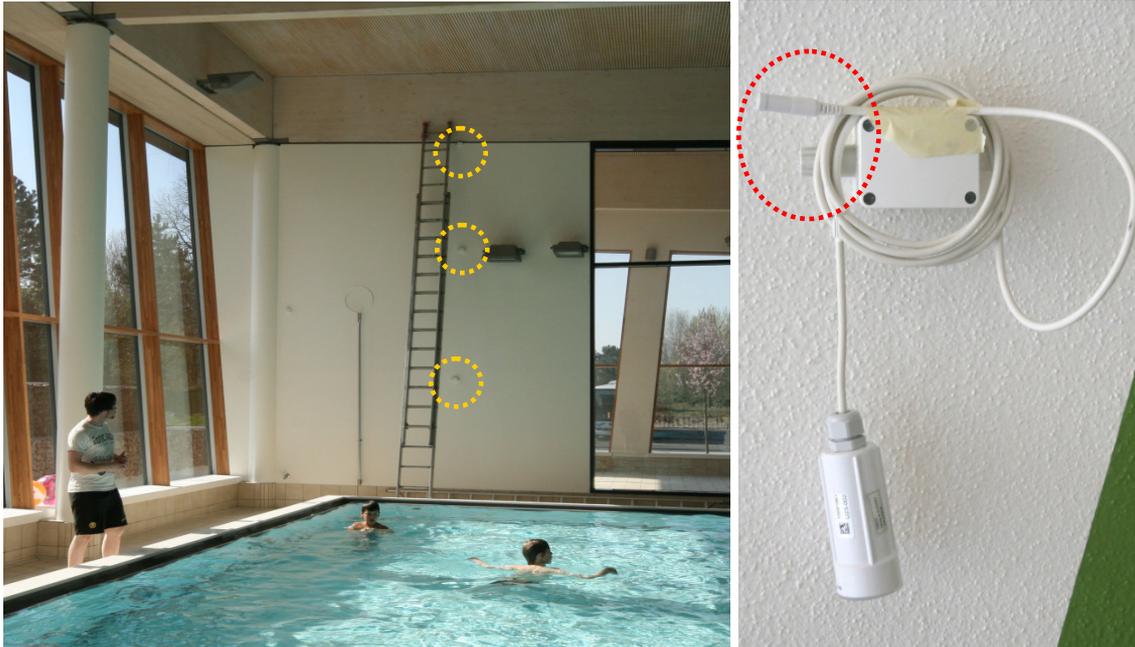


Abbildung 26: Kalibrierung der Temperatur-Feuchte-Sensoren. Bild links: Position von drei übereinander angeordneten Sensoren in Halle 3 vor der Verteilung der Datenlogger. Bild rechts: Kalibrierung des Wandensors (Dauermessung) mit einem Datenlogger; die beiden Messelemente befinden sich im gestrichelten Kreis.

Kalibrierung der Oberflächensensoren

Die Kalibrierung der Oberflächensensoren erfolgte ebenfalls durch Referenzmessungen an allen sechs Einzelsensoren. Als Referenz wurden Pt100 Foliensensoren der Fa. Ahlborn (Typ FP 685) verwendet. Diese wurden vorher gesondert im Wasserbad kalibriert. In den Hallen wurden sie direkt neben den Dauermesspunkten auf der Verglasung fixiert und es wurden über einige Nachtstunden Vergleichsmessungen durchgeführt. Aufgrund der ganz unterschiedlichen Masse der Sensoren (Folie bzw. massiver Alukörper) wirkt sich Sonneneinstrahlung zeitlich ganz unterschiedlich aus. Daher wurden nur Messdaten der Nachtstunden zur Kalibrierung herangezogen.



Abbildung 27: Fensteroberflächensensor direkt an Rand der Verglasung (Alukörper) mit dem darüber mit Klebeband fixierten Oberflächensensor zur Kalibrierung.

3.1.2 Hallen-Mittelwerte: Temperatur und Feuchte

In den Hallen gibt es, wie oben beschrieben, unterschiedliche Anzahlen von Temperatur- und Feuchtesensoren zur Messung der Raumlufbedingungen. Für die Aussage der mittleren Hallenfeuchte bzw. -temperatur muss definiert werden, was darunter zu verstehen ist.

Bei der Betrachtung der sommerlichen Temperaturmessdaten ist aufgefallen, dass einige der fensternahen Sensoren in Halle 1+2 sowie 3 direkt von der Sonne beschienen werden und damit Temperaturen deutlich über der Hallenlufttemperatur anzeigen (Abbildung 28). Die von den Sensoren gemessenen relativen Feuchten fallen durch diese Erwärmung deutlich ab (Abbildung 29). Bei der Mittelwertbildung würde sich damit eine Verfälschung der, im Zusammenhang der Untersuchung eigentlich interessanten, mittleren Hallenfeuchte ergeben.

Aus diesem Grund wird die - in dieser Untersuchung weiter verwendete - mittlere Hallentemperatur aus den nicht direkt von der Sonne beeinflussten Sensoren durch einfache Mittelwertbildung errechnet. Die Berechnung der mittleren relativen Hallenfeuchte erfolgt folgendermaßen: Die relativen Feuchten eines jeden Sensors (auch denen von der Sonne beeinflussten) werden mit den zugehörigen Temperaturen jeweils in absolute Feuchten umgerechnet. Bei den absoluten Feuchten wirkt sich die Sonnenstrahlung nicht störend aus, da diese aus den zusammengehörenden Temperatur- und rel. Feuchtedaten verrechnet werden. Die so berechneten absoluten Feuchten einer Halle werden zu einer mittleren absoluten Raumlufteuchte gemittelt (Abbildung 30). Diese „mittlere absolute Feuchte“ der Halle wird mit der mittleren Hallentemperatur (siehe oben) zur mittleren relativen Hallenfeuchte umgerechnet.

In Halle 4 und 5 ist das beschriebene Vorgehen nicht notwendig, da dort die Sensoren nicht direkt dem Sonnenlicht ausgesetzt sind. Hier kann die mittlere relative Feuchte durch einfache Mittelwertsbildung der Messwerte erfolgen.

Die beiden Kombisensoren in den Gauben von Halle 1+2 und 4 werden bei der beschriebenen Mittelwertsbildung nicht berücksichtigt. Sie dienen insbesondere zur Überwachung des Bauteilschutzes in diesen exponierten Bereichen. Im Abschnitt 4.3 zeigt sich später, dass in diesen Bereichen keine kritischen Temperaturen erreicht werden.

Die Luftbedingungen an den unterschiedlichen Messorten unterscheiden sich durch die Position (Außen- oder Innenwand, Höhe, Entfernung vom Becken) sowie den Einfluss der Luftströmung (Überwiegend im Zuluft- Überström- oder Abluftbereich).

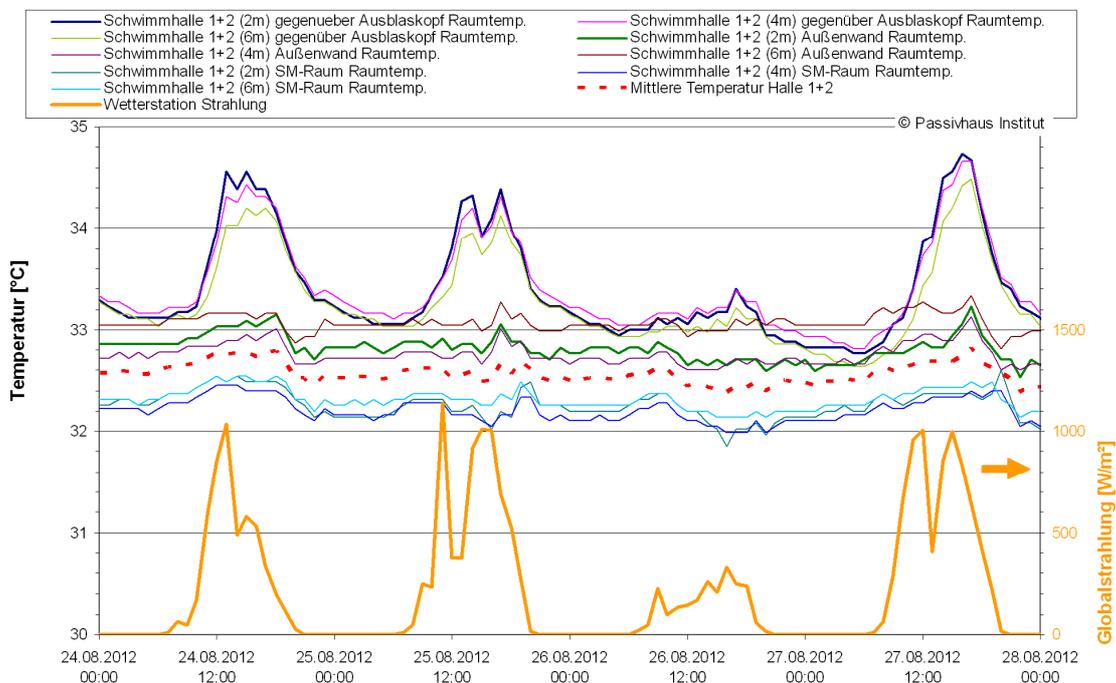


Abbildung 28: Raumlufttemperaturen der neun Sensoren in Halle 1+2, die „mittlere Hallen-temperatur“ (siehe Text) sowie die Globalstrahlung vom 24. bis zum 27. August 2012 (Stundenmittelwerte).

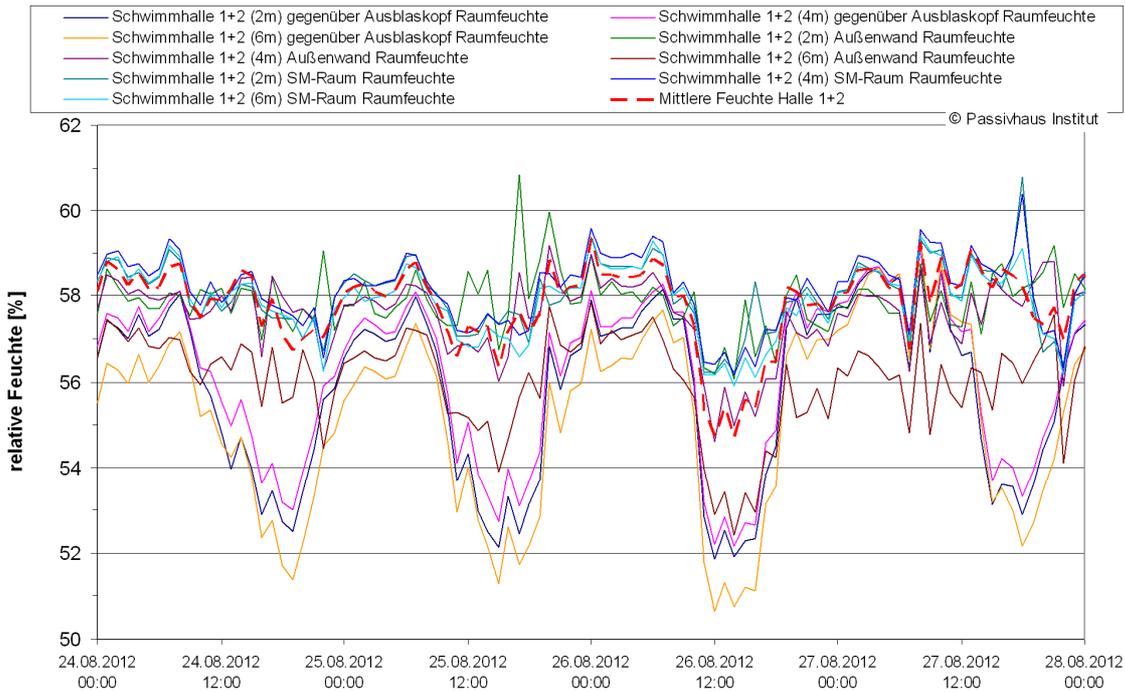


Abbildung 29: Relative Raumluftfeuchten der neun Sensoren in Halle 1+2 und die „mittlere rel. Hallenfeuchte“ (siehe Text) vom 24. bis zum 27. August 2012 (Stundenmittelwerte).

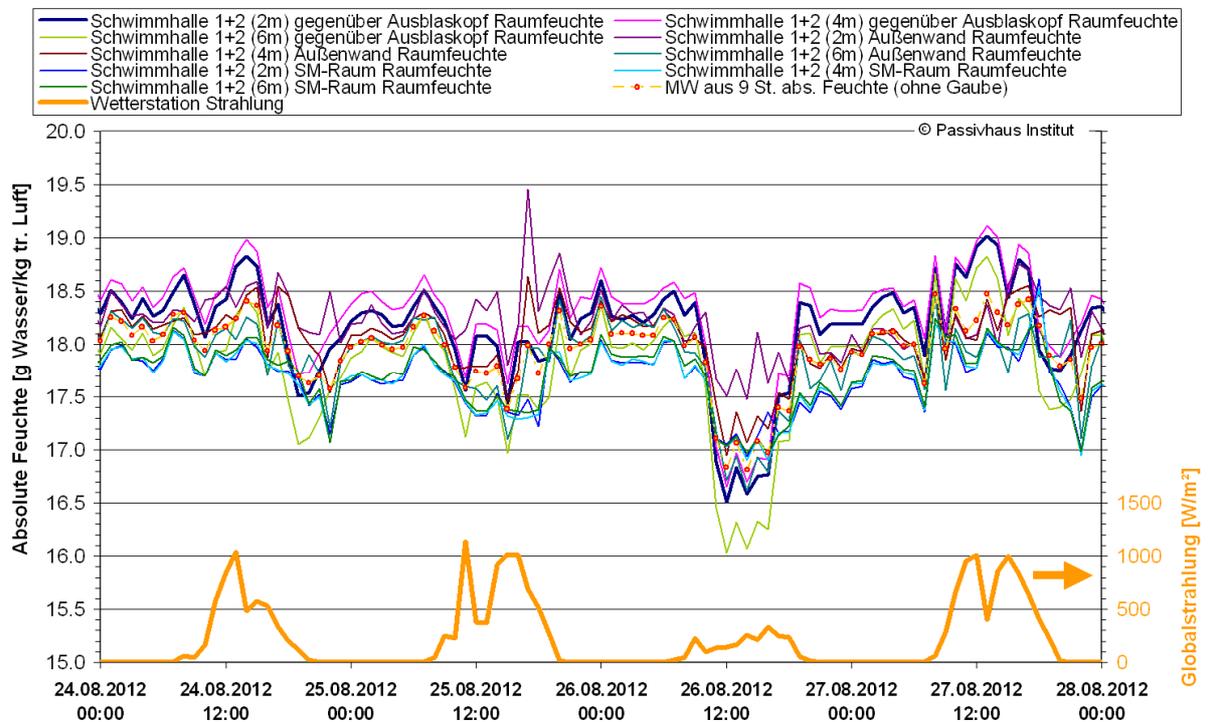


Abbildung 30: Absolute Raumluftfeuchten der neun Sensoren in Halle 1+2 und die „mittlere absolute Hallenfeuchte“ (siehe Text) sowie die Globalstrahlung vom 24. bis zum 27. August 2012 (Stundenmittelwerte).

3.2 Beckenwassertemperatur

Zur Messung der chemischen Parameter der Beckenwasserkreisläufe sind drei Messzellen vom Typ „Topax DX“ der Firma Jesco eingesetzt. Diese werden dauerhaft mit Beckenwasser durchströmt. Sie enthalten neben den Sensoren für Chlor, Redox-Potential, Salzgehalt und pH-Wert auch eine Temperaturmessung mittels Widerstandsmessung (Pt100). Diese wird für die dauerhafte Messung der Beckenwassertemperatur verwendet.

3.3 Lüftungsgeräte

In den Lüftungsgeräten sowie den zugehörigen Kanälen sind Sensoren für Volumenstrom (Berechnung aus Druckdifferenzmessung), Temperatur und Feuchte durch den Hersteller verbaut. Die Messdaten werden an die GLT weitergegeben und aufgezeichnet. Zusätzlich werden auch die Stellungen der Lüftungsklappen und die Ventilstellungen vom Heizregister aufgezeichnet. Für das Monitoring wurden nach der Klärung mit dem Hersteller zusätzliche Datenpunkte und Berechnungen aus den Geräten geliefert. Dabei ist insbesondere die Volumenstrommessung über den Wärmeübertrager (WRG) zu nennen. Standardmäßig werden nur die Volumenströme des Zu- und des Abluftvolumenstroms der hallenseitigen Ventilatoren ausgegeben (Druckdifferenzmessung). Zur energetischen Beurteilung fehlen damit der Außen- und Fortluftvolumenstrom über die Gebäudehülle. Durch eine weitere Druckdifferenzmessung über die Wärmerückgewinnungseinheit wird im Gerät der Außen-Zuluft-Volumenstrom berechnet. Bei geschlossener Bypassklappe („Klappe Entfeuchten“) zwischen dem Außen- und dem Fortluftbereich des Gerätes entspricht dieser Volumenstrom dem Außenluftvolumenstrom.

In der folgenden Tabelle sind die in den Geräten vorhandenen Messpunkte, welche für das Monitoring ausgelesen werden, aufgelistet.

Tabelle 5: Liste der Messpunkte (Beispielhaft von Gerät Halle 1+2 mit Wärmepumpe)

1	AB Feuchte
2	AB Temp
3	ZU Temp hinter Heizregister (PWW)
4	AU Temp intern
5	AU Temp extern
6	AU Klappe
7	FO Klappe
8	Umluftklappe Heizen
9	Umluftklappe Entfeuchten
10	Ventil Heizregister (PWW)
11	ZU Volumenstrom
12	AB Volumenstrom
13	Wärmemenge Rekuperator

14	Leistung Rekuperator
15	Wärmemenge Kondensator + PWW
16	Leistung Kondensator + PWW
17	ZU Temp extern
18	ZU Feuchte extern
19	ZU Enthalpie extern
20	ZU Temp v. WRG
21	ZU Feuchte v WRG
22	ZU Enthalpie v WRG
23	ZU Temp h. WRG
24	ZU Feuchte h. WRG
25	ZU Enthalpie h. WRG
26	AB Temp h. AB-Ventilator
27	AB Feuchte h. AB-Ventilator
28	AB Enthalpie h. AB-Ventilator
29	AB Temp h. Verdampfer
30	AB Feuchte h. Verdampfer
31	AB Enthalpie h. Verdampfer
32	Volumenstrom über WRG (AU-ZU)

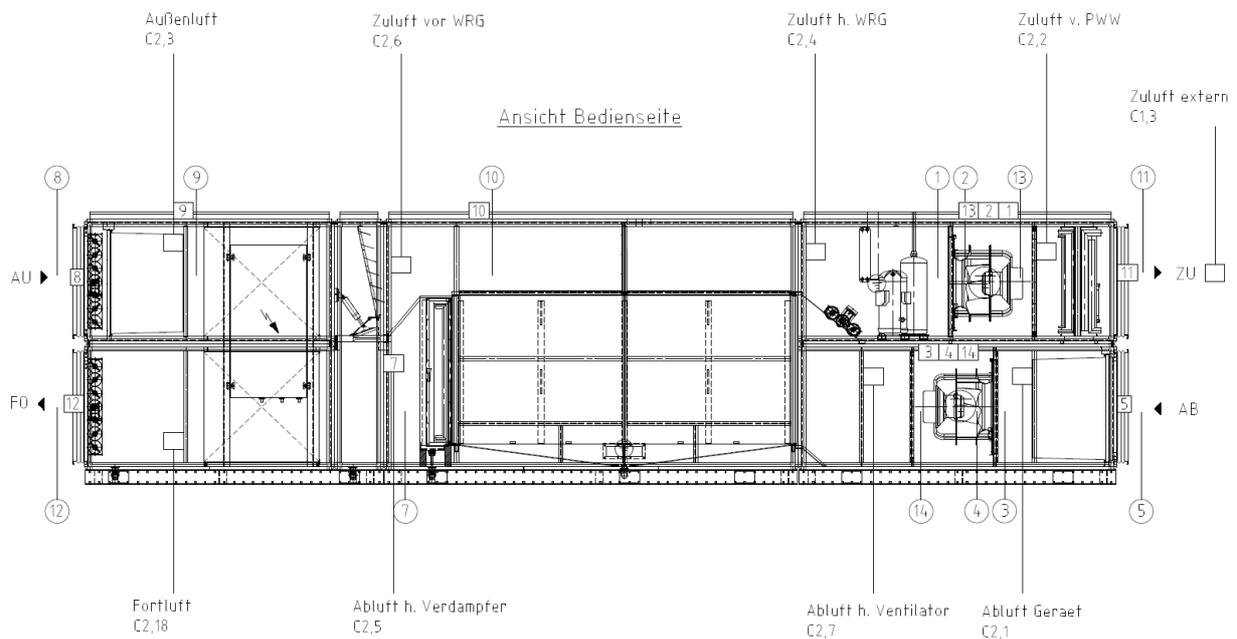


Abbildung 31: Anordnung der Sensoren im Gerät von Halle 1+2 mit Wärmepumpe (Quelle: Menerga).

Bei der Auswertung der Temperatur- und Feuchtemesswerte aus den Lüftungsanlagen wurden zum Teil unplausible Werte festgestellt. Es erfolgte daher am 20.09.2012 eine Kalibrierung einiger Sensoren durch den Hersteller. Die Messdaten zum Außen-Zuluft-Volumenstrom über die Wärmerückgewinnung zeigten immer wieder einen auffälligen Versatz der Minimalwerte (Abbildung 32). Es konnte ermittelt

werden, dass diese im Zusammenhang mit der immer montags um 6:00 Uhr durchgeführten Autokalibrierung des Gerätes standen. Aus diesem Grund wurde die Autokalibrierung später täglich bzw. zweitägig durchgeführt, womit dieser Effekt beseitigt wurde und der Außenluftvolumenstrom verlässlich für die energetische Datenauswertung verwendet werden konnte.

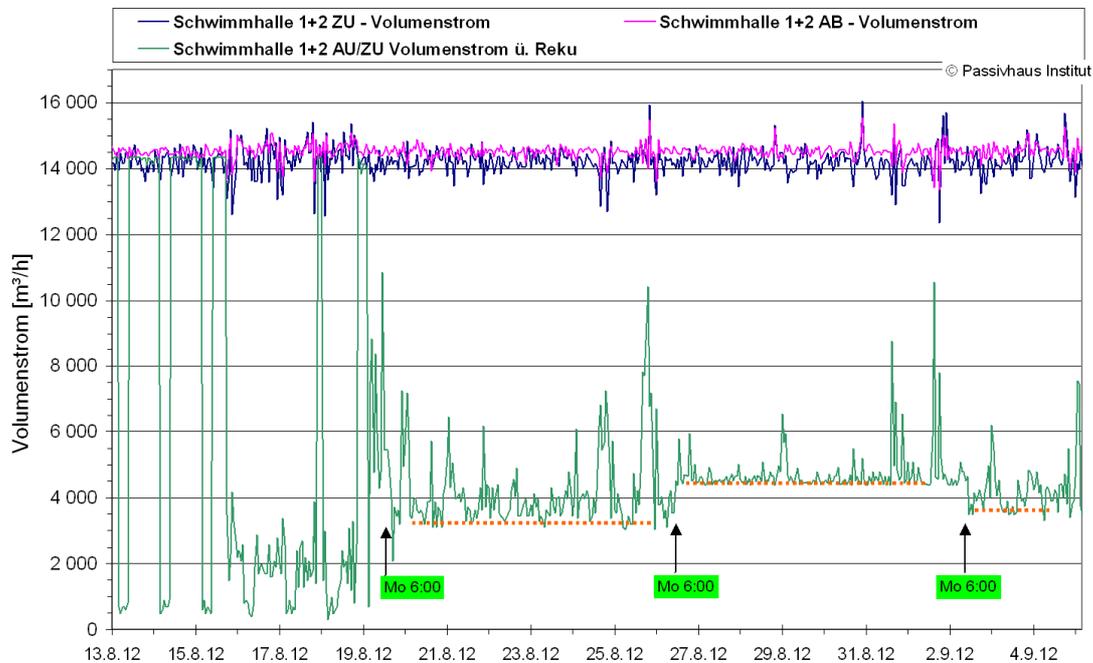


Abbildung 32: Volumenströme des Lüftungsgerätes von Halle 1+2 vom 13.08. bis zum 05.09. 2012 (Stundendaten). Es wurde ein Versatz der minimalen Volumenströme über die Wärmerückgewinnung („Reku“) immer Montags um 6:00 Uhr festgestellt.

3.4 Stromverbrauchsmessungen

Zur Messung der Stromverbräuche sind handelsübliche Stromzähler eingesetzt worden. Die Versorgung erfolgt über den Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz und durch die Eigennutzung des durch die PV-Anlage auf dem Dach des Gebäudes erzeugten Solarstroms (siehe nächster Abschnitt).

Aufgrund der Zähleranordnungen können fünf Verbrauchs-Hauptbereiche unterschieden werden (siehe auch Abbildung 33):

- Strom **Lüftung** (sechs Lüftungsgeräte einzeln sowie getrennt Unterzähler für die Wärmepumpe von Lüftung 1+2)
- Strom der drei **Doppel-Umwälzpumpen** der drei Wasserkreisläufe (zusätzlich vier weitere Pumpen der Abwasseraufbereitung; z.Z. nicht in Betrieb)
- Strom **Beleuchtung** und Steckdosen (acht Unterzähler)

- Strom für **Sanitär und Heizung** (Heizung: Heizungspumpen, Pumpen an sechs Heizregistern, Umwälzpumpen Abgaswärmetauscher / Sanitär: Dosierpumpen der Chemikalien und Hebeanlagen)
- Strom „Diverse“: **Schwimmbadtechnik** ohne Umwälzpumpen sowie **alle restlichen Verbraucher** des Bades (UV-Brenner, Elektrolysezellen, Hebeanlagen, Haarföhne, Messwasser-, Dosier- und Druckerhöhungs- und Tauchpumpen, Datenschränk, Lautsprecheranlage (ELA), Sicherheitslicht, Kassensystem, Schranke, E-Herd, Mikrowelle etc.)

Beim letzten Verbrauchsbereich „Diverse“ (alle „restlichen“ Verbraucher inkl. Schwimmbadtechnik ohne Großpumpen) handelt es sich um keinen direkt gemessenen Wert, sondern um die Differenz der vier gemessenen Teilbereiche zum Gesamtverbrauch.

Die Messungen aller für das Monitoring interessanten Verbrauchsbereiche (z.B. vollständige Schwimmbadtechnik) bzw. Einzelverbraucher konnte aus Aufwandsgründen nicht vollständig realisiert werden.

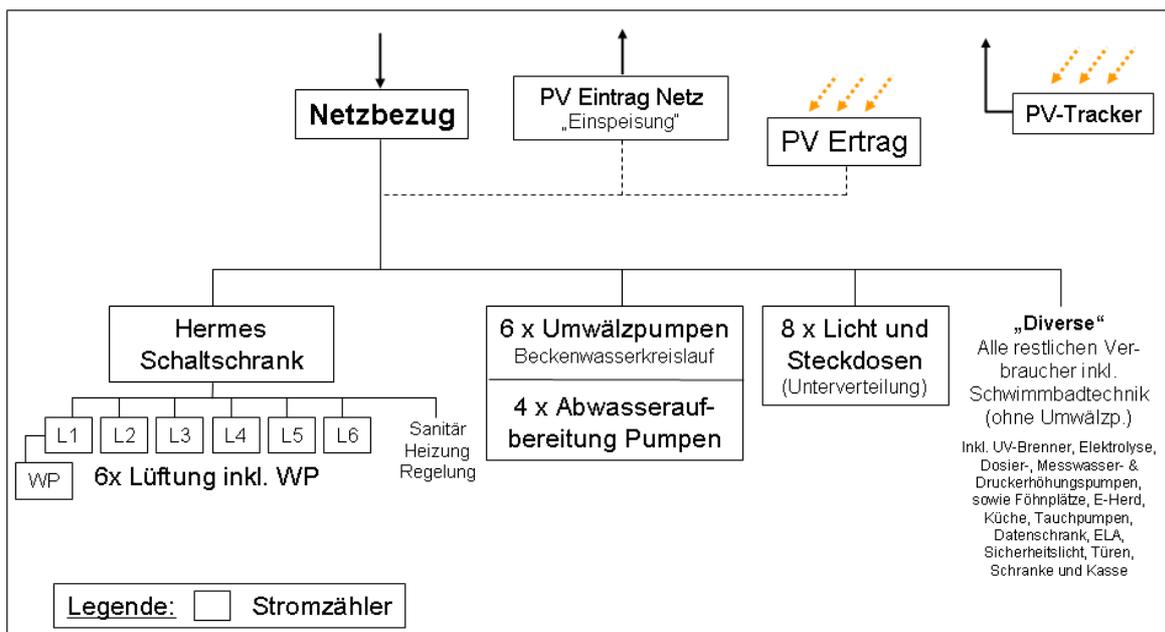


Abbildung 33: Anordnung und Verbrauchsbereiche der eingesetzten Stromzähler

3.4.1 Erzeugung Solarstrom (PV)

Die PV-Anlage auf dem Dach des Gebäudes hat eine Leistung von 91 kWp. Diese besteht aus insgesamt 387 Modulen mit je 235 Wp. Der PV-Strom wird bei Bedarf vollständig im Gebäude genutzt, momentane Überschüsse werden in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Dazu sind ein Ertrags- und ein Einspeisezähler installiert. Bei der Differenz handelt es sich um den im Bad direkt verbrauchten PV-Strom.

Zusätzlich sind auf dem Gelände des Lippe-Bades noch zwei „Solartracker“-Anlagen errichtet worden. Bei den frei im Gelände aufgestellten Anlagen handelt es sich um bewegliche PV-Flächen die sich nach der Sonne ausrichten. Die zwei Tracker verfügen insgesamt über 84 PV-Module je 235 Wp (Gesamtanlage: 19,7 kWp). Der PV-Strom der Tracker wird vollständig direkt in das öffentliche Stromnetz eingespeist, weil im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) für bodenstehende Anlagen keine Eigenverbrauchsregelung vorgesehen ist. Die Messung erfolgt über einen gesonderten Einspeisezähler.

Zur Beurteilung des Stromverbrauchs bzw. der Stromeinspeisung sind damit die folgenden Größen zu unterscheiden:

- Netzbezug
- PV-Strom Eigenverbrauch
- PV-Strom Netzeinspeisung (Überschuss)
- PV-Strom Tracker (vollständige Einspeisung)

Der Gesamtverbrauch des Bades setzt sich zusammen aus dem Netzbezug zuzüglich dem Eigenverbrauch des PV-Stroms der Solaranlage auf dem Dach des Gebäudes.

3.5 Weitere Sensoren

Für den Betrieb der Schwimmbadtechnik gibt es noch diverse Temperatursensoren in den Beckenwasserkreisläufen, Lüfterheizern und Wärmeübertragern. Außerdem ist eine Wetterstation auf dem Dach des Altbaubereichs montiert, die u.a. Außentemperatur-, Feuchte- und Globalstrahlungsdaten liefern. Zusätzlich gibt es diverse Betriebsstundenzähler, welche die Laufzeiten von Pumpen und der Lüftungsanlagen aufzeichnen. Die Anordnung der eingesetzten Wärmezähler ist in 2.2 bereits beschrieben. Außerdem ist ein Beckenscanner in Halle 1+2 montiert, der die Anzahl der Personen im Becken zählt (siehe dazu nächster Abschnitt). Alle erwähnten Sensoren sind auf die GLT-Anlage aufgeschaltet und werden hier bei gesonderten Untersuchungen zum Teil verwendet und ausgewertet.

4 Messdatenauswertung

Für die Auswertung der Daten sind die Messdaten überwiegend ab Februar 2012 nutzbar; zum Teil liegen vollständig nutzbare Daten durch z.B. Umbauten und Ergänzungen bei den Wärmezählern auch erst etwas später vor. Für die Auswertungen in diesem Bericht werden die Daten bis zum 31. März 2013 genutzt. Wenn Jahreswerte ermittelt werden, beziehen diese sich im Regelfall auf den Zeitraum 01.04.2012 bis 31.03.2013. Einzelne Abweichungen von diesem Jahreszeitraum sind ansonsten jeweils angegeben. Im Sommer 2012 wurde das Bad vom 09.07. bis zum 21.08.2012 für Revisionsarbeiten geschlossen. Die zentrale Datenerfassung war vom 17.7. bis zum 2.8.2012 komplett abgeschaltet.

4.1 Besucherzahlen

Aus dem Kassensystem des Bades liegen Daten zu den täglichen Besucherzahlen vor. Die Monatssummen zeigen in den regulären Betriebsmonaten Besucherzahlen zwischen 14.281 und 22.980 Personen pro Monat, durchschnittlich 19.751 Personen/Monat. Im gesamten Jahr 2012 besuchten 210.006 Personen die Schwimmhalle (47,6 % Öffentlichkeit, 23,3 % Schulen und 29,1 % Vereine).

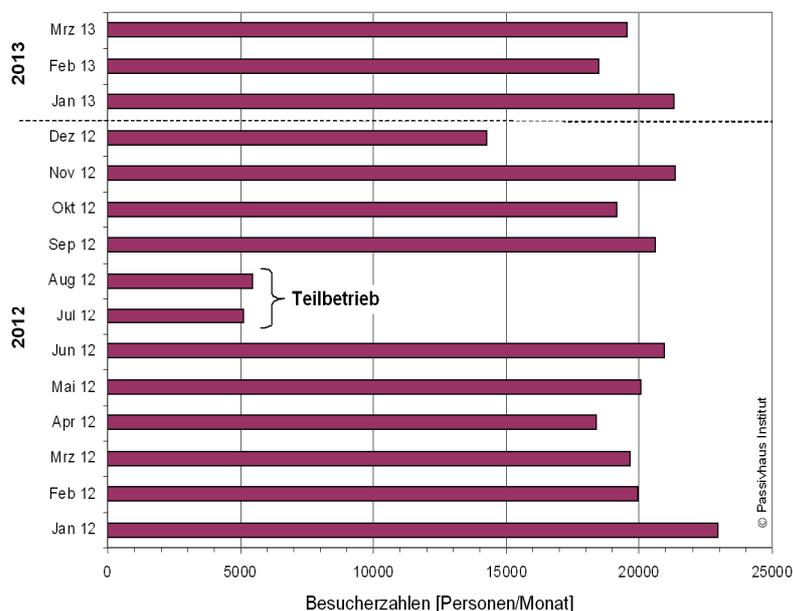


Abbildung 34: Monatliche Besucherzahlen vom Januar 2012 bis zum März 2013

Die Tagesbesucherzahlen zeigen, dass die Auslastung des Bades nach Wochentagen unterschiedlich ist. Im Januar 2013 zum Beispiel lagen die Besucherzahlen an Öffnungstagen zwischen 503 und 999 Personen. Dabei sind die Samstage die Tage mit den geringsten Besucherzahlen.

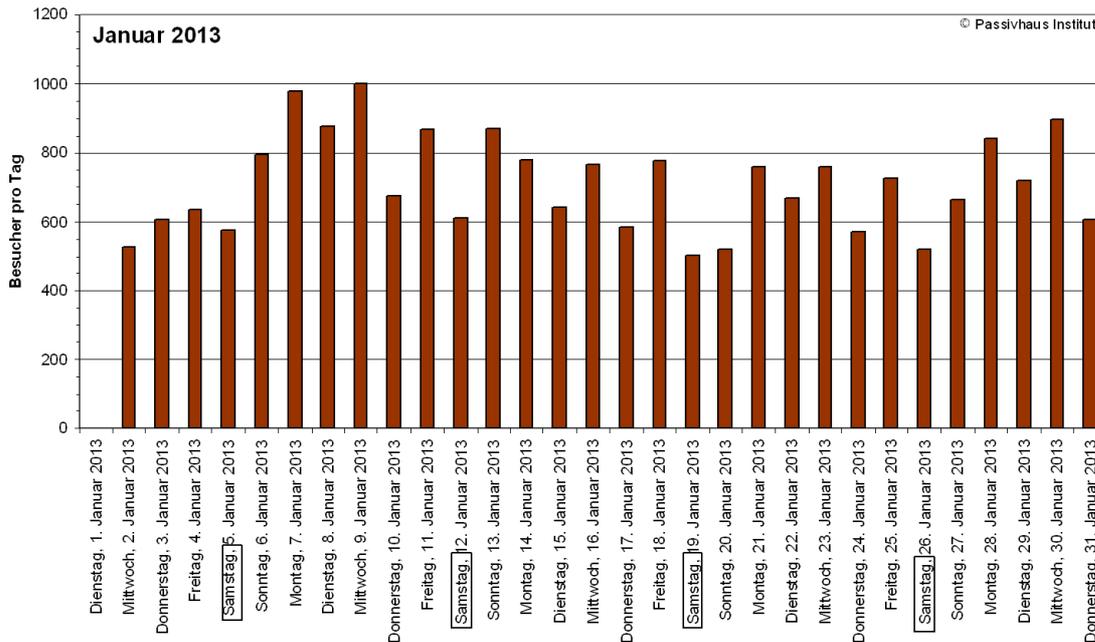


Abbildung 35: Tagesbesucherzahlen im Januar 2013. Am 1. Januar 2013 war die Schwimmhalle geschlossen.

Weitere Informationen zu Personenzahlen werden mittels eines Beckenscanners erfasst. Das speziell für diese Aufgabe angepasste Gerät zählt die Personen, welche sich im Becken 1+2 befinden (ohne Berücksichtigung der Beckenumläufe). Stichprobenhafte Überprüfungen bei Ortsterminen haben ergeben, dass die Personenanzahl auf ein bis drei Personen übereinstimmt. Mittels dieser Informationen können z.B. Energieverbrauchs- und Verdunstungsdaten in Abhängigkeit von den Personen im Becken ausgewertet werden (vgl. Abschnitt 5.1.1.1). In Abbildung 37 sind für Daten der Beckennutzer vom 1. November 2012 bis Ende April 2013 als Mittelwerte zu einem Verlauf einer durchschnittlichen Woche („Durchschnittswoche“) dargestellt. An dieser Darstellung ist die typische Wochentagsverteilung der Beckennutzung zu erkennen: Sonntags ist die stärkste Nutzung in diesem Bereich zu verzeichnen, montags die geringste.

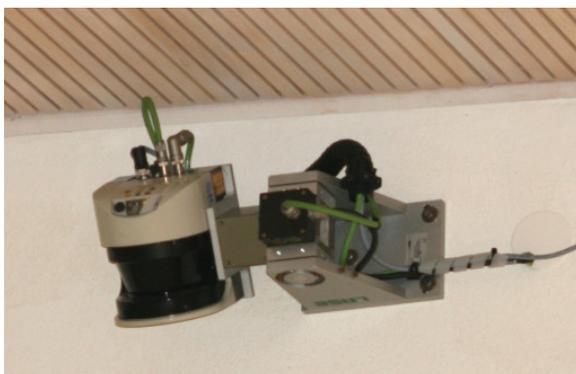


Abbildung 36: Beckenscanner unter der Hallendecke zur Personenzählung in Becken 1+2.

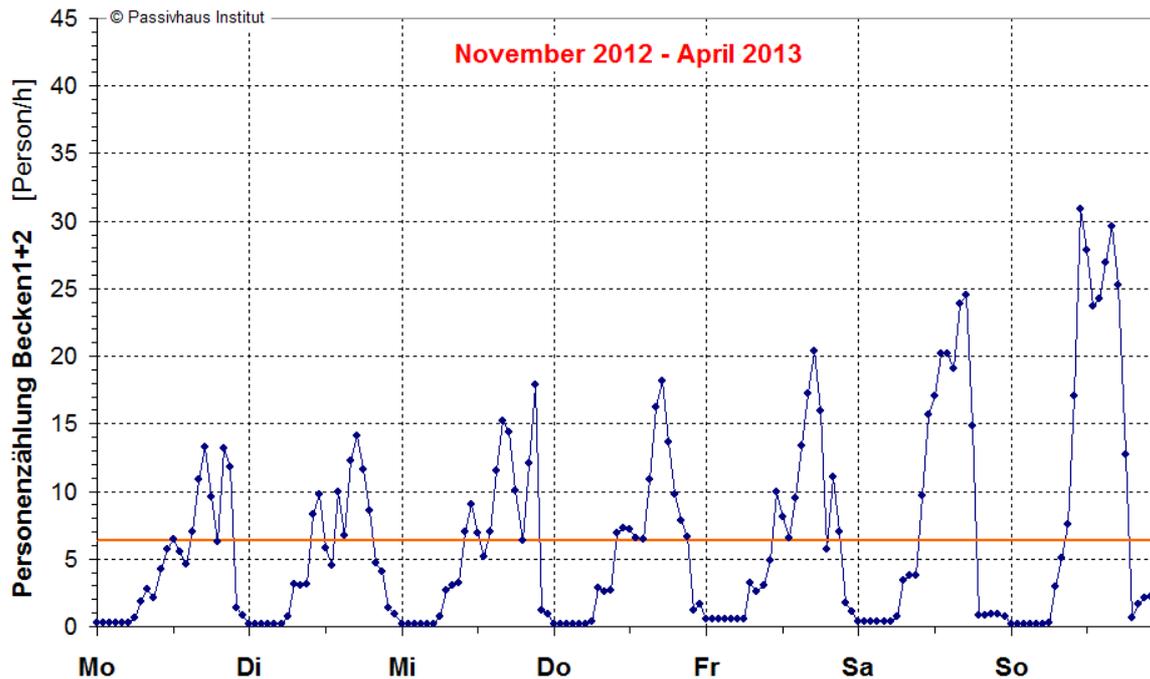


Abbildung 37: Personenbelegung von Becken 1+2 der „Durchschnittswoche“ nach der Zählung des Beckenscanners vom 01. November 2012 bis zum 30. April 2013 (aus Stundenmittelwerten). Dargestellt sind die Mittelwerte über den gesamten Zeitraum. Die horizontale orangene Linie stellt den Gesamtmittelwert dar.

4.2 Wetterdaten

Zur Wetterdatenmessung wird die auf dem Dach des ehemaligen Heizwerkes montierte Wetterstation genutzt. Die Daten werden - wie alle anderen Messdaten - auf der GLT erfasst. Es werden die Messgrößen Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlagsmenge sowie die horizontale Globalstrahlung erfasst (Messhöhe ca. 15 m über Geländehöhe). Die für die Auswertung relevanten Parameter werden hier als Verlauf der Tageswerte sowie als Monatsmittelwerte bzw. -summen dargestellt.



Abbildung 38: Wetterstation auf dem Dach des Altbaubereichs des Bades.

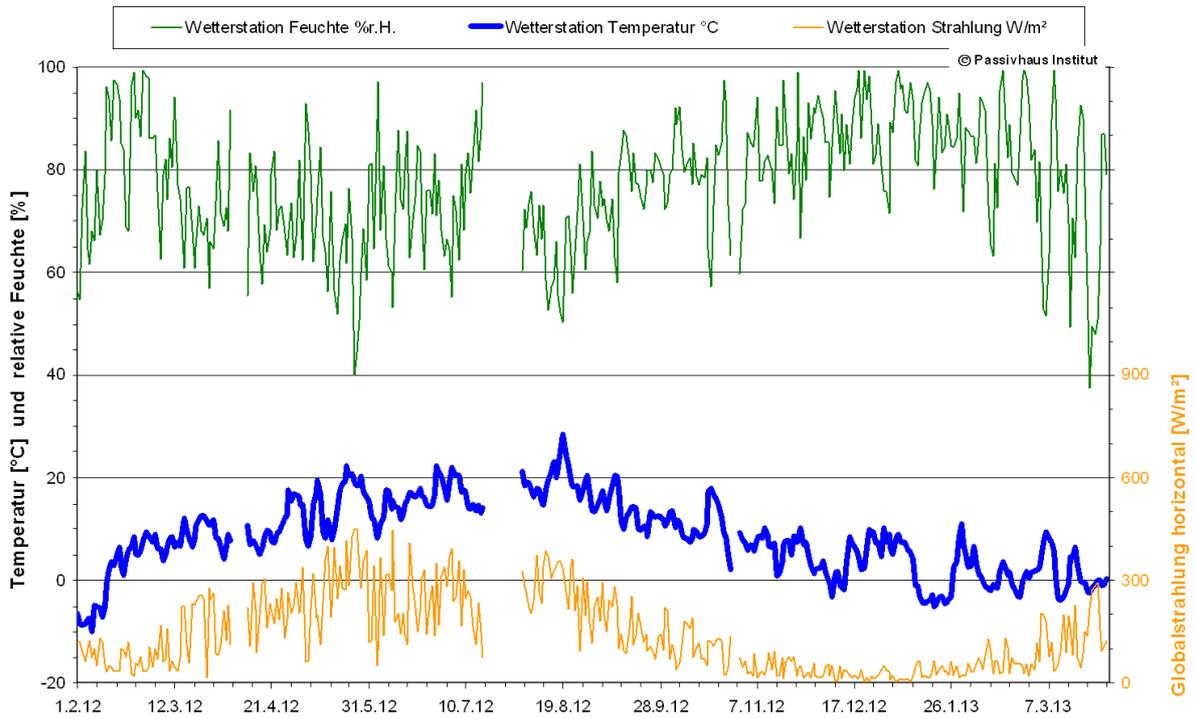


Abbildung 39: Gemessene tagesmittlere Wetterdaten der Außenlufttemperatur, relativen Luftfeuchte und horizontalen Globalstrahlung (01.02.2012 bis 31.03.2013).

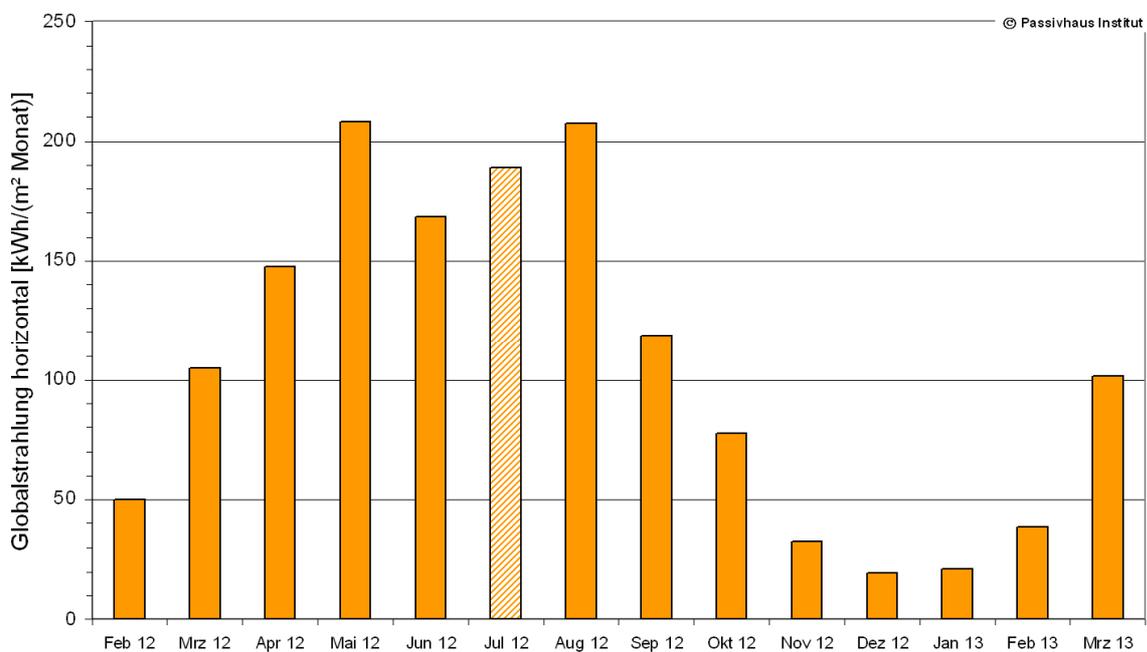


Abbildung 40: Gemessene Monatssummen der horizontalen Globalstrahlung (Februar 2012 bis März 2013). Aufgrund der Abschaltung der Datenerfassung an mehreren Tagen im Juli 2012 wurden aus der gemessenen mittleren Einstrahlung hochgerechnet auf den Monatswert.

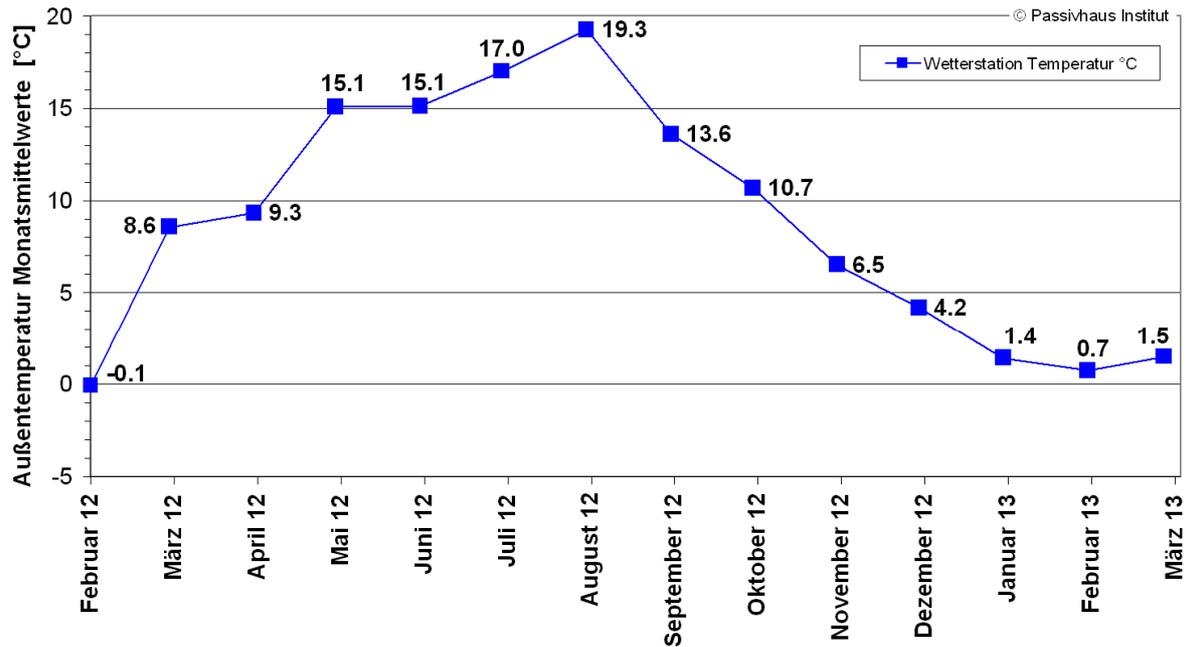


Abbildung 41: Gemessene Monatsmittelwerte der Außentemperatur (Februar 2012 bis März 2013). Aufgrund der Abschaltung der Datenerfassung an mehreren Tagen im Juli 2012 wurde der Mittelwert dieses Monats nur aus den Messwerten des gemessenen Zeitraums berechnet.

4.3 Lufttemperaturen und Luftfeuchten im Gebäude

Die Auswertung der Lufttemperaturen und Luftfeuchten im Gebäude erfolgt mit den kalibrierten Messdaten (siehe Abschnitt 3.1.1). Beispielhaft sind in Abbildung 42 die Verläufe der Hallentemperaturen in Halle 1+2 sowie die der Außenlufttemperatur in der Zeit vom 15.11.2012 bis zum 15.02.2013 als Stundenmittelwerte dargestellt. Insgesamt zeigt sich in der Halle ein Temperaturband von etwa 1 bis 1,5 K (ohne einzelne Ausreißer) in der Halle. Als Ausnahme ist der Sensor in der Gaube zu erkennen. Diese Lufttemperatur sinkt bei niedrigeren Außentemperaturen geringfügig ab (um etwa 1 K bei einem Außentemperaturabfall um 10 K). Der Gaubenbereich wird nicht gesondert mit Zuluft angeströmt, womit diese geringe und unkritische Temperaturreduktion begründet ist.

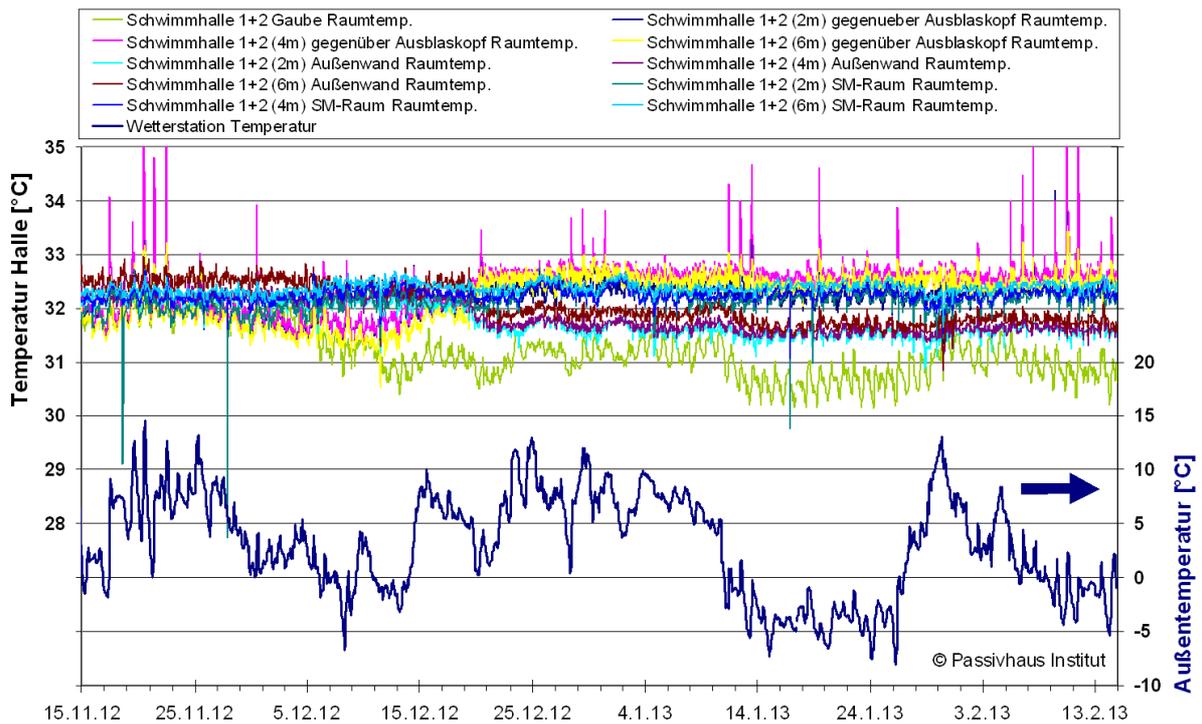


Abbildung 42: Verlauf aller zehn Hallentemperaturen in Halle 1+2 sowie der Außenlufttemperatur im Zeitraum vom 15.11.2012 bis zum 15.02.2013 (Stundendaten)

Aus den Lufttemperatur- und Feuchtesensoren wird durch Mittelwertbildung (vgl. 3.1.2) der Verlauf der mittleren Hallenfeuchten (relativ und absolut) sowie der Temperaturen für die Zeit vom 01. Februar 2012 bis zum 31. März 2013 für Hallen 1+2 erstellt (Abbildung 43). Im Zeitverlauf sind damit die Änderungen der Betriebsbedingungen zu erkennen: Während die Hallentemperatur in der gesamten Zeit relativ konstant bleibt, sind in der Hallenfeuchte deutliche Änderungen zu erkennen. Da in dieser Halle die Änderungen der Betriebsbedingungen untersucht wurden, handelt es sich bei einigen der Änderungen um Versuchsanforderungen. Bei den beiden Zeiträumen vor der Revision mit deutlich erhöhten Feuchtwerten handelt es sich um unbeabsichtigte Änderungen bzw. Regelungsfehler.

Nach der sommerlichen Revisionszeit wurde am 18.09.2012 eine sprunghafte Reduktion der Hallenfeuchte durchgeführt. Die eigentlich angestrebten erhöhten Feuchtwerte wurden - nach der Anhebung am 07.12.2012 (um etwa 10 %) - schrittweise, mit Werten bis um 60 % erreicht.

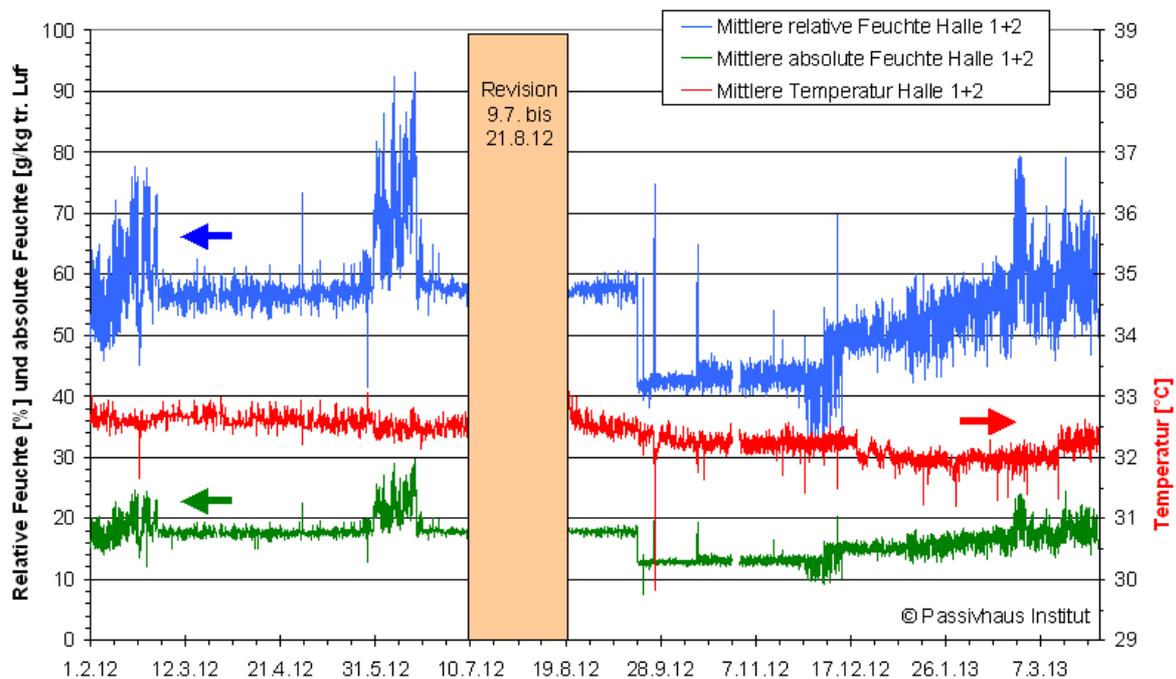


Abbildung 43: Verlauf der mittleren Hallentemperatur, der relativen sowie absoluten Feuchte in Halle 1+2 vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

Die Raumlufbedingungen der anderen drei Hallen im gleichen Zeitraum sind in den folgenden drei Grafiken dargestellt:

In Halle 3 wurde die Raumluftemperaturen über mehr als sechs Monate im Frühling und Sommer 2012 um bis zu etwa 2 K abgesenkt. Bei der Hallenfeuchte zeigen sich ähnliche sprunghafte Änderungen wie in Halle 1+2, allerdings bis zu 20 %. Bei den deutlichen Stufen der Hallenfeuchte am 05.12.2012 und 09.01.2013 handelt es sich um gewollte Anhebungen der Hallenfeuchte im Rahmen der vom PHI durchgeführten Versuchsreihe (vgl. dazu auch Abschnitt 4.6).

Ab dem 13.02.2013 sind starke Schwankungen in der Hallenfeuchte von Halle 3 zu beobachten. Die Ursache liegt in der Anpassung der Regelparameter des Lüftungsgerätes durch die Herstellerfirma mit unbeabsichtigten Folgen. Die Anpassung erfolgte auch bei den Geräten für Halle 1+2, 4 und 5, wodurch dort ebenfalls ab dem 13.02.2013 viel stärkere Schwankungen der Feuchte zu beobachten sind.

Seit der Reduktion am 18.09.2012 liegen in Halle 4 und 5 die relativen Feuchten im Mittel unter 50 % (Abbildung 46 und Abbildung 47). Aufgrund der noch vorhandenen Restleckage im Altbaubereich sollen in Halle 4 und 5 zunächst niedrige Luftfeuchten realisiert werden. Bei Halle 5 fällt insbesondere die sprunghafte Temperaturanhebung von Mitte Dezember 2012 bis Ende Januar 2013 auf.

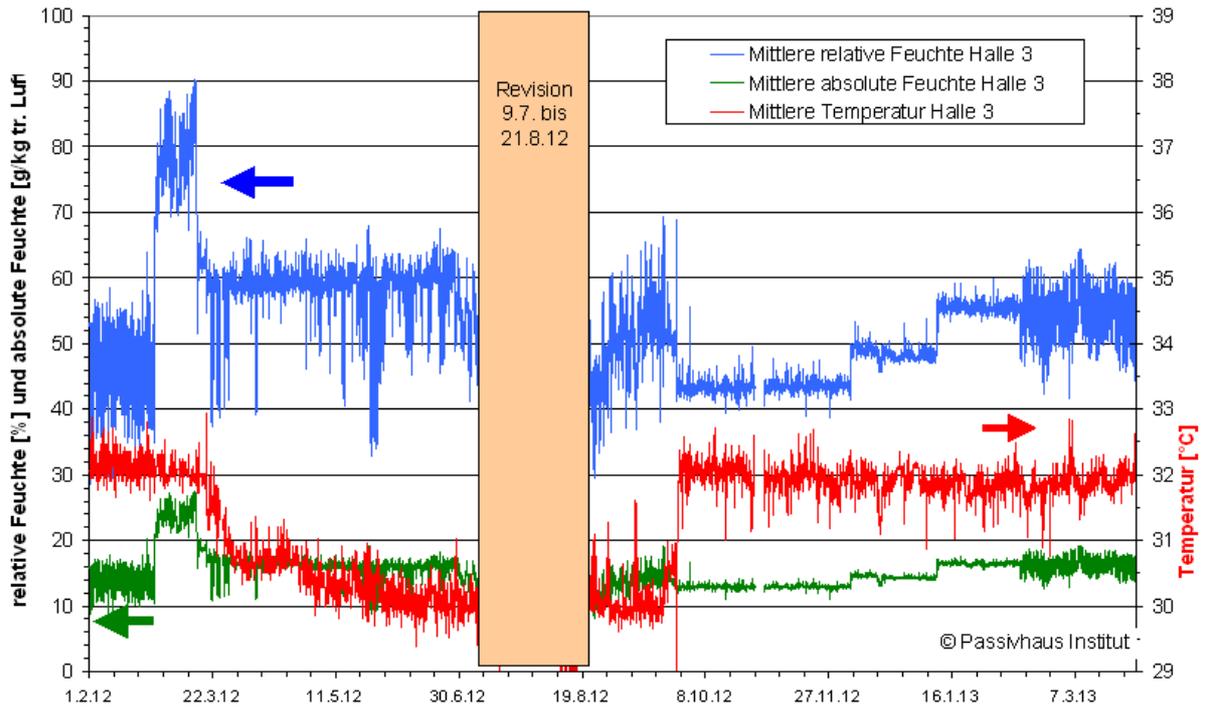


Abbildung 44: Verlauf der mittleren Hallentemperatur, der relativen sowie absoluten Feuchte in Halle 3 vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

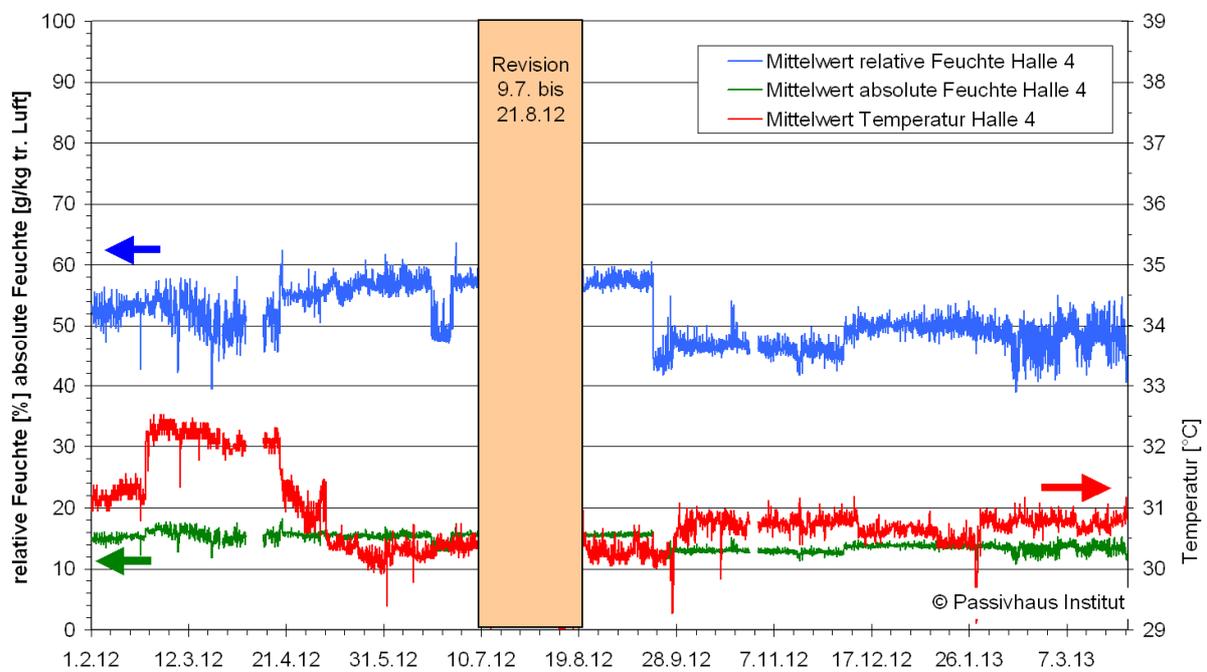


Abbildung 45: Verlauf der mittleren Hallentemperatur, der relativen sowie absoluten Feuchte in Halle 4 vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

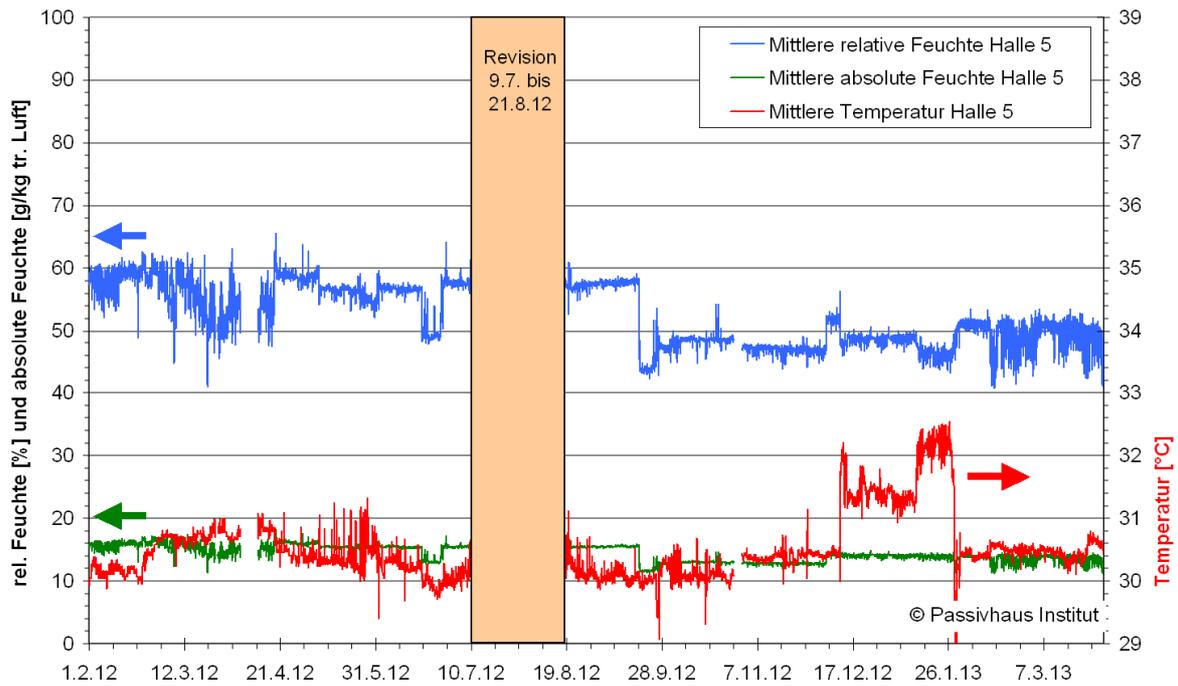


Abbildung 46: Verlauf der mittleren Hallentemperatur, der relativen sowie absoluten Feuchte in Halle 5 vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

In den Nebenzonen sind insbesondere die Raumlufttemperaturen – weniger die Feuchten – von Interesse. Erwartungsgemäß zeigt sich dabei eine größere Streuung der Temperaturniveaus und ganz unterschiedliche große Abhängigkeiten von der Außenlufttemperatur je nach Lage der Räume bzw. Bereiche.

Die Achsen sind bei den folgenden drei Abbildungen unterschiedlich eingestellt, um die unterschiedlichen Temperaturniveaus besser darstellen zu können.

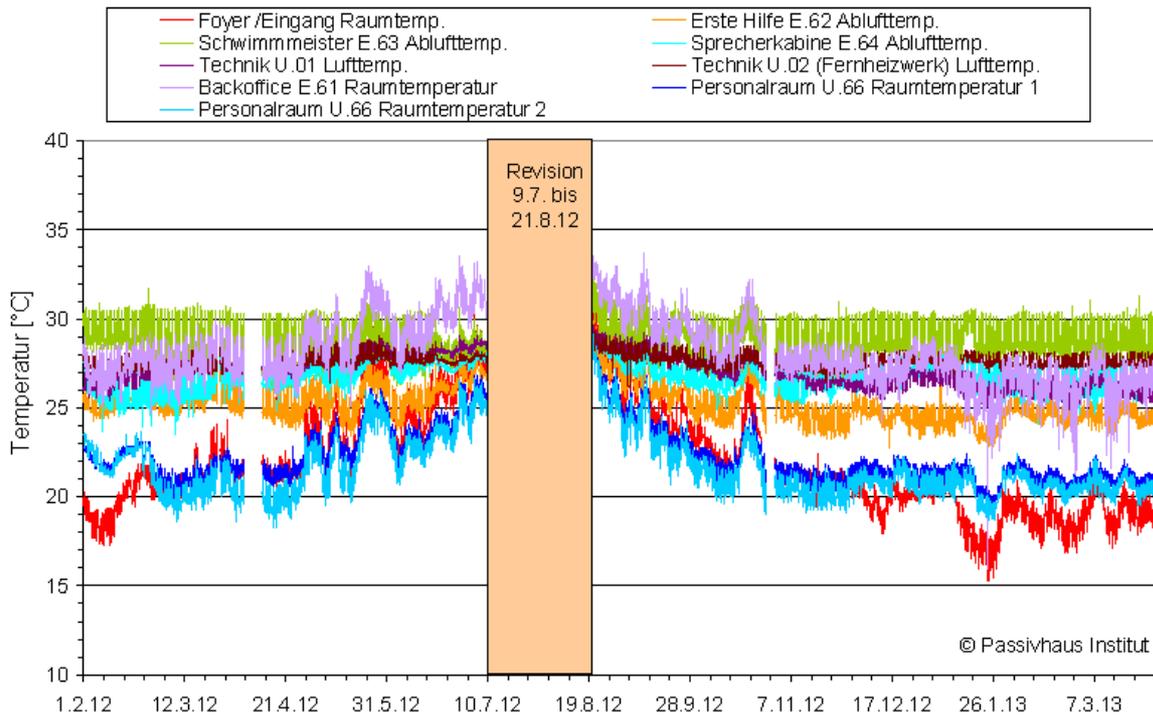


Abbildung 47: Verlauf der Raumlufttemperaturen der Nebenräume vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

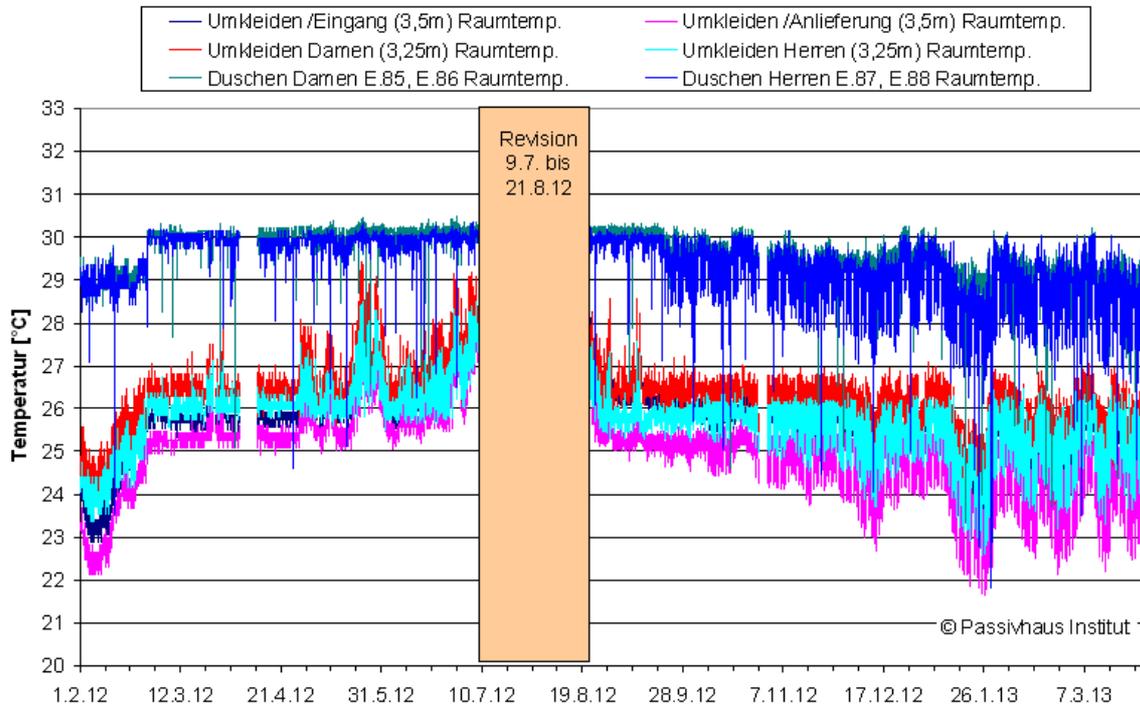


Abbildung 48: Verlauf der Raumlufttemperaturen vom Umkleidebereich und der Duschen vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

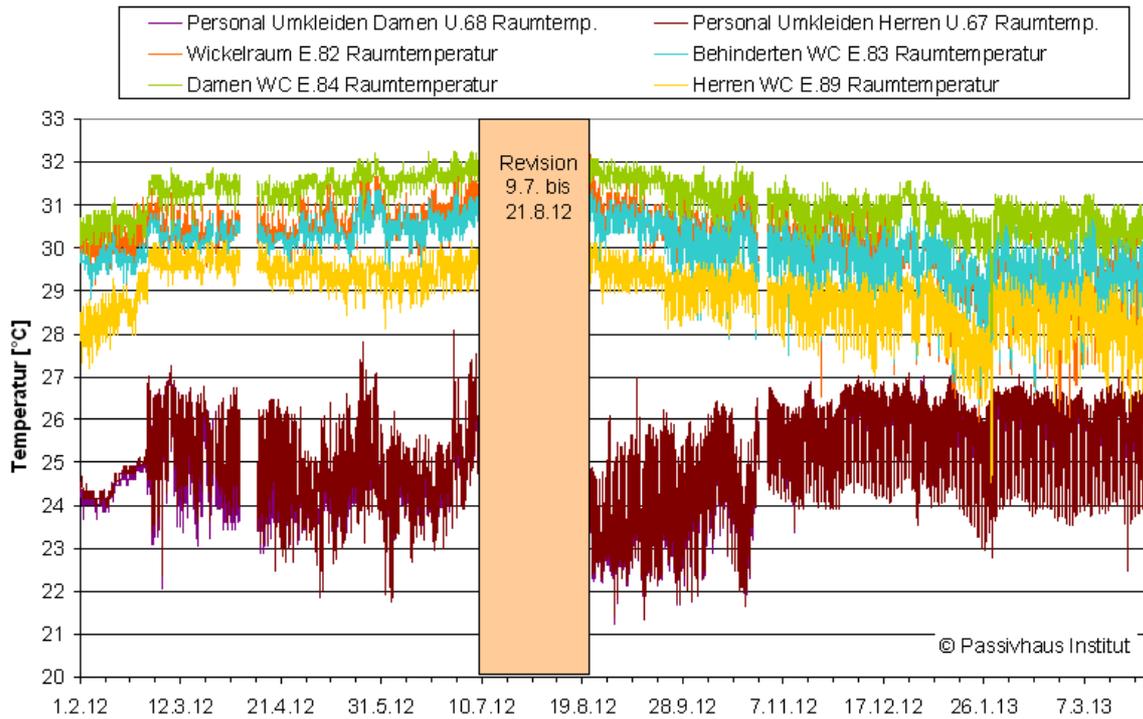


Abbildung 49: Verlauf der Raumlufttemperaturen der WCs sowie der Personalräume im UG vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

Die Regelung des Lüftungsgerätes „Umkleiden“ erfolgt nach der Luftfeuchte in den Duschbereichen: Die Luft aus dem Umkleidebereich wird nach einer weiteren Aufheizung in die Duschen transportiert. Wenn dort die Luftfeuchtigkeit einen Schwellenwert überschreitet, soll der Außenluftvolumenstrom des Gerätes erhöht werden. Um einen Überblick der mittleren relativen Feuchte der Duschen zu erhalten, wurden die Stundenwerte der beiden Sensoren (Damen- und Herrendusche) gemittelt und in Abbildung 50 dargestellt. In der Darstellung sind die Tag- und Nachtstunden abgebildet. Die Schwankungen ergeben sich zum einen durch die unterschiedliche Nutzung (Tag/Nacht) sowie den Einfluss der jahreszeitlich unterschiedlichen Außenfeuchte.

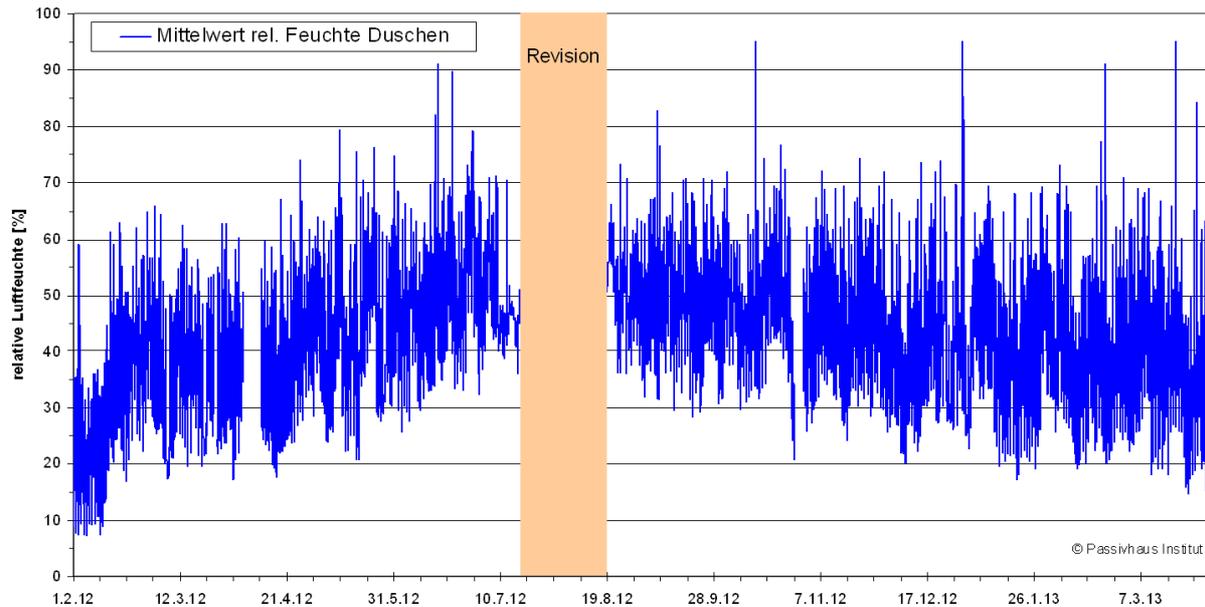


Abbildung 50: Verlauf der mittleren relativen Raumluftfeuchte der Duschen (Herren und Damen) 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten). Erläuterungen siehe Text.

4.3.1 Oberflächentemperatur Verglasung

Die Messung der sechs Oberflächentemperaturen der Verglasung dicht am Glasrand wird dauerhaft durchgeführt. Die niedrigste gemessene stundenmittlere Außenlufttemperatur während des Monitorings wurde am 07.02.2012 mit $-14,3\text{ °C}$ aufgezeichnet. Die Oberflächentemperaturen der Verglasung in Halle 1+2 zeigen zu dieser Zeit ebenfalls die niedrigsten Werte. Auf der Verglasung der Pfosten-Riegel-Fassade wurden minimal $18,8\text{ °C}$ gemessen. In der Halle wurden zur gleichen Zeit $32,7\text{ °C}$ Lufttemperatur und ein Feuchtegehalt von $15,0\text{ g/kg tr. Luft}$ gemessen. An den Messwerten der Oberflächentemperatur zeigt sich der deutliche Einfluss der Solarstrahlung an diesen kalten, aber sonnenreichen Tagen (Abbildung 51): Tagsüber liegen die Werte deutlich höher als in den Nachtstunden. Bei den Randbedingungen der Hallenluft darf eine Oberflächentemperatur von $20,4\text{ °C}$ (Taupunkt) nicht unterschritten werden, um Kondensatausfall zu verhindern. Dieser wurde mehrfach an den Verglasungsrändern im unteren Bereich beobachtet. Hier scheint die beabsichtigte und notwendige thermische Qualität nicht vorhanden zu sein. Die Ursachen dazu müssen noch ermittelt werden.

Bei den Messungen in Halle 3 und 4 gibt es die gleichen Beobachtungen. In Abbildung 52 zeigt sich für Halle 4 an den gleichen Tagen der niedrigsten Außenlufttemperatur aufgrund der Scheibenposition auf der Nordseite kein großer solarer Einfluss; die Oberflächentemperaturen verlaufen deutlich ruhiger. Auch in dieser Halle werden mehrfach Oberflächentemperaturen von 20 °C deutlich unterschritten; minimal werden $18,0\text{ °C}$ erreicht. Bei den Luftkonditionen der Halle dürfen Oberflächentemperaturen von $19,3\text{ °C}$ nicht unterschritten werden, um Kondensat auszu-

schließen. Auch hier deckt sich die Beobachtung von zeitweiligem Kondensat mit diesen Berechnungen.

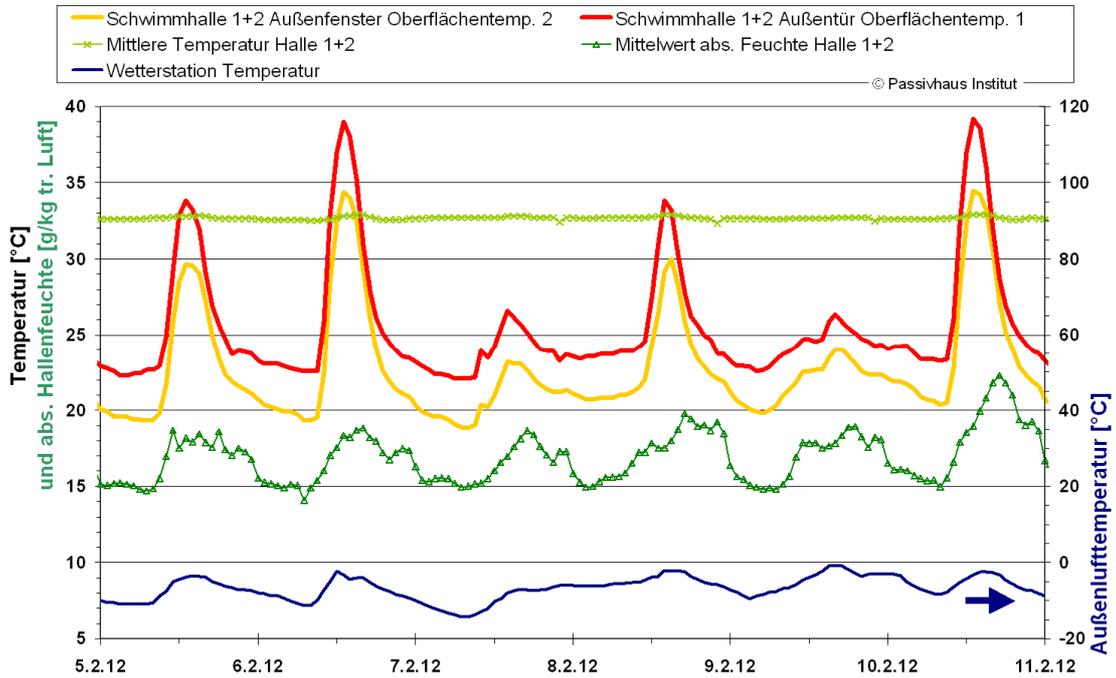


Abbildung 51: Verlauf der Oberflächentemperaturen der Verglasung in Halle 1+2 sowie der zugehörigen mittleren Hallenfeuchte und Hallentemperatur sowie der Außenlufttemperatur vom 07.02. bis zum 11.02.2012 (Stundendaten)

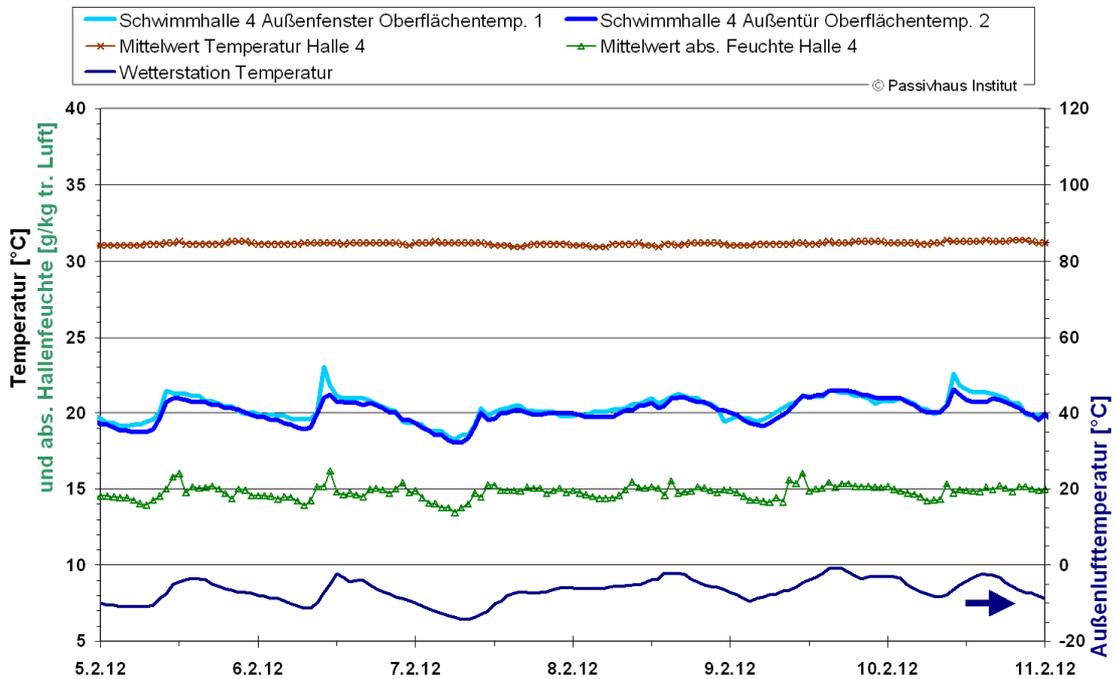


Abbildung 52: Verlauf der Oberflächentemperaturen der Verglasung in Halle 4 sowie der zugehörigen mittleren Hallenfeuchte und Hallentemperatur sowie der Außenlufttemperatur vom 07.02. bis zum 11.02.2012 (Stundendaten)

4.4 Wassertemperaturen

Die Wassertemperaturen in den vier Becken sind aufgrund der gewünschten Nutzung unterschiedlich hoch. Die Temperatur in den 25-Meter-Becken 4 und 5 liegen konstant zwischen 27,5 und 27,8 °C (siehe Abbildung 53). Die Wassertemperatur im Lehrschwimmbecken (Becken 3) liegt nach der Revisionszeit überwiegend zwischen 29,4 bis 29,8 °C und damit deutlich höher als in den beiden 25-Meter-Becken. Vor der Revisionszeit lag sie noch etwas höher.

Becken 1+2 mit dem Eltern-Kind-Bereich verfügt mit 30,5 bis fast 33 °C über die höchste Beckentemperatur. Am 06.12.2012 ist die Wassertemperatur deutlich angehoben worden; zuvor ist sie um den 26.09.2012 etwas reduziert worden. Insgesamt sind deutliche Schwankungen der Wassertemperatur in diesem Becken festzustellen. In der Detailansicht von nur zehn Tagen in Abbildung 54 zeigt sich, dass es sich bei den Schwankungen in Becken 1+2 um Tagesgänge handelt: Die niedrigsten Wassertemperaturen sind immer am Morgen um 6:00 bzw. 7:00 Uhr festzustellen, die Spitzen am Abend um 22:00 Uhr. Diese Betriebsweise ist so nicht beabsichtigt und hat ihre Ursache in den Regelparametern für die Beheizung durch den NT- und den HT-Kreislauf im Zusammenspiel mit dem intermittierendem Umwälzbetrieb der Ultrafiltration. Die Regelung wurde nach Auswertung der hier gezeigten Daten angepasst - im aktuellen Betrieb treten nun keine Temperaturschwankungen mehr auf.

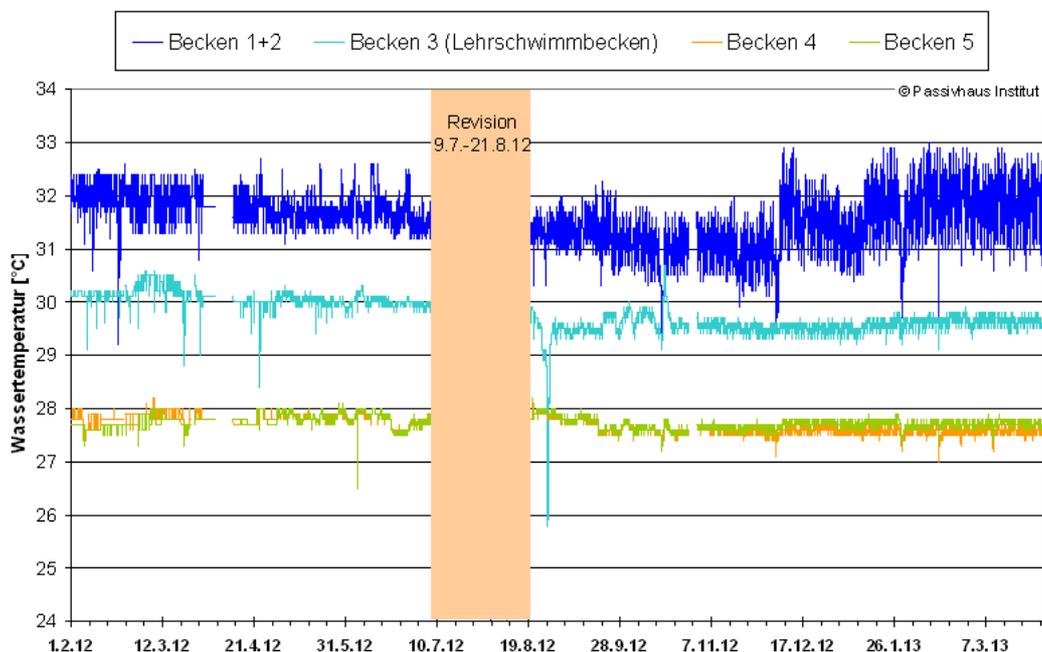


Abbildung 53: Verlauf der Wassertemperaturen der vier Becken (Februar 2012 bis März 2013, Stundendaten). Darstellung mit unterdrücktem Nullpunkt.

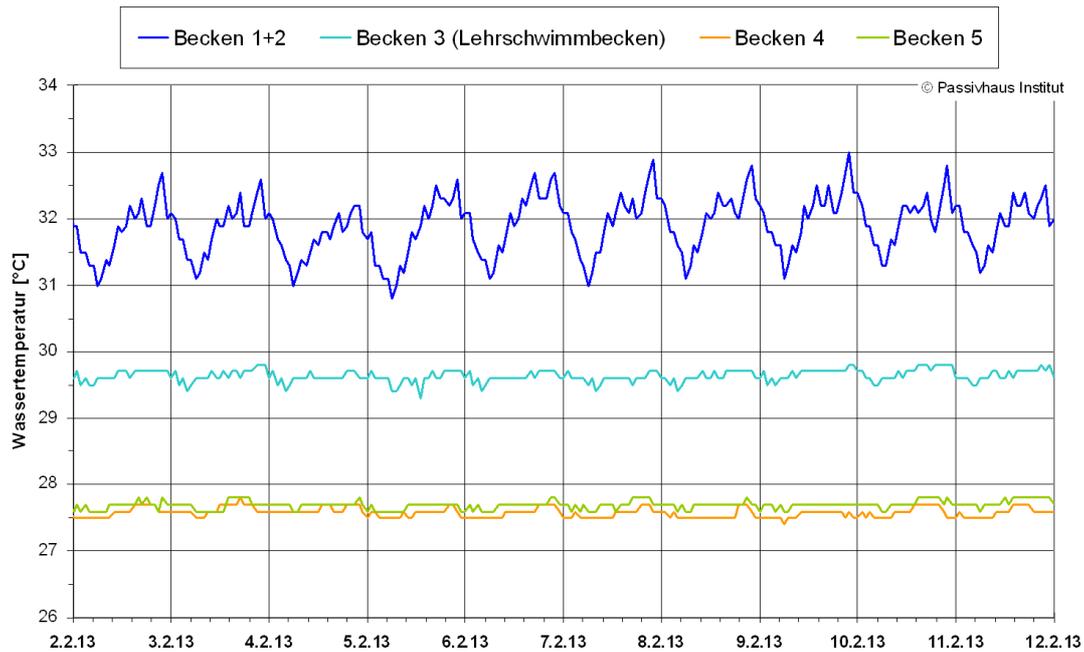


Abbildung 54: Detail der Wassertemperaturen der vier Becken (02.02. bis 11.2.2013, Stunden-daten). Darstellung mit unterdrücktem Nullpunkt.

Die Monatsmittelwerte der Beckenwassertemperaturen sind in der nächsten Abbildung dargestellt. Aufgrund der Beckenentleerung während der Revisionszeit sind die Temperaturen im Juli und August 2012 nicht aussagekräftig.

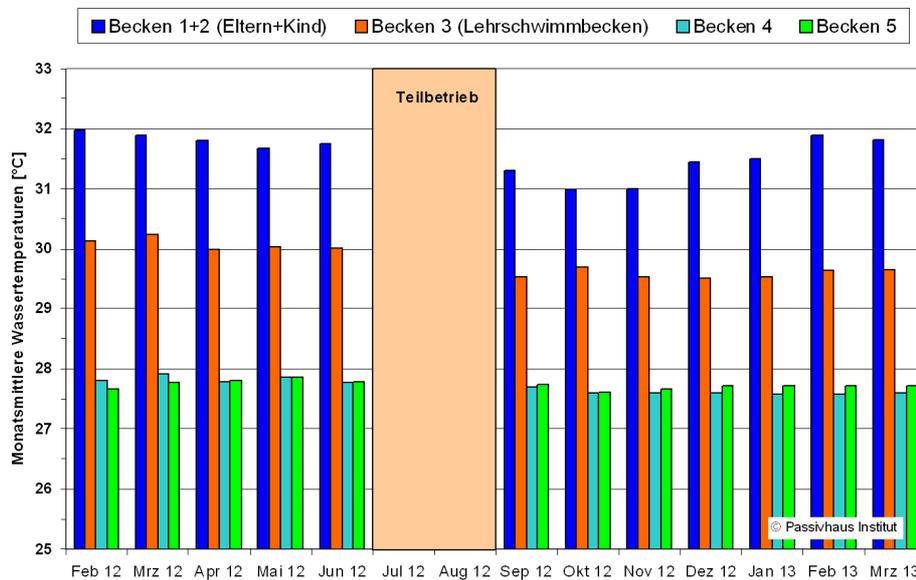


Abbildung 55: Mittelwerte der Wassertemperaturen in den vier Becken (Februar 2012 bis März 2013). Darstellung mit unterdrücktem Nullpunkt.

4.5 Lüftung

Nach Eröffnung des Bades wurden die Lüftungsgeräte zunächst im Normalbetrieb mit den Auslegungsvolumenströmen gefahren. Die Reduktion der Umluftvolumenströme und die Anhebung der Hallenfeuchten nach dem Konzept eines Passivhaus-Schwimmbades sollten schrittweise erfolgen. In den ersten Betriebsmonaten erfolgte zunächst die Einregulierung der Anlagen, dann folgten einige technische Verbesserungen (u.a. Korrektur Einbau der WMZ). In der Revisionszeit während der Sommerpause wurden interne Luft- und Kondensatleckagen in den Geräten nachgearbeitet. Durch den Optimierungsbedarf bei der Wasserqualität und noch vorhandenen Undichtheiten in der Gebäudehülle im Altbaubereich (Halle 5) konnten Versuche mit erhöhten Hallenfeuchten und Reduktion des Umluftvolumenstroms nur in Halle 1+2 und 3 durchgeführt werden.

4.5.1 Volumenstrom Hallengeräte

Für den Betrieb eines Hallenbades ist insbesondere der Außenluftvolumenstrom (für die Luftqualität) und der Umluftvolumenstrom von Interesse. Zur Verdeutlichung der beiden Betriebsweisen sind diese in Abbildung 56 schematisch dargestellt.

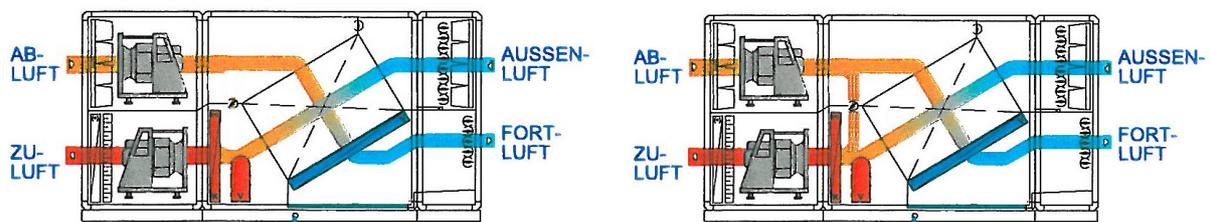


Abbildung 56: Schematische Darstellung eines Hallenlüftungsgerätes mit Wärmepumpe, mit (links) und ohne (rechts) Umluftanteil (Quelle: Menerga, ergänzt)

Der Umluftvolumenstrom wird in den Geräten nicht direkt gemessen; er kann als Differenz aus Zu- oder Abluftvolumenstrom und Außenluftstrom gebildet werden. Für die folgenden Grafiken ergibt sich damit:

- Außenluftvolumenstrom: „AU/ZU Volumenstrom über Reku“ (= Rekuperator)
- Umluftvolumenstrom: Differenz zwischen AU/ZU-Volumenstrom und ZU- bzw. AB-Volumenstrom

Zur Gesamtübersicht sind die Zu- und Abluftvolumenströme sowie der Volumenstrom über die Wärmerückgewinnungseinheit (Außen/Zuluftvolumenstrom) der vier Hallengeräte dargestellt (Abbildung 57 und Abbildung 58).

Beim Volumenstromverlauf vom Gerät für Halle 1+2 ist erkennbar, dass es deutliche Änderungen im Regelverhalten und im Umluftvolumenstrom gab. In dieser Halle sind u.a. Versuche vom PHI durchgeführt worden. Diese werden weiter unten be-

schrieben und analysiert. Der Auslegungsvolumenstrom von 14.500 m³/h wurde ab dem 19.12.2012 für etwa zwei Monate dauerhaft auf 8.300 m³/h abgesenkt. Danach gab es Zeiträume mit hohen und niedrigen Umluftvolumenströmen.

In Halle 3 wurden noch keine Reduktionen des Umluftvolumenstroms (also der Zu-/Abluftmenge) durchgeführt. Der Volumenstrom liegt - zumindest nach den Revisionsarbeiten - im Mittel dauerhaft bei etwa 8.000 m³/h. Am Verlauf des Außenluftvolumenstroms („AU/ZU über Reku“) ist der erhöhte Bedarf an Außenluft zur Entfeuchtung im Sommer im Gegensatz zum Winterzeitraum ablesbar.

Dieser Effekt ist bei Halle 4 und Halle 5 ebenfalls vorhanden, aber nicht so deutlich ausgeprägt. Das Gerät von Halle 4 wird dauerhaft zu-/ablufseitig mit etwa 12.000 m³/h betrieben. In Halle 5 liegen die Werte mit zunächst 15.500 m³/h etwas höher. Ab Ende November 2012 erfolgt eine Reduktion auf knapp 15.000 m³/h. Diese Volumenstromreduktion führt zu einer Reduktion des Stromverbrauchs der Anlage von etwa 23 kWh/Tag, was 690 kWh/Monat entspricht.

Alle vier Hallengeräte werden mit leicht höherem Abluft- als Zuluftvolumenstrom betrieben, um in der Halle zum Bauteilschutz geringe Unterdruckbedingungen zu erhalten (Herstellerstandard).

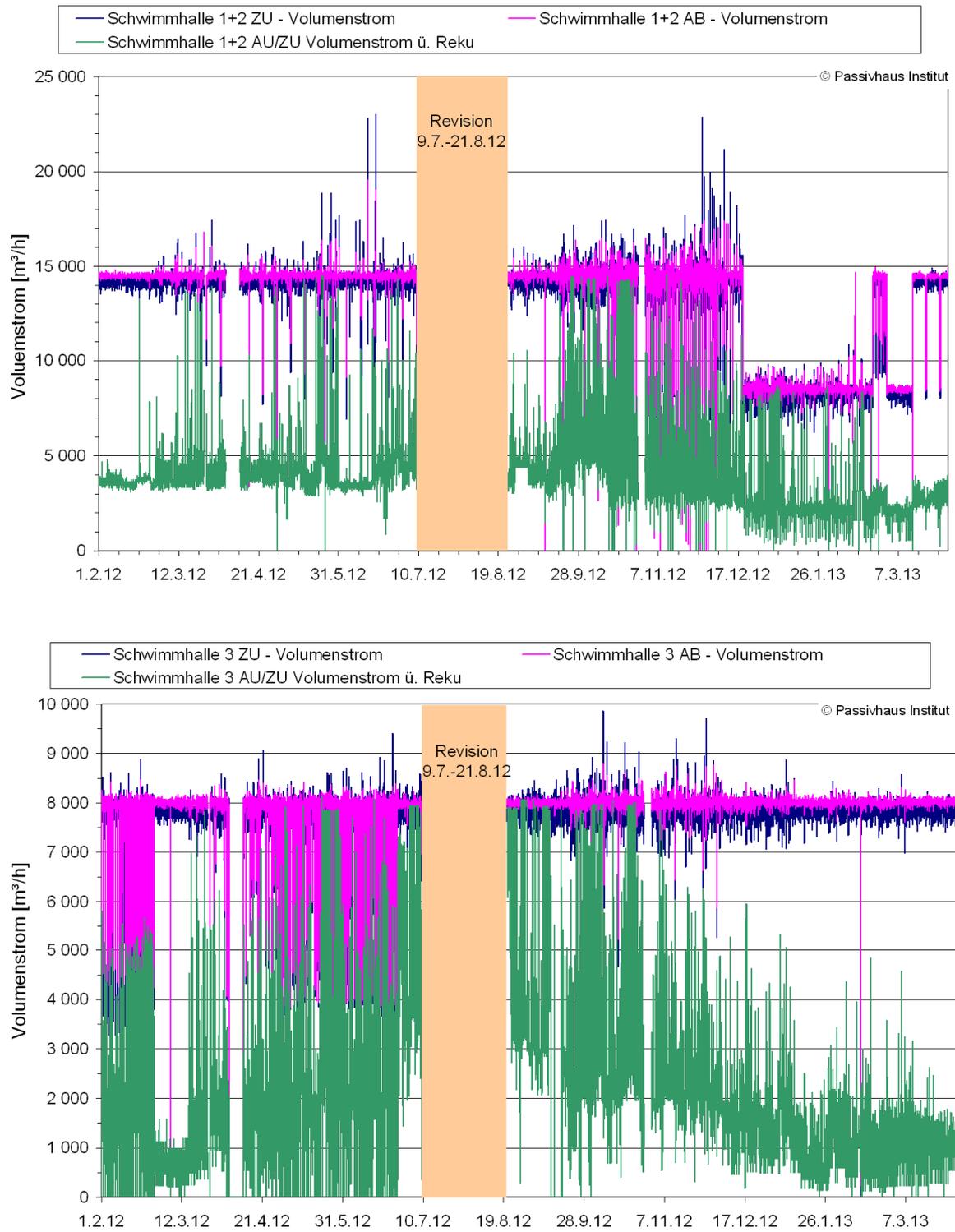


Abbildung 57: Volumenströme der Lüftungsanlagen von Halle 1+2 und Halle 3 vom 01.02.2012 bis zum 31.3.2013 (Tageswerte)

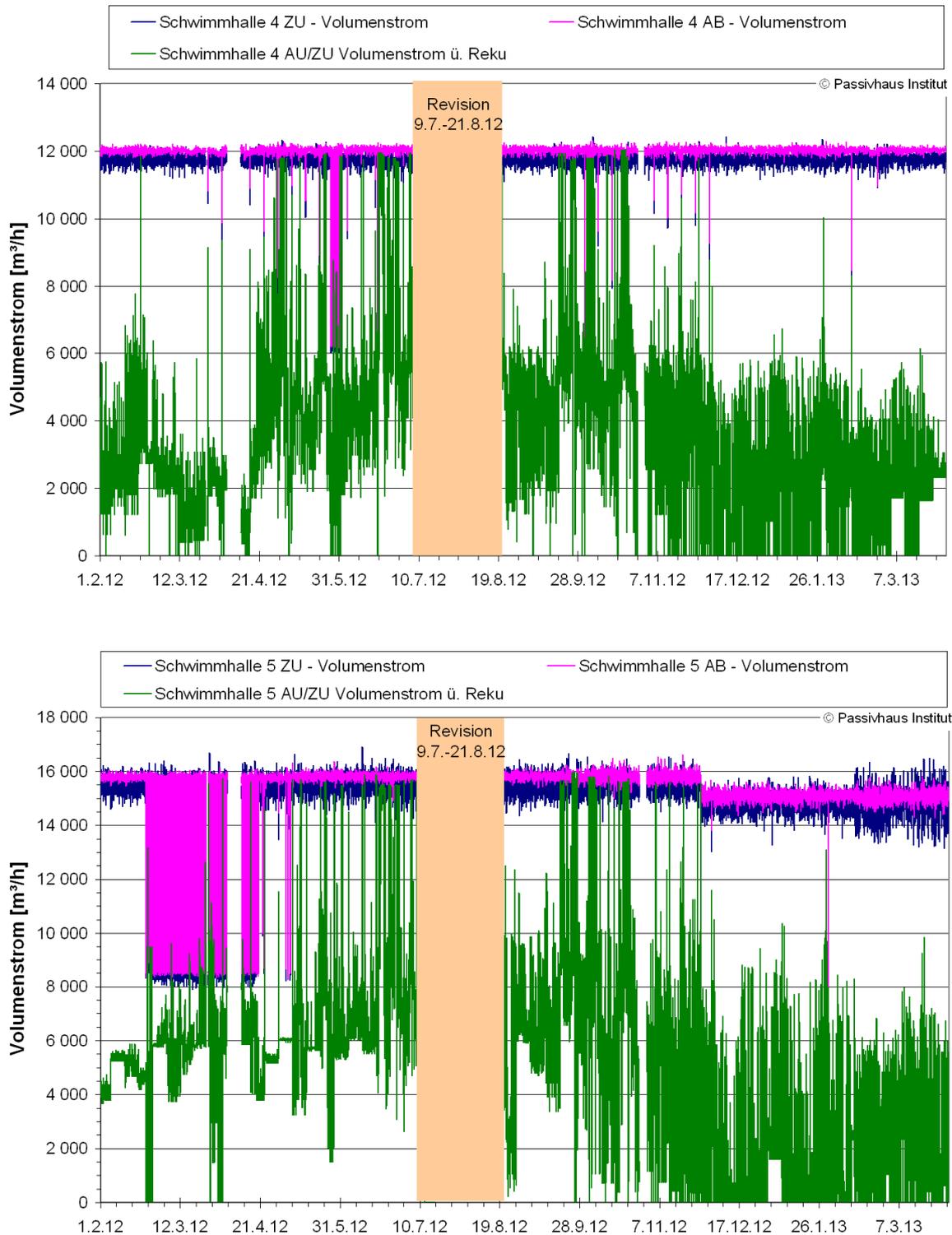


Abbildung 58: Volumenströme der Lüftungsanlagen von Halle 4 und 5 vom 01.02.2012 bis zum 31.3.2013 (Tageswerte)

4.5.2 Volumenstrom Geräte der Nebenzonen

Die Regelstrategie der beiden Lüftungsanlagen der Nebenzonen ist vollständig anders als das der Hallengeräte. Es handelt sich um andere Gerätetypen, welche

ohne Umluft arbeiten. Hier entspricht der Volumenstrom der Zuluft dem Außenluftvolumenstrom und der Abluftvolumenstrom dem der Fortluft.

4.5.2.1 Gerät "Umkleide/Duschen"

In Abbildung 59 ist zu erkennen, dass der Zuluft- und Abluft-Volumenstrom vom Gerät Umkleide/Duschen zwischen der Betriebsweise mit etwa 6.000 und 10.000 m³/h schwankt. Nachts erfolgt ab dem 20.09.2012 fast durchgehend eine Nachtabschaltung von 23:00 bis 06:00 Uhr. Die Volumenstromschwankungen ab dem 11.04.2012 ergeben sich zum Teil durch die Steuerung des Luftbedarfs nach der Feuchtesteuerung vom Duschbereich: Wenn dort die relative Feuchte den Maximalwert von 80 % übersteigt, wird der Außenluftstrom erhöht. Zusätzlich ist eine CO₂-Überwachung des Umkleidebereichs vorhanden, welche bei Überschreitung des Grenzwertes den Volumenstrom zusätzlich erhöht.

Im Regelfall würde das Gerät mit dem Auslegungsvolumenstrom von 10.000 m³/h dauerhaft betrieben werden, ggf. wäre eine Nachtabschaltung realisiert. Durch die realisierte Betriebsweise liegt der mittlere Volumenstrom inkl. der Nachtabschaltung bei nur 4.800 m³/h (01.11.2012 bis 31.3.2013). Dieser Unterschied erzeugt eine deutliche Einsparung durch die reduzierten Lüftungswärmeverluste sowie beim Stromverbrauch des Gerätes.

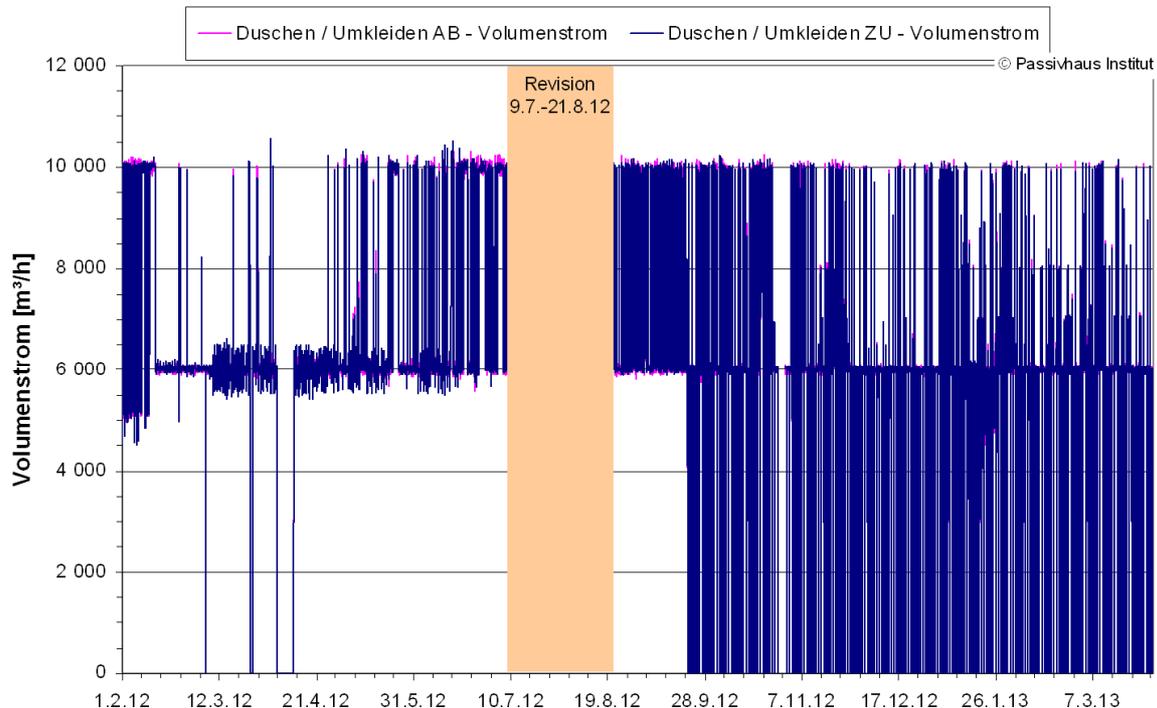


Abbildung 59: Volumenströme der Lüftungsanlagen Umkleiden/Duschen vom 01.02.2012 bis zum 31.3.2013 (Tageswerte)

4.5.2.2 Gerät „Nebenräume“

Das Gerät „Nebenräume“ versorgt den Foyer- und Eingangsbereich, den gesamten Keller sowie diverse Neben- und Technikräume. In Abbildung 60 zeigt sich, dass das Gerät wie beabsichtigt fast durchgehend mit einer aktiven Nachtabschaltung betrieben wird. Während der täglichen Betriebszeit läuft es üblicherweise mit etwa 8.000 m³/h. Die unbeabsichtigten, deutlich höheren Luftmengen in der Zeit vor und nach der Revision werden im Abschnitt 4.5.3.2 betrachtet.

Im Foyer wird mittels eines CO₂-Sensors die Luftqualität überwacht. Wenn die CO₂-Konzentration die Schwelle von 900 ppm überschreitet, öffnet die Klappe für den Foyer-Bereich weiter, um die Luftqualität dort zu verbessern. Die CO₂-Messwerte liegen daher nur als Spitzenwerte, kurzzeitig über dem Schwellenwert (siehe Abbildung 61). Insgesamt zeigen die CO₂-Messwerte eine sehr gute Luftqualität im Foyer.

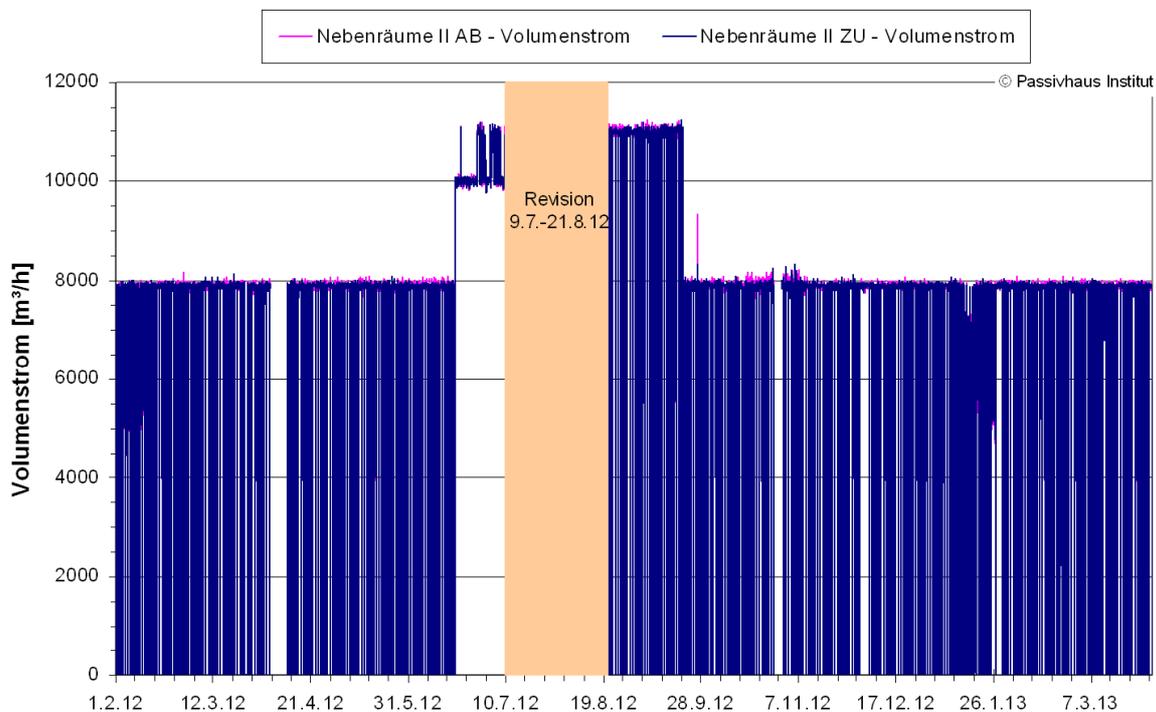


Abbildung 60: Volumenströme der Lüftungsanlagen Nebenräume vom 01.02.2012 bis zum 31.3.2013 (Tageswerte)

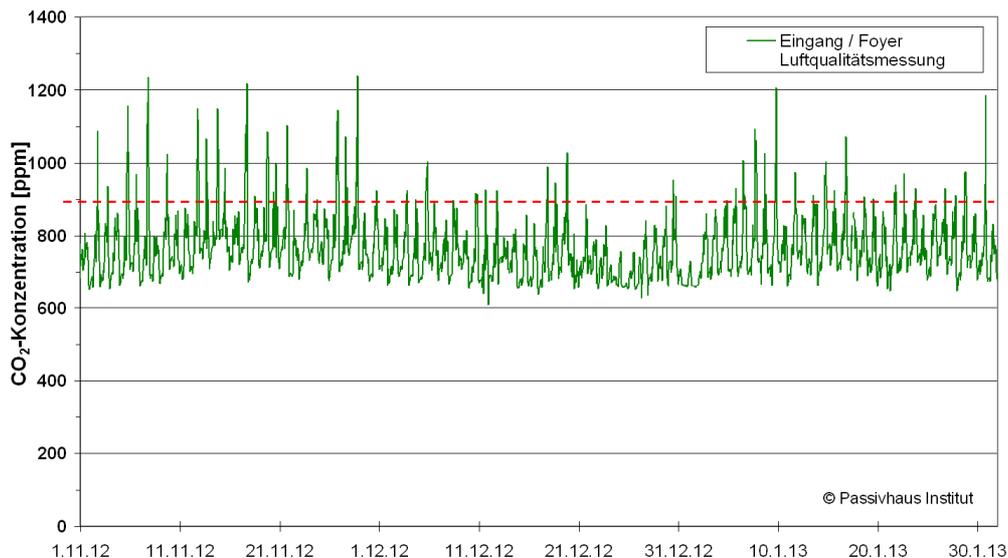


Abbildung 61: Die CO₂-Messwerte der Luftqualitätsüberwachung im Foyer vom 01.11.2012 bis zum 31.1.2013 (Tageswerte) zeigen hohe Luftqualität mit seltenen Überschreitungen der hier gewählten 900 ppm Grenze.

4.5.3 Auswirkungen der Volumenstromänderungen (Geräte Nebenzonen)

Beispielhaft werden einige Änderungen der Volumenströme an den beiden Lüftungsgeräten der Nebenzonen untersucht. Der Einfluss der Änderungen auf den Stromverbrauch ist durch die Veränderungen der Betriebsweise der Geräte deutlich erkennbar. Durch gezielte Veränderungen sowie durch ungewollte Bedienungseingriffe wurden die Luftvolumenströme z.B. bei den Geräten „Nebenräume“ und „Umkleide“ mehrfach deutlich verändert.

4.5.3.1 Gerät „Umkleiden/Duschen“

Am Gerät „Umkleiden/Duschen“ wurden am 21.08.2012 bei der Wiedereröffnung nach der Sommerpause vom konstanten Volumenstrom von 6.000 m³/h auf einen zeitweise erhöhten Betrieb mit 10.000 m³/h geschaltet. Dabei war gleichzeitig keine Nachtabschaltung aktiviert. Dies hat erwartungsgemäß einen deutlich höheren Stromverbrauch erzeugt (etwa plus 20 kWh/Tag). In Abbildung 62 sind die Zu- und Abluftvolumenströme sowie die Stromverbräuche dargestellt. Erst am 20.09.2012 nach einem Ortstermin durch Mitarbeiter des PHI wurde die geplante Nachtabschaltung des Gerätes erstmalig aktiviert. Diese Maßnahme reduzierte den Stromverbrauch deutlich, wird in den Tagen nach dem 23.09.2012 aber durch längeren Betrieb auf der erhöhten Stufe mit 10.000 m³/h zum Teil überlagert. Auch beim Wärmeverbrauch macht sich die Änderung durch die geringeren Lüftungswärmeverlust bemerkbar: An den drei Tagen vor der Änderung vom 20.09.2012 verbrauchten die Heizregister des Lüftungsgerätes und der beiden Nacherhitzer der Duschen 89 kWh/Tag, an den drei Tagen nach der Änderung waren es nur noch 66 kWh/Tag (Reduktion um 23 kWh/ Tag, entsprechend 26 %).

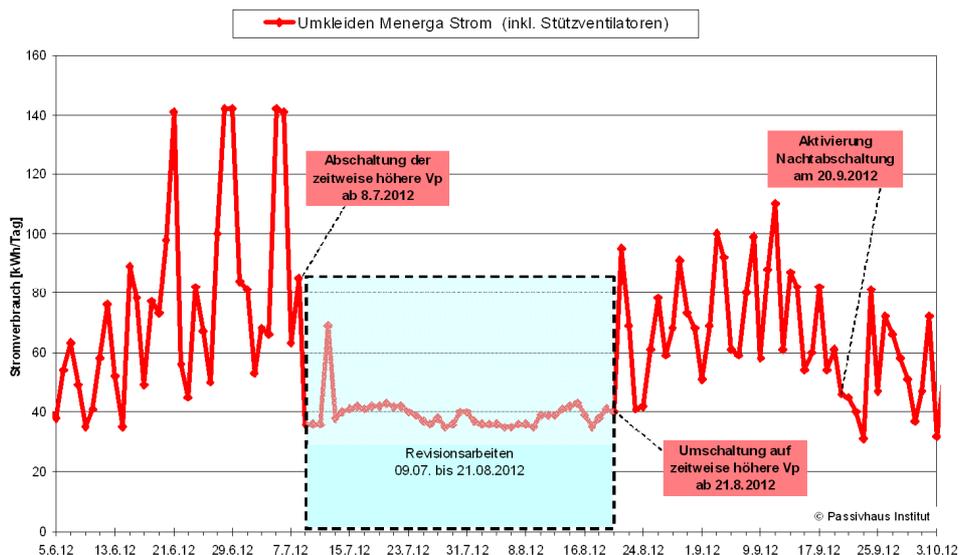
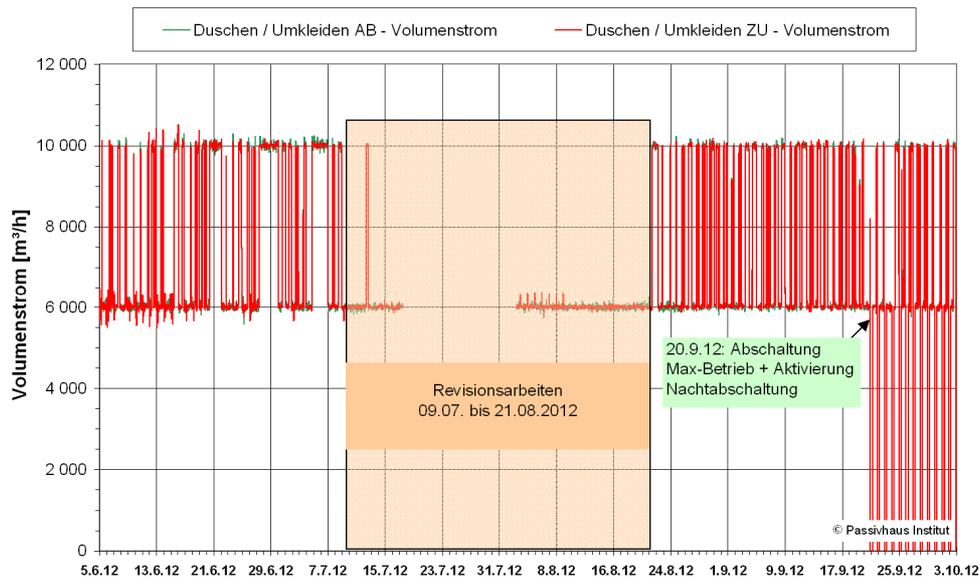


Abbildung 62: Veränderungen im Luftvolumenstrom des Lüftungsgerätes „Umkleide“ mit den zugehörigern Stromverbrauchswerten der Anlagen (Tageswerte 05.06. bis 03.10.2012).

4.5.3.2 Gerät „Nebenräume“

Beim Lüftungsgerät „Nebenräume“ ist Ähnliches zu beobachten (siehe Abbildung 63): Der Stromverbrauch steigt ab dem 18.06.2012 durch die Anhebung des Volumenstroms von ca. 8.000 auf 10.000 m³/h und Verhinderung der Nachtabschaltung drastisch an (plus 54 kWh/Tag). Bereits vor den Revisionsarbeiten an dem Gerät (17.07. bis 02.08.2012) wurde versehentlich die Taste „Handbedienung“ aktiviert (12.07.2012), bzw. diese nicht wieder aufgehoben. Damit wurde das Gerät

mit maximaler Luftförderleistung (12.000 m³/h) betrieben, gleichzeitig wurde aber die geplante Nachtabschaltung aktiviert. Insgesamt sank der Stromverbrauch dadurch um etwa 16 kWh/Tag. Der eigentlich gewünschte Betrieb wurde dann wieder ab dem 20.09.2012 (Ortstermin PHI Mitarbeiter) realisiert: Volumenstrom von 8.000 m³/h im Tagbetrieb sowie eine Nachtabschaltung von 23:00 bis 06:00 Uhr. Diese Maßnahme bedingte eine Reduktion des Stromverbrauchs von 40 kWh/Tag auf nur noch etwa 30 kWh/Tag. Die Wärmeversorgung verändert sich in der Tagessumme durch die Veränderungen des Luftvolumenstroms nicht merklich.

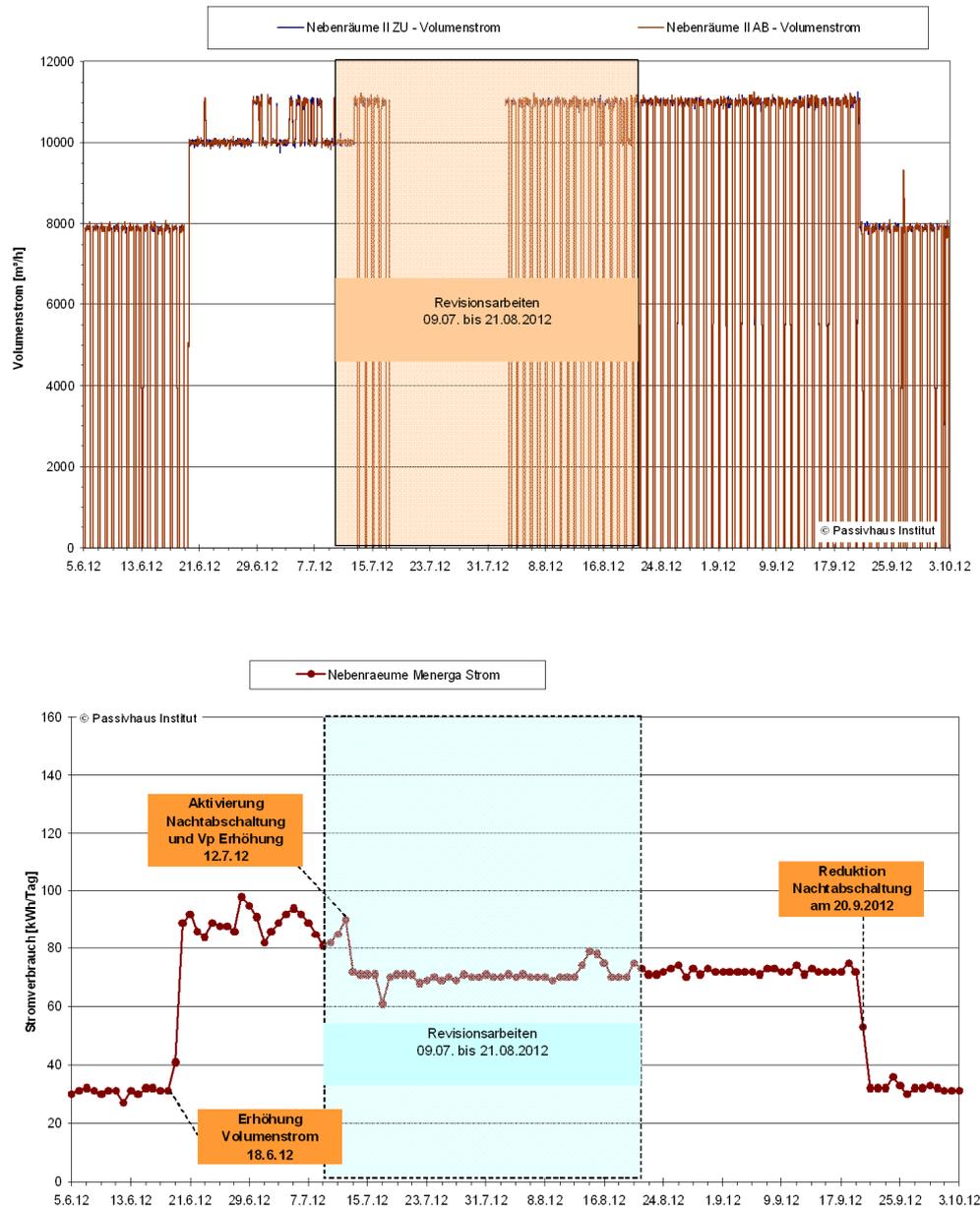


Abbildung 63: Veränderungen im Luftvolumenstrom des Lüftungsgerätes “Nebenträume” mit den zugehörigen Stromverbrauchswerten der Anlagen (Tageswerte 05.06. bis 03.10.2012).

4.5.4 Stromeffizienz der Lüftungsgeräte

Zur Beurteilung der Stromeffizienz der Lüftungsgeräte wurden an vier beispielhaften Tagen der Stromverbrauch des Tages der Lüftungsanlage inkl. Regelung auf den Mittelwert des Zu-/Abluftvolumenstroms des gesamten Tages bezogen. Bei Gerät 1+2 wurde dafür der Stromverbrauch der Wärmepumpe vom Geräteverbrauch abgezogen (mit Ausnahme des 15.09.2012; zu dieser Zeit war noch keine separate Messung des Stromverbrauchs der Wärmepumpe vorhanden).

Beim Gerät „Umkleiden“ ist abweichend zu berücksichtigen, dass der Ventilatorstrom der beiden Zusatzventilatoren zum Lufttransport durch die beiden Nachheizregister und Kanäle zu den Duschbereichen im Messwert enthalten ist.

Tabelle 6: Tagesmittlere Luftvolumenströme und Stromeffizienz der sechs Lüftungsgeräte an vier beispielhaften Tagen.

	Halle 1+2		Halle 3		Halle 4		Halle 5	
	m ³ /h	W/m ³ /h						
15.09.2012	14322	---	7930	0,40	11893	0,43	15656	0,35
22.12.2012	8433	0,22	7956	0,36	11921	0,39	14878	0,31
07.01.2013	8388	0,22	7965	0,38	11895	0,40	14939	0,32
16.01.2013	8317	0,21	7938	0,34	11916	0,39	14917	0,30
	Umkleiden *		Nebenträume					
	m ³ /h	W/m ³ /h	m ³ /h	W/m ³ /h				
15.09.2012	6494	0,35	7486	0,40				
22.12.2012	4354	0,38	5696	0,29				
07.01.2013	4725	0,44	5372	0,28				
16.01.2013	4240	0,34	2425	0,24				

* inkl. Stützventilatoren für die Duschbereiche

Die Messwerte zeigen gute bis sehr gute Ergebnisse, was auf gute Stromeffizienzen der Geräte und niedrige Druckverluste des Kanalnetzes schließen lässt.

4.5.4.1 Standby-Stromverbrauch

Aufgrund der schlechten Auflösung der Elektrozähler von einer Kilowattstunde kann die Standby-Leistung der Geräte nur grob eingegrenzt werden. Dies ist auch nur bei Geräten möglich, welche über ausreichende Stillstandszeiten verfügen. Die Geräte „Umkleide“ und „Nebenträume“ werden im Regelbetrieb in der Nacht mehr als 6 Stunden komplett abgeschaltet. In den Nachtstunden werden regelmäßig 1 bzw. 2 kWh Strom verbraucht, was einer elektrischen Leistung von etwa 150 bzw. 300 W entspricht. Damit liegen die Standby-Leistungen deutlich zu hoch. Die Hallengeräte im Lippe-Bad werden bei der gewählten Betriebsweise dauerhaft betrieben, wodurch keine Messungen des Standby-Verbrauchs der Geräte erfolgen kann.

4.5.5 Durchströmung der Halle / Nebelversuche

Es sollte untersucht werden, ob die Hallen auch mit dem geplanten, deutlich reduzierten Zu- bzw. Umluftvolumenstrom betrieben werden können, ohne dass sich Beeinträchtigungen für die Badegäste einstellen. Insbesondere ist dabei von Interesse, ob es Bereiche in einer Halle gibt, welche nicht oder nur unzureichend von der Luft durchströmt werden (sog. „Totecken“). Das Ziel ist bei gleichem Außenluftvolumenstrom den Zuluftvolumenstrom zu senken.

Aus diesem Grund wurden in der Nacht vom 05. auf den 06.12.2012 nach dem Ende des öffentlichen Badebetriebes ab 22:00 Uhr Nebelversuche in Halle 1+2 durchgeführt. Dazu wurden im zugehörigen Lüftungsgerät zwei Nebelgeräte positioniert und bei unterschiedlichen Zuluftvolumenströmen durch die Zuluftdüsen Nebel in die Halle eingebracht. Mittels Filmkameras an drei Positionen in der Halle und zusätzlichen Fotos wurde die Nebelverteilung in der Halle untersucht.



Abbildung 64: Nebelversuche in Halle 1+2 in der Nacht vom 05. auf den 06.12.2012. Blick auf die Außenwand (links) und die Wand zu den Umkleidebereichen (rechts). Im Bild sind zwei Zuluftdüsen (Kreise) und das Abluftgitter (Pfeil) gekennzeichnet.

Die Zu- und Abluftmenge wurde für den Versuch von 14.300 m³/h auf 8.300 m³/h reduziert, was einer Reduktion um 42 % entspricht. Durch das Schließen etwa der Hälfte der Zuluftdüsen mittels Stellmotoren bleibt der notwendige Druck an den Düsen bestehen.

Es zeigte sich, dass sich der Nebel auch bei reduziertem Zu-/Abluftvolumenstrom sehr schnell und gleichmäßig in der Halle verteilte. Nach etwa 40 Sekunden war die gesamte Halle 1+2 gleichmäßig eingenebelt (Abbildung 65). Daher wurde mit dem Fachplaner und dem Betreiber entschieden, dass der reduzierte Umluftvolumenstrom vollständig ausreichend für den Betrieb ist und die Anlagen mit reduziertem Umluftvolumenstrom betrieben werden können. Das dadurch ermöglichte, erhebliche Einsparpotential durch niedrigeren Stromaufwand für das Lüftungsgerät ist in Abschnitt 4.6.2 beschrieben.

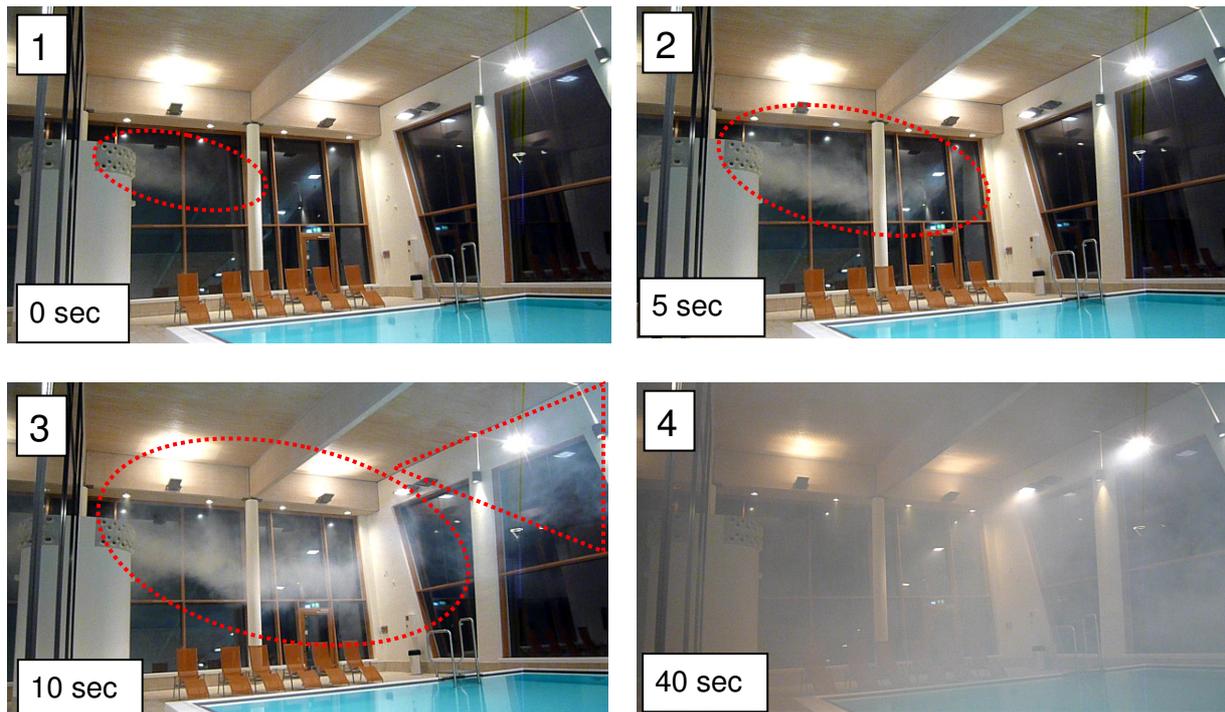


Abbildung 65: Fotostrecke zur Nebelausbreitung auf der Fassadenseite der Halle 1+2 bei Nebelaustritt aus dem Lüftungsturm (reduzierter Volumenstrom). Bei Bild 3 ist bereits der Nebel aus den Zuluftdüsen an der Innenwand in dem dargestellten Hallenbereich angekommen (rotes Dreieck). Bereits nach ca. 40 Sekunden ist die Halle gleichmäßig vernebelt.

4.5.6 Außenluftanteil

In jedem Lüftungsgerät werden der Zu- und der Abluftvolumenluftstrom der Ventilatoren geräteintern gemessen. Der energetisch interessante Außenluftanteil wird bei den Hallengeräten über eine geräteinterne Druckdifferenzmessung über die Wärmerückgewinnungseinheit (Rekuperator) bestimmt. Diese Messungen werden durch regelmäßige, automatische, nächtliche Kalibrierungen justiert, um die Druckverluständerung der Wärmeübertragereinheit zu kompensieren. Zunächst wurde dieser Abgleich wöchentlich durchgeführt, was aber zu relevanten Abweichungen im Volumenstrom führte. Daher wurden die Hallengeräte auf eine tägliche Kalibrierung umgestellt.

Der Mindestaußenluftanteil ist nach der [VDI 2089], unabhängig von der Hallenfeuchte auf $\geq 30\%$ des Außenluft-Auslegungsmassenstroms festgelegt. Bei dauerhafter Unterschreitung des Rechenwertes für die THM-Konzentration (Trihalogenmethane) im Beckenwasser kann der Außenluftmassenstrom laut der Richtlinie [VDI 2089] auf $\geq 15\%$ reduziert werden.

Bei der Reduktion der Zu-/Abluftvolumenströme sollte der Mindest-Außenluftvolumenstrom nicht beeinflusst werden. Bei der Umsetzung der - durch den Nebelver-

such (vgl. vorheriger Abschnitt) ermöglichten - Zuluftreduktion am 19.12.2012 zeigte sich allerdings unerwartet ein deutlicher Einfluss auf den Außenluftvolumenstrom. In Abbildung 66 markieren die beiden gestrichelten horizontalen Linien jeweils etwa den minimalen Außenluftvolumenstrom vor und nach der Umluftvolumenstromreduktion (ca. 2.300 und 1.200 m³/h). Diese Außenluftvolumenströme entsprechen etwa 16 % bzw. 8 % des Auslegungsvolumenstroms. Die Klärung der technischen Ursachen erfolgt zurzeit noch. Eine Ursache liegt in der begrenzten Genauigkeit der Druckmessdosen bei niedrigen Volumenströmen. Die Druckdosen wurden mittlerweile gegen verbesserte getauscht; eine weitere Testmessung steht noch aus.

Zur Sicherstellung der gleichbleibend guten Hallenluftqualität muss zunächst so lange auf die Zu- bzw. Umluftvolumenstromreduktion verzichtet werden, bis der Mindestaußenluftvolumenstrom dauerhaft sichergestellt werden kann.

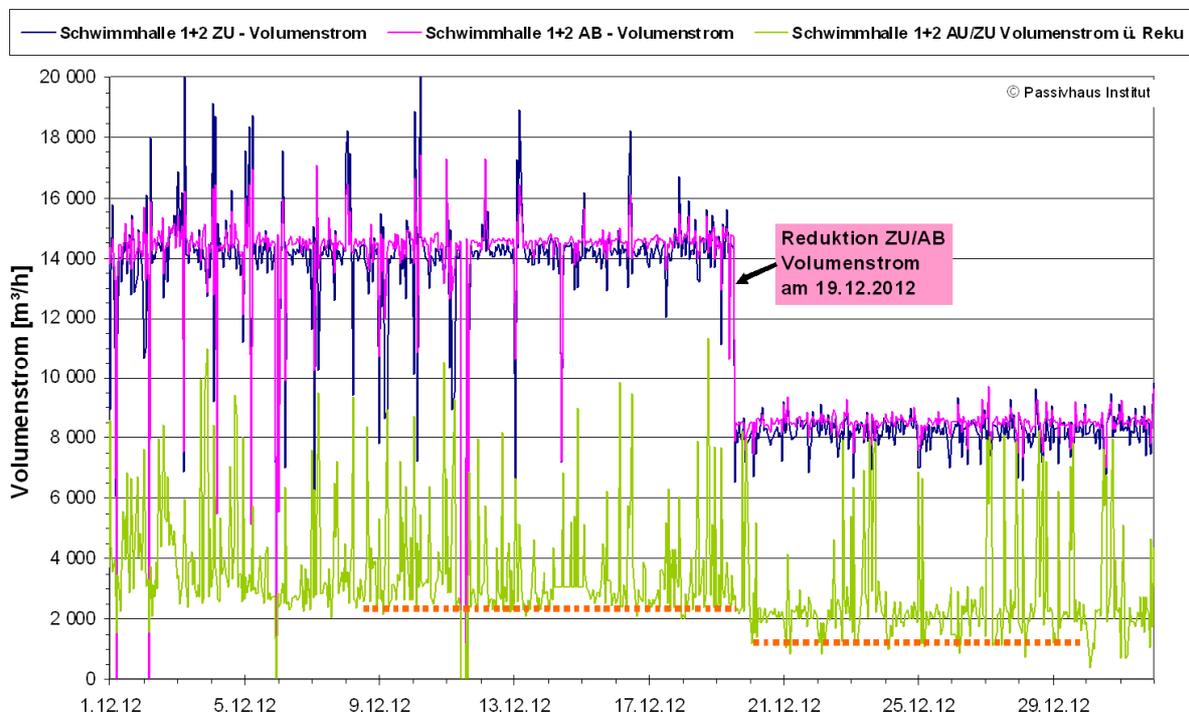


Abbildung 66: Verlauf der Volumenströme um den 19.12.2012. Erläuterungen siehe Text.

Eine erste orientierende Luftqualitätsmessung wurde am 26.02.2013 in der Zeit von 9:30 bis 13:00 Uhr durch die LVHT GmbH in drei Hallen durchgeführt [Funcke 2013]. Zu dieser Zeit (3,5 Stunden) wurde im Gerät 1+2 ein Außenluftvolumenstrom von im Mittel 3.000 m³/h gemessen (entspricht 21 % des Auslegungsvolumenstroms). In Halle 3 waren es 1.330 m³/h Außenluft (entspricht 16,9 %), in Halle 5 nur 1.281 m³/h (entspricht 8,6%). Die Hallenfeuchten lagen zwischen 57,4 und 58,4 % im Zeitraum der Probennahme (20 cm über dem Wasserspiegel) relativ hoch.

Zur Untersuchung der Luftproben auf THM wurde u.a. das Verfahren der Anreicherung auf Aktivkohle, Flüssigdesorption und anschließender gaschromatischer Ana-

lyse angewendet. Der Kurzbericht der Messung zeigt an, dass alle Messwerte in der Hallenluft unterhalb der Nachweisgrenze ($5,0$ bzw. $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft) liegen. Eine erhöhte Belastung der Hallenluft mit Trihalogenmethanen konnte damit - sogar bei den sehr niedrigen Außenluftvolumenströmen - nicht festgestellt werden. Weitere Untersuchungen dazu bei gezielt unterschiedlichen Hallenluftfeuchten bzw. Außenluftvolumenströmen im Lippe-Bad können helfen, den Wissensstand zu diesem Thema nachhaltig zu verbessern.

4.5.7 Änderung des Regelverhaltens

Durch Änderungen an der Programmierung der Lüftungsanlagen durch die Herstellerfirma ergaben sich Veränderungen im Regelverhalten der Anlagen. Gab es bei der Datenkontrolle Auffälligkeiten, musste zunächst anhand der Messwerte geklärt werden, ob es sich um Sensordefekte, Störungen, Sollwertanpassungen durch den Betreiber oder Regelungsänderungen durch den Hersteller handelte. Durch mehrfach auftretende Auffälligkeiten und dem Zeitraum bis zur Behebung der Ursachen, zeigen die Messdaten z.T. über längere Zeiträume unerwünschte Effekte bzw. Betriebsweisen. Diese Zeiträume sind für eine repräsentative Auswertung nur bedingt nutzbar.

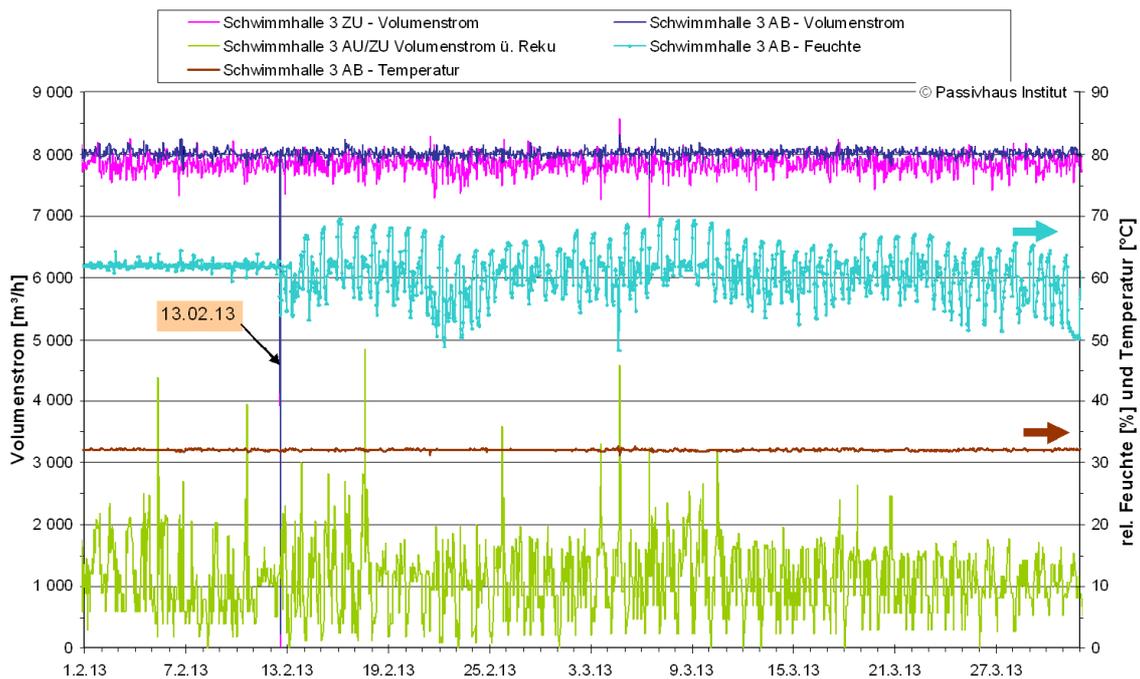


Abbildung 67: Auswirkungen auf die Hallenfeuchte durch Änderung des Regelverhaltens (Aktivierung Tag-/Nachtbetrieb) vom Lüftungsgerät Halle 3 am 13.02.2013 (Stundendaten vom 01.02. bis zum 31.03.2013).

In Abbildung 67 sind die Auswirkungen eines Eingriffs vom 13.02.2013 durch die Herstellerfirma dokumentiert. Durch Anpassungen der Regelparameter und der gleichzeitigen Aktivierung einer unterschiedlichen Tag-/Nacht-Fahrweise (Sollwert-

vorgabe) gibt es deutliche Tag-/ Nacht-Schwankung der Hallenfeuchte von über 10 % welche erst nach einiger Recherche erklärt werden konnten.

4.5.8 Luftgeschwindigkeit über der Wasseroberfläche

Es ist von Interesse, ob die Änderung des Zuluftvolumenstroms einen nennenswerten Einfluss auf die Luftgeschwindigkeit über der Wasseroberfläche hat. Dadurch könnten sich Einflüsse auf die Verdunstung des Beckenwassers ergeben. Aus diesem Grund wurden am 05.12.2012 Luftgeschwindigkeitsmessungen über der Wasseroberfläche von Becken 1+2 bei den beiden unterschiedlichen Umluftvolumenströmen durchgeführt.

Es wurden vier Messpunkte 35 cm über der Wasseroberfläche nahe dem Beckenrand gewählt. In der Skizze (Abbildung 68) sind die Messpositionen und die Zu- und die Abluftpositionen eingetragen. Die Positionen unterscheiden sich durch unterschiedliche Einflüsse der Zu- und Abluftöffnungen.

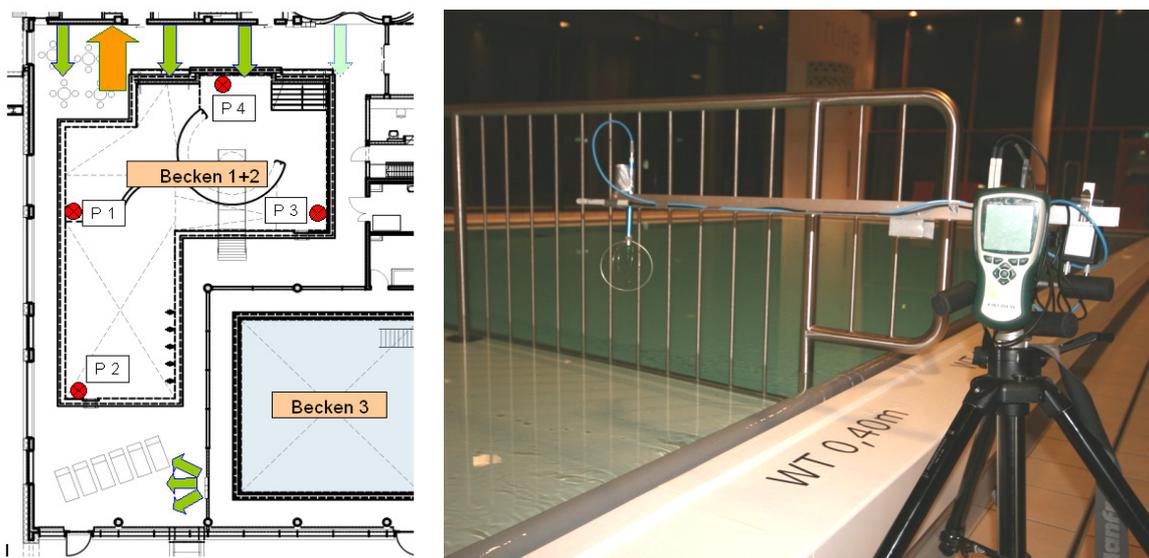


Abbildung 68: Links: Die vier Messpositionen P1 bis P4 über der Wasseroberfläche von Becken 1+2. Mit den grünen Pfeilen sind die Zuluftpositionen und mit dem orangenen Pfeil ist die Abluftposition markiert. Rechts: Foto von Messposition P1.

Zeitweise wurde das Becken während der Messungen noch genutzt. Durch die Nutzung haben sich Störungen in den Messungen ergeben. Daher wurden nur die Messdaten verwendet, bei denen keine Beckennutzung vorhanden war.

Die Auswertung der Luftgeschwindigkeitsmessung über der Wasseroberfläche von Becken 1+2 an den vier unterschiedlichen Positionen zeigt, dass:

- der Unterschied zwischen reduziertem und vollem Lüftungsvolumenstrom über der Wasseroberfläche kaum messtechnisch nachweisbar ist,

- für Aussagen zum Turbulenzgrad nach EN ISO 7730 zu viele Störungen während der Messung bestanden.

Ob sich durch die Unterschiede in der mittleren Strömungsgeschwindigkeit relevante Auswirkungen auf die Wasserverdunstung ergeben, konnte auf diesem Weg nicht festgestellt werden.

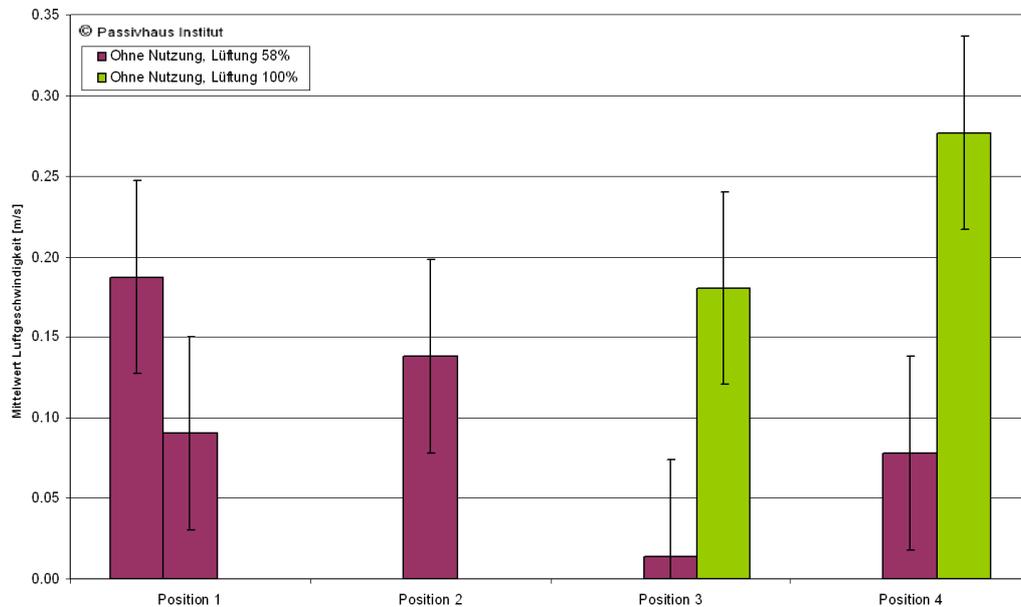


Abbildung 69: Luftgeschwindigkeiten 35 cm über der Wasseroberfläche von Becken 1+2 an vier Messpositionen bei unterschiedlichem Zu-/Abluftvolumenstrom. An Position 1 konnten zwei Messungen bei 58 % Lüftungsvolumenstrom ausgewertet werden. Im Diagramm sind zusätzlich die Messabweichungen eingetragen.

4.6 Versuchsreihen und geänderte Betriebsbedingungen

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Hallenfeuchten, Umluft- und Außenluftvolumenströme auf den Energieverbrauch wurden im Rahmen des Monitorings untersucht, um die Ansätze der Passivhaus Schwimmbad Grundlagenstudie [Schulz et al. 2009] zu überprüfen. Dazu wurden gezielt verschiedene Variationen dieser Parameter durchgeführt und die Auswirkungen untersucht. Einige beispielhafte Änderungen der Betriebsparameter können der folgenden Tabelle entnommen werden:

Tabelle 7: Auszug aus dem Plan zu den Versuchsreihen zur Veränderung der Betriebsweise der Sollwerte bzw. der Hallenlüftungsgeräte

#	Start	Ende	Maßnahmen	Hallen			
				1+2	3	4	5
1	05.12.12	dauerhaft	Anhebung Feuchte um 5%	x	x	x	x
2	19.12.12	dauerhaft	Luftmenge Zu/Ab reduzieren.	x			
3	09.01.13	dauerhaft	Anhebung Feuchte + 5% (Halle 1+2) bzw. +7% (Halle 3)	x	x		

Auch durch Änderungen der Betriebsbedingungen (z.B. Hallenfeuchte) außerhalb dieses gezielten Untersuchungsprogramms gab es einige abrupte Anpassungen, welche ebenfalls auf ihre Auswirkungen hin untersucht werden können (siehe dazu auch 4.5.3).

4.6.1 Variation der Hallenfeuchte

Die Regelung der Lüftungsgeräte erfolgt nach der Sollwertvorgabe der Raumluftfeuchte. Niedrigere Raumluftfeuchten erfordern höhere Außenluftwechsel zur Trocknung der Luft, was einen höheren Wärmeverbrauch - verursacht durch Lüftungswärmeverluste - zur Folge hat. Am 18.09.2012 wurden - wie bereits erwähnt - die Hallenfeuchten in drei Hallen deutlich gesenkt (ca. -15 %-Punkte bzw. 4,4 g/kg), was zu einer erheblichen Erhöhung des Wärmeverbrauchs geführt hat. Die Absenkung der relativen und der absoluten Feuchte bei gleichbleibendem Temperaturniveau ist im linken Teil von Abbildung 70 beispielhaft für Halle 5 dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung ist die Erhöhung des Wärmeverbrauchs durch die Feuchtereduktion anhand der Messdaten der Luftheizregister der drei betroffenen Hallen dargestellt.

Die Verbräuche von Halle 4 und 5 zeigen deutliche Anstiege der Heizwärme. In Halle 1+2 wurde vorher gar nicht über das Heizregister nacherwärmt, da die Wärmepumpe des Gerätes zur Beheizung ausreichte. Durch die Änderung wird nun auch in dieser Halle eine Nachheizung über das Heizregister notwendig. Der Mehrverbrauch durch die Reduktion der Feuchte der drei Hallen beträgt in Summe ca. plus 410 kWh/Tag. Dabei sind die Wärmeeinträge der Wärmepumpe noch nicht berücksichtigt,

da zu dieser Zeit noch keine gesonderte Strommessung der WP aktiv war. Damit bestätigen sich die theoretischen Ansätze aus der Grundlagenstudie [Schulz et al. 2009].

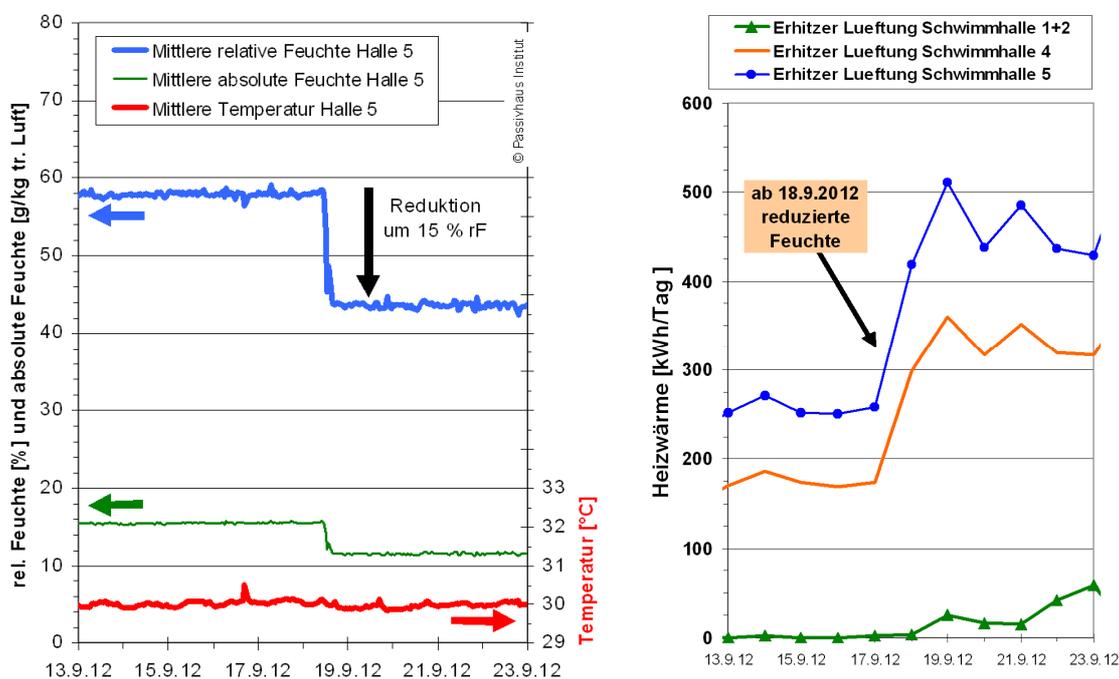


Abbildung 70: Änderung der Hallenfeuchte am 18.09.2012 (Links exemplarisch für Halle 5 abgebildet). Rechts: Auswirkungen der Veränderungen der Hallenfeuchte auf den Heizwärmeverbrauch der Lüftungsgeräte in drei Hallen (Tageswerte; 13. bis 22.09.2012).

Bei der niedrigeren Hallenfeuchte ist - für den dann höheren Abtransport der Feuchtelasten aus den Hallen - ein größerer Außen-/Fortluftstrom notwendig. Die Erhöhung des Außenluftvolumenstroms bei gleichbleibendem Zu-/Abluftvolumenstrom zum Zeitpunkt der Feuchtereduzierung am 18.09.2012 ist in Abbildung 71 dargestellt. Da dieser Volumenstrom über die Wärmerückgewinnung des Lüftungsgerätes geführt wird, steigt der Druckverlust und damit zwangsläufig auch der Stromverbrauch des Gerätes. Wie oben bereits erwähnt, ist bei Gerät 1+2 die Wärmepumpe zu berücksichtigen: Steigt die notwendige Heizenergie an, um das größere Volumen an Außenluft zu beheizen, wird die Wärmepumpe länger bzw. stärker betrieben; damit steigt ihr Stromverbrauch. Durch diese beiden Effekte steigt der Stromverbrauch der drei Lüftungsgeräte um 94 kWh/Tag an.

Damit wird deutlich, dass sich die Reduzierung der Hallenfeuchte energetisch doppelt auswirkt: Der Heizwärmeverbrauch und der Stromverbrauch steigen deutlich an. In Summe wird durch diese Änderungen im September 2012 in den drei Hallen eine Verbrauchserhöhung von 410 kWh/Tag + 94 kWh/Tag = 504 kWh/Tag verursacht.

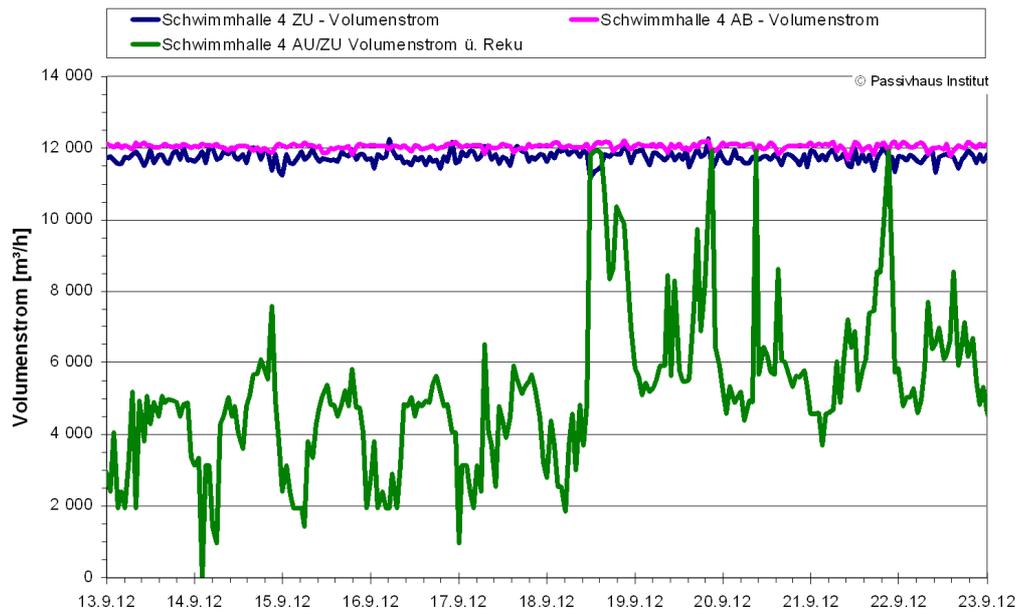


Abbildung 71: Erhöhung des Außenluftvolumenstroms durch die Reduzierung der Hallenfeuchte am 18.09.2012 bei Halle 4 (Stundenwerte; 13. bis 22.09.2012).

Die reduzierte Verdunstung des Beckenwassers bei höherer Hallenfeuchte ist auch aus den Messdaten direkt ablesbar. Aus den Temperatur- und Feuchtemessungen der Zu- und Abluftvolumenströme einer Halle kann die Entfeuchtungsleistung berechnet werden. Diese entspricht in etwa dem in der Halle verdunsteten Wasser pro Zeiteinheit (vgl. Abschnitt 5.1.1.1). In Abbildung 72 sind diese Werte gemeinsam mit der relativen Hallenfeuchte beispielhaft von Halle 4 dargestellt. Dabei handelt es sich ebenfalls um den Zeitraum der Feuchtereduktion um den 18.09.2012. Bei der erhöhten Feuchte wurden im Mittel 30,7 kg/h Wasser abgeführt, bei der niedrigeren Feuchte (minus 13,3 % rF) waren es 41,1 kg/h. Für diese höhere Verdunstungsmenge treten erhöhte Wärmeverluste durch die benötigte Verdunstungsenthalpie auf, wodurch der Heizwärmeverbrauch ansteigt.

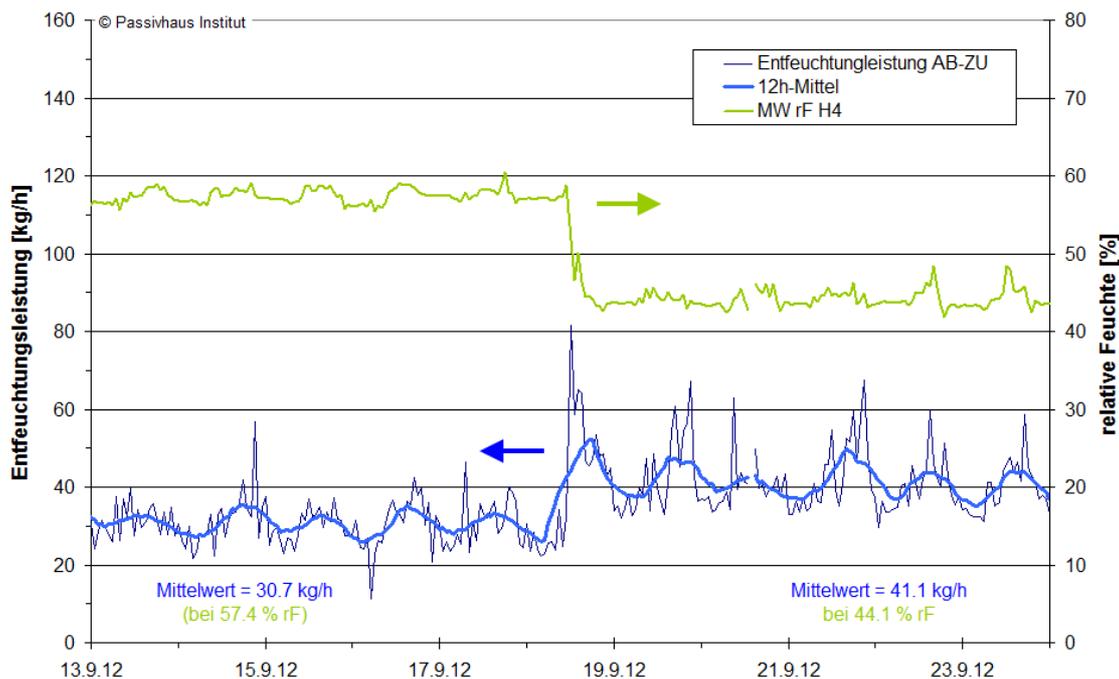


Abbildung 72: Entfeuchtungsleistung (berechnet aus der Differenz der Zu- und Abluftfeuchte) sowie relative Hallenfeuchte in Halle 4 (Stundenwerte, 13. bis 23.09.2012)

4.6.1.1 Erhöhung der Feuchte am 09. Januar 2013

Im Rahmen der Versuchsreihen wurden am 09. Januar 2013 in Halle 1+2 sowie 3 die Sollwerte der Hallenfeuchte angehoben. Die Auswirkungen werden hier zur Absicherung der oben berechneten energetischen Veränderungen ausgewertet.

In Halle 3 wurde die Feuchte von durchschnittlich 48 % auf 55,5 %, also um 7,5 % angehoben. Die Außentemperatur betrug am 09.01.2013 durchschnittlich 5,3 °C, vom 06.01 bis zum 12.01.2013 durchschnittlich 4,1 °C. Der Wärmeverbrauch hat sich durch die Feuchteanhebung um 21,4 kWh/Tag reduziert. Der Stromverbrauch sinkt - wie oben beschrieben - durch den geringeren notwendigen Außenluftanteil ebenfalls ab. Bei dieser Feuchterhöhung wurden beim Stromverbrauch 6,3 kWh/Tag eingespart. In Summe werden damit in dieser kleinsten Halle 21,4 kWh/Tag + 6,3 kWh/Tag = 27,7 kWh/Tag Endenergie eingespart.

Wie erwartet werden damit die gleichen Effekte beobachtet wie bei dem weiter oben ausgeführten Beispiel der drei anderen Hallen.

4.6.2 Reduktion der Zuluftmenge

Bei der bereits in Abbildung 66 (Abschnitt 4.5.6) beschriebenen Reduzierung des Zuluft-/Abluftvolumenstroms in Halle 1+2 kann die Auswirkung auf den Stromverbrauch des Lüftungsgerätes untersucht werden. Durch den Nebelversuch zur Visualisierung der Raumluftrömung vom 05.12.2012 wurde festgestellt, dass auch

bei deutlich verringertem Zuluft-Volumenstrom (bei gleicher Feuchte) in der Halle keine Probleme mit der Durchströmung auftraten (vgl. Abschnitt 4.5.5). Aus diesem Grund wurde am 19.12.12 in Halle 1+2 die Luftmenge von der Auslegung nach VDI 2089 mit ca. 14.500 auf nur noch ca. 8.500 m³/h reduziert (um 41 %). Dabei muss der Außenluftvolumenstrom aus Gründen der Luftqualität unverändert bleiben, was allerdings real nicht erfolgte (siehe dazu die Ausführungen in 4.5.6). Der Stromverbrauch des Lüftungsgerätes ist allein durch diese Maßnahme um etwa 74 kWh/Tag (entspricht 63 %) gesunken (Abbildung 73). Das entspricht einer Einsparung von 2200 kWh pro Monat durch diese Veränderung in nur einer Halle. Diese Messdaten bestätigen die Überlegungen der vorausgegangenen Untersuchungen, dass durch eine geschickte Lüftungsplanung und eine dadurch ermöglichte Reduzierung des Umluftanteils erhebliche Stromeinsparungen erzielt werden können. Voraussetzung ist dabei immer, dass der Mindest-Außenluftvolumenstrom dabei nicht unterschritten wird und es somit keine Einschränkung der Luftqualität geben kann.

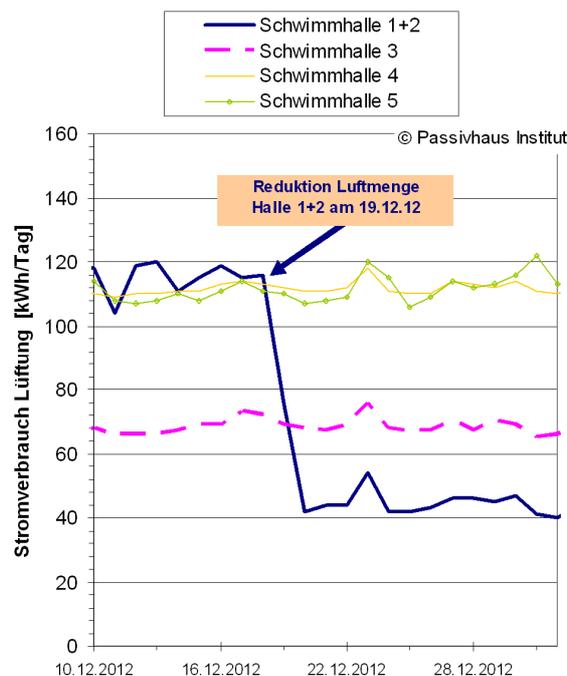


Abbildung 73: Auswirkungen der Veränderungen des Zu-/Abluftvolumenstroms vom 19.12.2012 auf den Stromverbrauch des Lüftungsgerätes in Hallen 1+2 (Tageswerte; 13. bis 22.09.2012). Der Stromverbrauch der anderen Geräte bleibt unverändert.

4.7 Wasserverbrauch

Der Frischwasserverbrauch des Bades wird für die größten Verbrauchsbereiche gesondert gemessen oder kann als Differenzwerte aus den Zählerständen der Unterzählern berechnet werden. Eingesetzt sind handelsübliche Wasserzähler. Die schematische Anordnung der Versorgungsleitungen mit den Wasserzählern kann der folgenden Grafik entnommen werden:

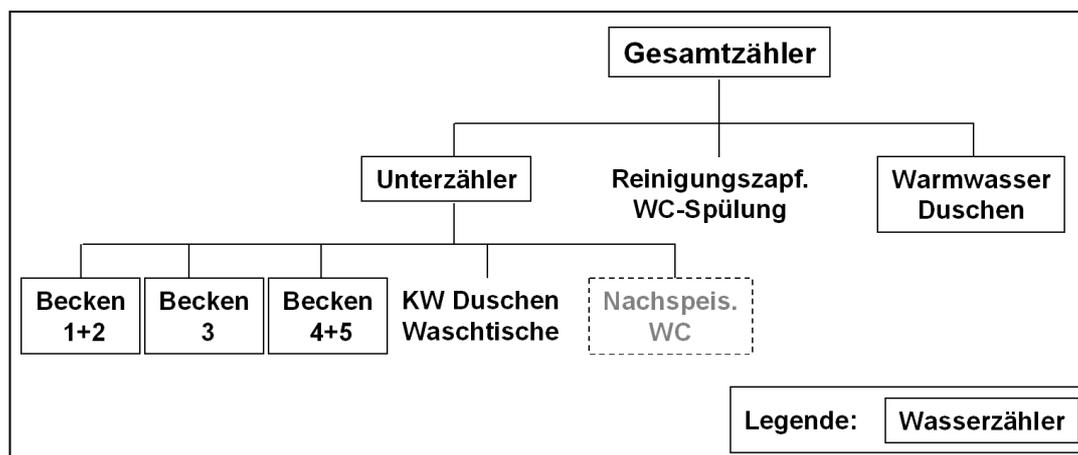


Abbildung 74: Anordnung der Wasserzähler ohne den Bereich der Wasseraufbereitung. Verbrauchsbereiche ohne Zähler (ohne Rahmen in der Skizze) werden als Differenzwerte berechnet. Die „Nachspeisung WC“ wird nur benötigt, wenn die Abwasseraufbereitung in Betrieb ist und das Grauwasser für die WCs nicht ausreicht (nur bis März 2012 in Betrieb).

Monatlich werden vom Hallenbad in Betriebsmonaten zwischen **2.093 und 3.107 m³** Frischwasser benötigt (535 bis 794 Liter/(m²_{EBF} Monat)). Das entspricht durchschnittlichen Tagesverbräuchen zwischen **72 bis 104 m³/Tag**. Die größten Wassermengen werden in den Beckenkreisläufen bei der Filterrückspülung verworfen und müssen dann durch Frischwasser ersetzt werden. Das Rückspülwasser sollte eigentlich zu etwa 70 % aufbereitet und wiederverwendet werden. Da die gesamte Aufbereitungsanlage z.Z. nicht in Betrieb ist, muss das Rückspülwasser seit etwa Februar 2012 komplett mit Frischwasser ersetzt werden. Die Anlage soll in naher Zukunft wieder in Betrieb genommen werden. Damit wird dann nicht nur ein erheblicher Teil Frischwasser eingespart, sondern auch die benötigte Energie zur Wassererwärmung deutlich reduziert. Weitere Ausführungen dazu finden sich in Abschnitt 5.2.

In Abbildung 75 ist zu erkennen, dass sich im August 2012 – bedingt durch die Wiederbefüllung der Becken – der höchste Verbrauchswert von 3.168 m³ eingestellt hat. Die Befüllung erfolgte vom Teilbereich „Reinigungszapfstellen + WC Spülung“ und nicht durch die übliche Frischwassernachspeisung der drei Beckenkreisläufe.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Umrüstungen und Vergrößerungen der Filtertechnik in den Beckenwasserkreisläufen zu einem höheren Rückspülwasserver-

brauch geführt haben. Nach der Revisionszeit ist der Verbrauch der drei Beckenkreisläufe in Summe von 1.450 m³/Monat auf etwa 2.200 m³/Monat angestiegen. Die anderen Verbrauchsbereiche sind nahezu unverändert geblieben.

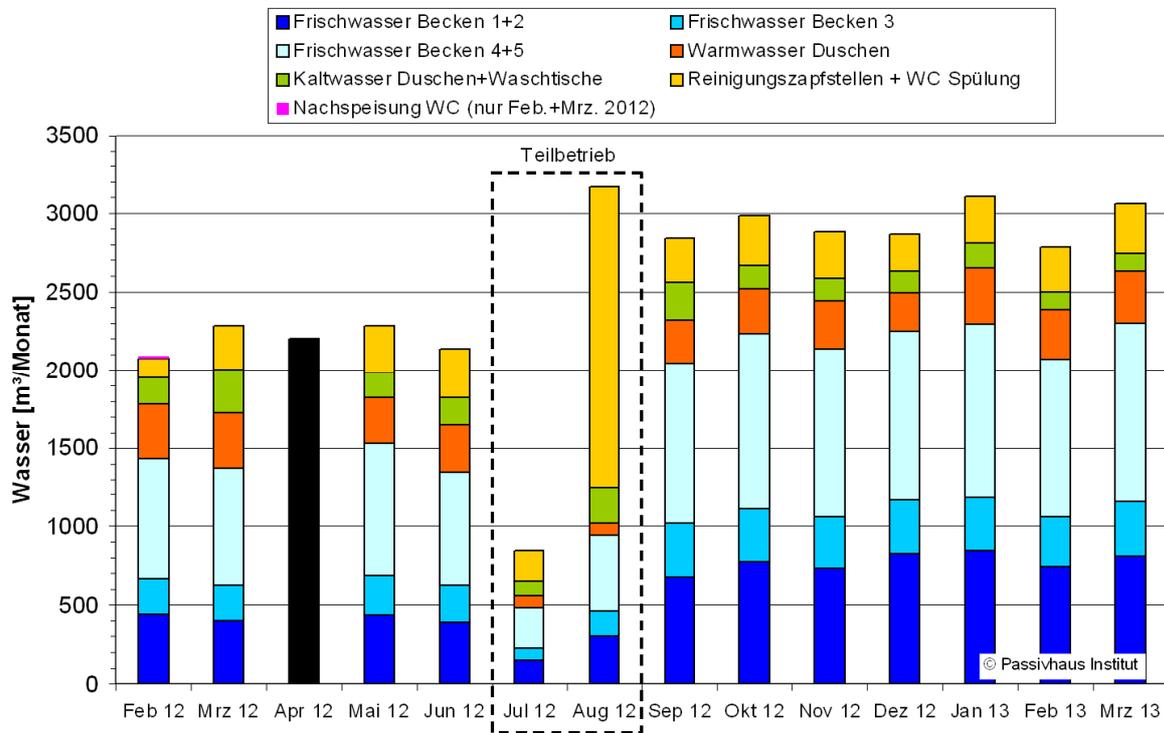


Abbildung 75: Monatliche Wasserverbrauchswerte der unterschiedlichen Teilbereiche vom Februar 2012 bis zum März 2013. Im April 2012 kann wg. Teilausfällen der Datenerfassung nur die Gesamtmenge angegeben werden.

4.8 Energieverbrauch

Von Interesse bei der energetischen Gesamtbeurteilung des Bades sind zunächst die Endenergieverbrauchswerte, die vom Gebäude insgesamt bezogen wurden. Aufgrund der Montagefehler der ausführenden Firma und der Nachrüstung von einigen Wärmezählern müssen die ersten Monate bis Mai 2012 mit Hochrechnungen ergänzt werden (Abbildung 76). Während der sommerlichen Badschließung wurden Revisionsarbeiten durchgeführt (09.07. bis 21.08.2012). In dieser Zeit wurde allerdings auch Energie benötigt: fast dauerhaft wurden die Lüftungsanlagen betrieben, das Wasser wurde komplett abgelassen und die Becken erneut befüllt und aufgeheizt.

Als spezifische Jahresverbrauchswerte des Lippe-Bades ergibt sich für den Jahreszeitraum April 2012 bis einschließlich März 2013 mit einigen Hochrechnungen bei Zählerausfall oder Umbau sowie inkl. des Zeitraumes mit den Revisionsarbeiten im Juli/August:

Wärmebezug: 258,1 kWh/(m²_{EBF} a)
Strombezug: 155,9 kWh/(m²_{EBF} a)

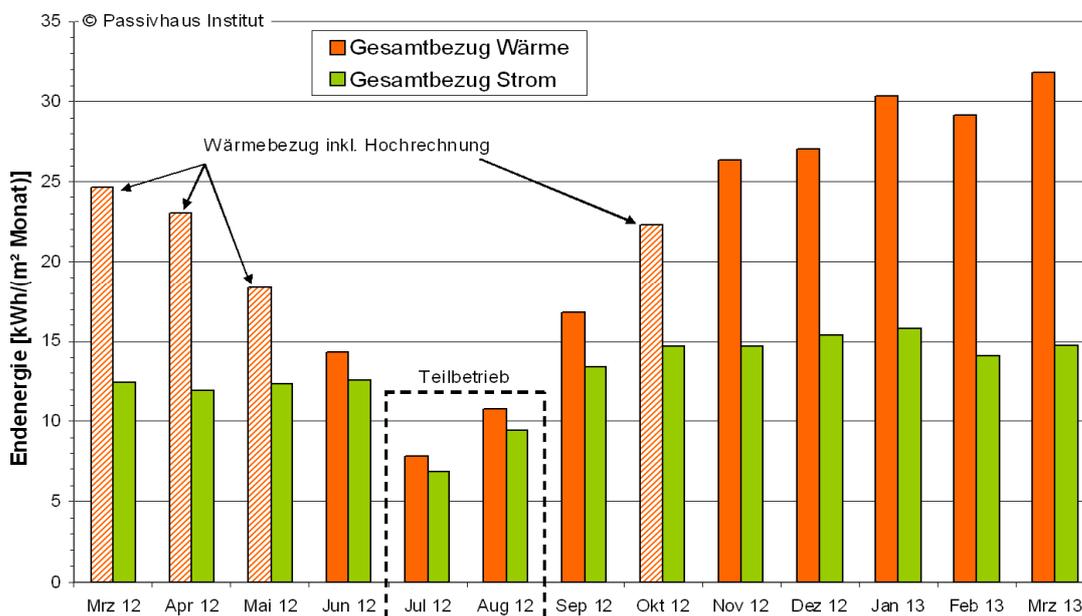


Abbildung 76: Gesamter spezifischer Wärme- und Strombezug (Endenergie) des Hallenbades von März 2012 bis März 2013.

Bezieht man diese gesamten Jahresverbrauchswerte auf die **Beckenfläche** von 850 m² ergeben sich die folgenden spezifischen Verbrauchswerte:

Wärmebezug: 1.189 kWh/(m²_{Becken} a)
Strombezug: 718 kWh/(m²_{Becken} a)

Mit den auf die Beckenflächen bezogenen Verbrauchswerten für den Gesamtverbrauch von Wärme und Strom können Vergleiche mit anderen Bädern aufgestellt werden. Es gibt nur wenige den Autoren bekannte veröffentlichte Messwerte von anderen Bädern, welche zu einem Vergleich herangezogen werden können. Die Schwankungsbreite der wenigen Literaturangaben ist dabei sehr groß. Bei den verwendeten Quellen handelt es sich um keine einzelnen Bäder, sondern um Mittelwerte oder Bandbreiten von ganz unterschiedlichen Bädern [ages 2007], [DGfdB R 60.04], [Schlesiger 2001] und [VDI 2089-Blatt 2]. Nicht jedes dieser Bäder wird sich einzeln zu einem Vergleich eignen; so sind ggf. Freizeitbäder mit Rutschen und Wellnessbereichen vertreten wie auch reine Sportbäder. Um dennoch einen Eindruck von den Verbrauchsgrößen zu erhalten und eine erste Einordnung des Lippe-Bades vornehmen zu können, wurden die Angaben aus der Literatur gemittelt und soweit möglich deren Schwankungsbreite (Größt- und Kleinstwert) angegeben (Abbildung 77). Schon diese erste Orientierung zeigt deutlich, dass die Verbrauchswerte in Lünen bereits im ersten Betriebsjahr deutlich unter den Mittelwerten der Literatur liegen: Im Wärmebereich liegt der Messwert fast 70 % unter dem Literaturmittelwert, beim Strom sind es mehr als 40 %. Das erste Betriebsjahr im Lippe-Bad war gekennzeichnet durch die Einregulierung der komplexen Gebäudetechnik. Im Betrieb ist noch weiteres Optimierungspotential vorhanden. Deshalb können in der Zukunft noch niedrigere Verbrauchswerte erwartet werden.

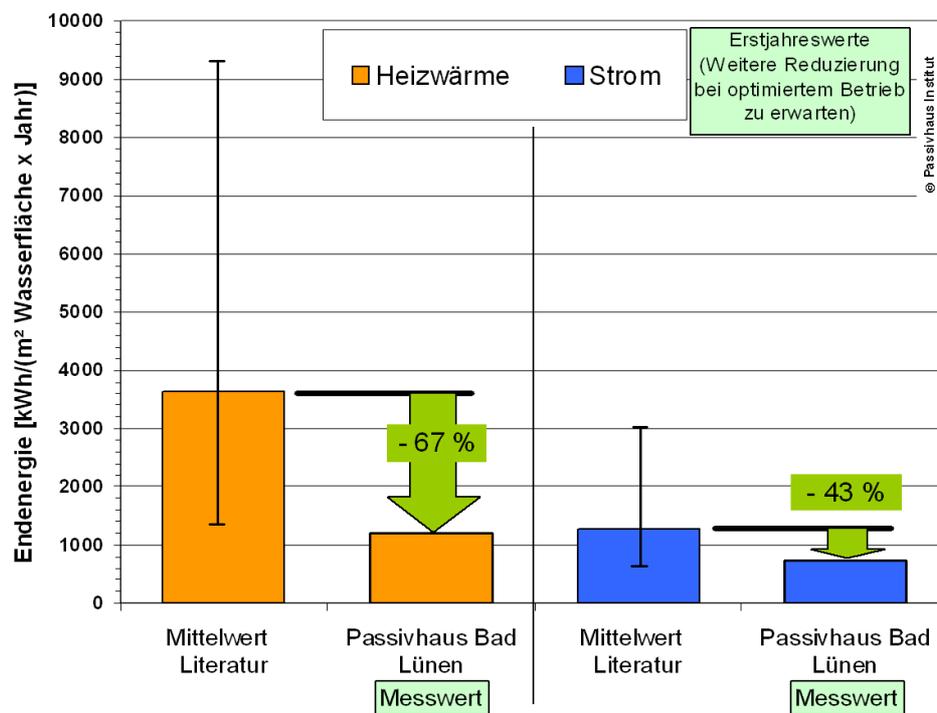


Abbildung 77: Vergleich der gemessenen Verbrauchswerte für den gesamten Wärme- und Strombezug (Endenergie) des Hallenbades Lünen mit Werten aus der Literatur (siehe Text). Die Schwankungsbreite der Literaturwerte ist durch die Größt- und Kleinstwerte (schwarze vertikale Linien) angegeben.

4.8.1 Wärmelieferung

Die Wärmeversorgung des Bades erfolgt - wie in Abschnitt 2.2 beschrieben - aus fünf unterschiedlichen Quellen. Aufgrund der Anordnung der Wärmezähler werden die Bereiche separat erfasst. Die direkte Versorgung mit Wärme des Biogas-BHKWs erfolgt erst nach einem Umbau ab Juni 2012. Die Monatssummen der fünf Bereiche zeigen im Jahresverlauf die Veränderung in Höhe der unterschiedlichen Energiebezugsquellen (Abbildung 78). Zunächst dominiert der Bezug aus dem Fernwärmenetz, später wird der direkte Bezug vom Biogas BHKW dominant.

Der Abgaswärmetauscher des Biogas-BHKWs hat einen deutlich höheren Anteil an der Versorgung als der des Erdgas-BHKWs.

Tabelle 8: Spezifische Endenergiemengen und Anteile der Wärmelieferung nach den unterschiedlichen Quellen im Jahreszeitraum 01.04.1012 bis 31.03.2013.

	Fernwärme	Abgaswärmetauscher		HT-Wärme BHKW Biogas	Gehäuseab- wärme BHKWs (NT-Kreis)
		BHKW Biogas	BHKW Erdgas		
Endenergie [kWh/(m ² a)]	41,3	61,9	24,6	87,5	42,8
Anteil [%]	16,0%	24,0%	9,5%	33,9%	16,6%

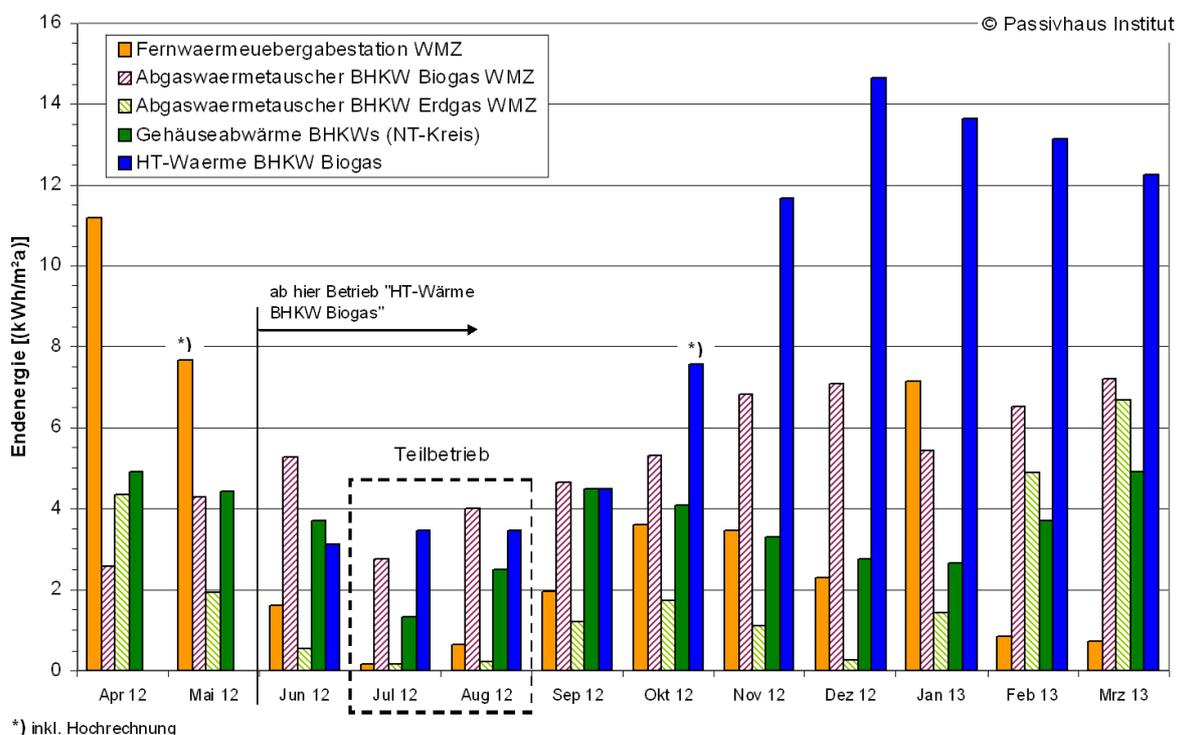


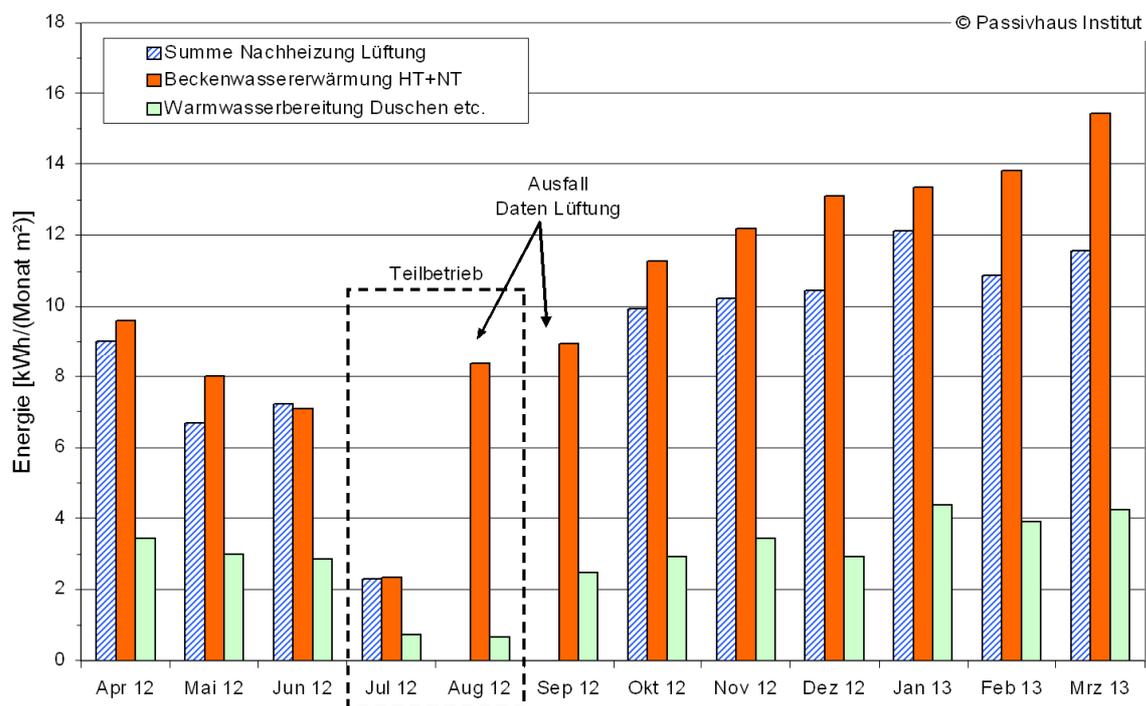
Abbildung 78: Wärmeversorgung aus den unterschiedlichen Quellen im Monatsverlauf von April 2012 bis März 2013.

4.8.2 Wärmeverbrauch

Die Wärmeversorgung der Einzelverbraucher im Hallenbad ist durch die beiden getrennten hydraulischen Versorgungsnetze „HT“ und „NT“ organisiert (vgl. Abbildung 16 in Abschnitt 2.2). Bei der Analyse sind diese beiden Bereiche zu berücksichtigen. Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Monatssummen der Wärmeverbrauchswerte (Lieferung) können - aufgrund der Zähleranordnung - den unterschiedlichen Verbrauchsbereichen zugeordnet werden. Unterschieden wird in die drei folgenden Bereiche:

- Beckenwassererwärmung (123,4 kWh/(m²a))
- Nachheizung Lüftung (Luftbeheizung) (93,7 kWh/(m²a) / inkl. Hochrechnung)
- Warmwasserbereitung (Duschen/Reinigung) (35,0 kWh/(m²a))

Die Jahressumme des Energieverbrauchs zur Luftnachheizung in den Lüftungsgeräten kann für August und September 2012 nicht ermittelt werden, da am Gerät „Nebenräume“ ein Drahtbruch am VL-Sensor des Wärmezählers vorhanden war. Eine Abschätzung lässt sich mit Hilfe der gesamten gelieferten Wärmemenge durch Differenzbildung erstellen ².



**Abbildung 79: Aufteilung der Wärmeverbräuche (Endenergie) nach den drei Nutzungsbe-
reichen Lüftung, Beckenwasser und Duschwasser (April 2012 bis März 2013).**

² Dabei muss der Anteil der Verteilverluste der Wärmelieferung gegenüber der Summe der Wärmeverbraucher berücksichtigt werden. Dieser wird im nächsten Abschnitt zu 2,3 % berechnet.

Es zeigt sich, dass die Beckenwassererwärmung den größten Anteil am Wärmeverbrauch hat. Betrachtet man alle Monate (April 2012 bis März 2013) ohne August und September 2012 ergibt nur für die Beckenwassererwärmung ein Anteil von 47 % an der Gesamtsumme der drei Bereiche. Die Nacherhitzung der Luft folgt mit wenig Abstand mit einem Anteil von 39 %. Dagegen benötigt die Warmwassererwärmung für das Brauchwasser (Duschen / Reinigung) nur 14 %.

4.8.2.1 Bilanz HT-Netz

Im HT-Versorgungsnetz kann aufgrund der Zähleranordnung die Differenz zwischen der Wärmelieferung in das Netz und der Entnahme aus dem Netz berechnet werden. Diese Berechnung dient unter anderem zur Kontrolle der Wärmezähler. Die Übereinstimmung zwischen den beiden Größen liegt prozentual zwischen 95 und 99 % (berechnet aus Tageswerten), die Abweichung für den Winter 2012/2013 ergibt sich zu 2,3 %. Absolut entspricht dies einer Differenz von 72 kWh/Tag. Diese Energiemenge ergibt sich aus der Messgenauigkeit der Wärmezähler sowie der Wärmeabgabe der Rohrleitungen an den Keller.

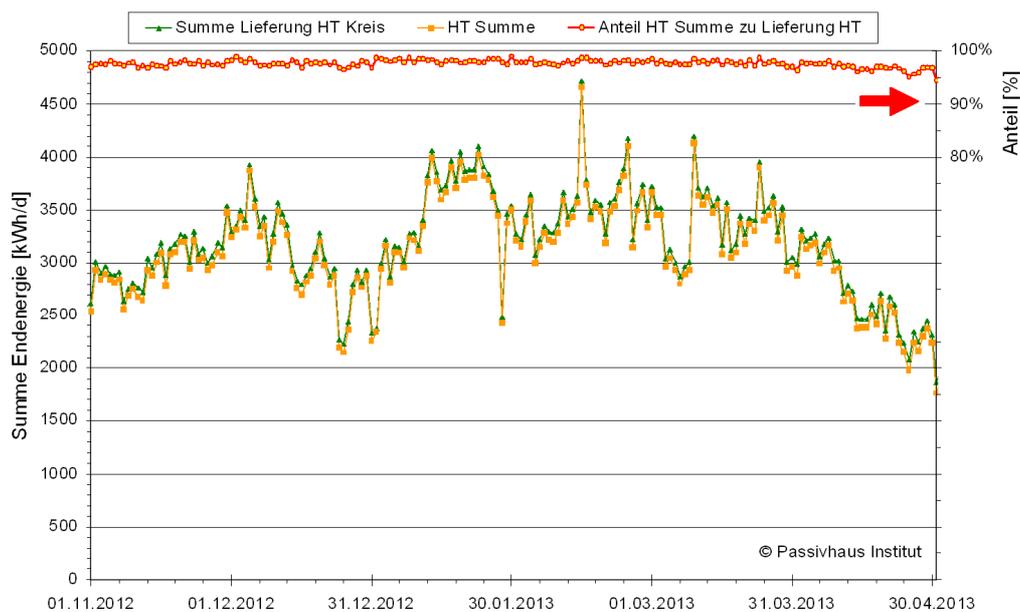


Abbildung 80: Vergleich der Energielieferung und der Entnahme des HT-Netzes im Winterzeitraum vom 01. November 2012 bis zum 30. April 2013 (Tageswerte)

4.8.2.2 Luftheizregister

Die Luftherhitzung ist die einzige aktive Heizquelle im Hallenbad Lünen; auf Fußbodenheizflächen und Wärmebänke konnte vollständig verzichtet werden. Alle sechs Lüftungsgeräte sind mit Luftheizregistern zur Nacherwärmung der Luft ausgestattet. Wie beschrieben sind für die Nacherhitzung der Luft aus dem Umkleebereich vor dem Einblasen in die beiden Duschbereiche zwei weitere Nachheizregister installiert. Die monatlichen Energiemengen dieser insgesamt acht Luft-

Wasser-Register sind in Abbildung 81 dargestellt. Aufgrund der Ausfälle einzelner Wärmehähler sind die Daten ab Oktober 2012 dargestellt.

Ins Auge fällt zunächst der sehr hohe Verbrauch für die Nachheizung von Halle 5 im Dezember 2012 und Januar 2013. Gleichzeitig ist der Verbrauch von Halle 4 entsprechend geringer. Die Ursache liegt in einer fehlerhaft geänderten Regelung der beiden Lüftungsanlagen. Wie sich herausstellte wurde das Gerät für Halle 5 bezüglich der Nachheizung zu dieser Zeit als Hauptgerät betrieben, das Heizregister von Gerät 4 wurde nur ergänzend zugeschaltet. Durch den Luftverbund der beiden Hallen ergaben sich keine Auswirkungen für die Hallenkonditionen. Die Verbrauchswerte für die Nebenräume sind aufgrund von Regelungsfehlern im Oktober und November 2012 deutlich zu hoch ausgefallen.

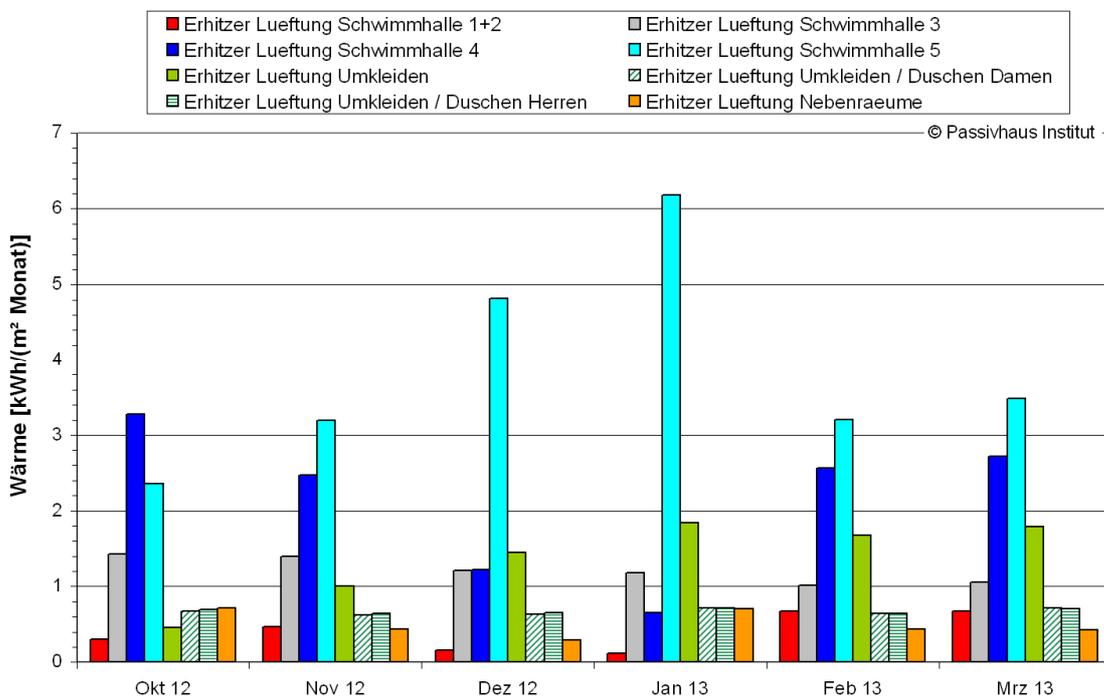


Abbildung 81: Energieverbrauch für die Luftheizregister der Lüftungsgeräte (Monatssummen vom Oktober 2012 bis zum März 2013. Erläuterungen siehe Text.

Erwartungsgemäß ist der Heizwärmeverbrauch der vier Hallen dominant gegenüber den niedriger temperierten Bereichen Nebenräume und Umkleide. Der scheinbar niedrige Verbrauch zur Beheizung von Halle 1+2 wird durch den Heizwärmebeitrag der Wärmepumpe verursacht. In der Gesamtbilanz des Bades wird der Stromverbrauch der WP vollständig auf der Stromseite berücksichtigt. Wie im Abschnitt 4.8.3.1 später ausgeführt wird, kann der Wärmeeintrag durch den Betrieb der Wärmepumpe auf durchschnittlich 220 kWh/Tag (01. Januar bis 30. März. 2013) abgeschätzt werden. Betrachtet man die Summen der einzelnen Monate – wieder bezogen auf die gesamte Energiebezugsfläche des Bades – müssen von Januar bis März 2013 zwischen 1,5 und 2,1 kWh/(m² Monat) Wärme für Halle 1+2 berücksichtigt

werden. Die Wärmeverbrauchswerte in Halle 1+2 erhöhen sich damit in Summe im Januar bis März 2013 auf Werte von 2,2 bzw. 2,3 kWh/(m²a). Sie liegen damit erwartungsgemäß höher als in der kleineren Halle 3 und etwas niedriger als in den deutlich größeren, aber etwas weniger stark aufgeheizten Hallen 4 und 5.

Aufgrund des begrenzten Zeitraumes und der Einregulierungsphase können keine Jahressummen angegeben werden. In den Monaten Februar und März 2013 war die Nachheizung in Halle 4 und 5 wieder richtig eingestellt. Wird in dieser Zeit der Wärmeverbrauch der Hallen inkl. des Wärmeeintrags der Wärmepumpe betrachtet, ergibt sich die folgende Verteilung:

Tabelle 9: Spezifische Endenergiemengen und Anteile der Wärmelieferung für die Luftheizregister der unterschiedlichen Zonen für Februar und März 2013. Anders als in Abbildung 81 ist der Heizwärmeeintrag durch die Wärmepumpe hier gesondert aufgeführt. Bezugsfläche ist auch hier die Energiebezugsfläche von 3912 m².

Heizwärme	Halle 1+2 Luftheizregister	Halle 1+2 Wärmepumpe	Halle 3	Halle 4	Halle 5	Umkleide	Duschen	Nebenzimmer
[kWh/m²] für zwei Monate	1,35	3,10	2,07	5,29	6,70	3,46	2,70	0,87
Anteil [%]	5,3	12,1	8,1	20,7	26,2	13,6	10,6	3,4

Aus der Tabelle ergibt sich als Summe des Heizwärmeverbrauchs aller vier Hallen ein Anteil von 72,4 % gegenüber den restlichen Bereichen des Bades mit 27,6 %. Das bedeutet, dass über 2/3 der Heizwärme des Bades im Februar und März 2013 für die Hallenbereiche benötigt wurden. Außerdem ist zu erkennen, dass der Wärmeeintrag der Wärmepumpe den Großteil des Heizwärmeverbrauchs von Halle 1+2 abdeckt.

4.8.2.3 Becken- und Duschwassererwärmung

Die differenzierte Betrachtung der Beckenwassererwärmung erfolgt durch die drei HT- und die drei NT-Wärmezähler der Beckenwasserwärmetauscher. Diese werden hier jeweils in Summe je Kreislauf betrachtet. Zusätzlich wird der Energieeinsatz für die Warmwasserbereitung der Duschen (inkl. Reinigungszapfstellen) bilanziert.

Der Wärmeverbrauch für Becken 1+2 mit seinen nur 230 m³ Wasserinhalt ist deutlich dominant. Der gemeinsame Kreislauf für Becken 4 und 5 mit einem gesamten Beckenvolumen von 1.231 m³ liegt im Verbrauch deutlich niedriger. Becken 3 (240 m³) hat den geringsten Wärmeverbrauch.

Für die Beurteilung der Verbrauchswerte muss berücksichtigt werden, dass insbesondere die folgenden Einflussfaktoren den Wärmeverbrauch beeinflussen: Wassertemperatur, Wassermenge, Verdunstung in Abhängigkeit der Hallenfeuchte und -temperatur sowie die Wärmequellen im Wasser (Personen) bzw. im Wasserkreislauf (Pumpen, Unterwasserbeleuchtung). Der Versuch der Berücksichtigung dieser unterschiedlichen Einflüsse und damit die Analyse der dargestellten Verbrauchswerte erfolgt im Detail weiter unten im Abschnitt 5.1.1.

Die Jahressummen der spezifischen Verbrauchswerte zur Erwärmung der drei Beckenkreisläufe und der Warmwassererwärmung des Duschwassers erfolgt hier inkl. der Revisionszeit im Sommer. In Tabelle 10 sind die Summen sowie die Anteile zusammengestellt.

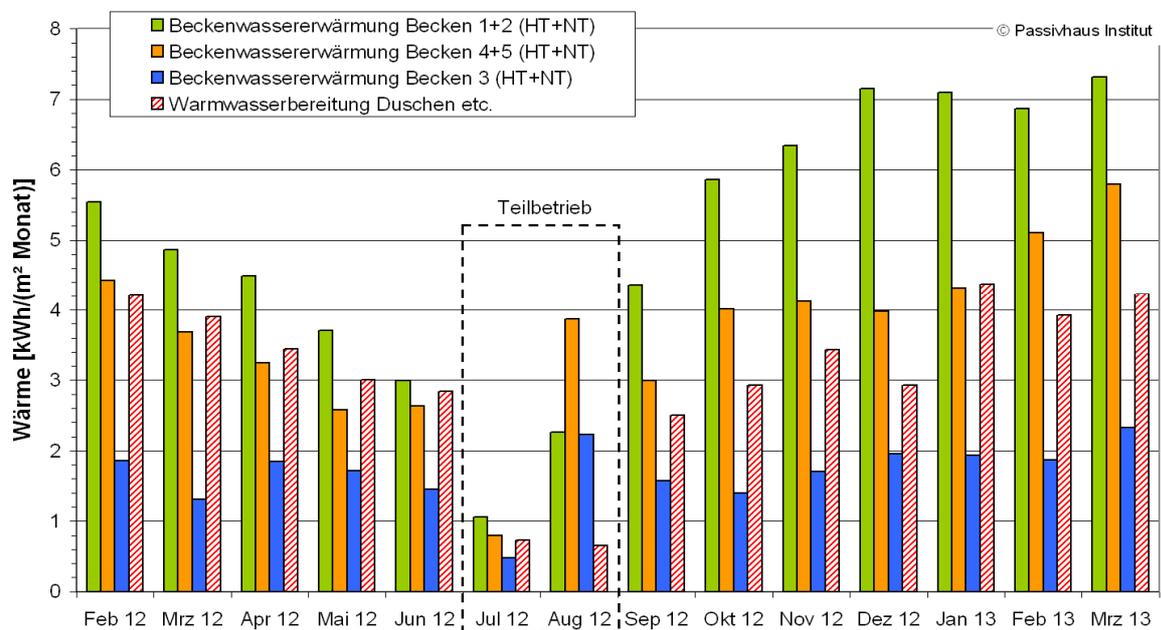


Abbildung 82: Monatliche Wärmemengen zur Becken- und Duschwassererwärmung vom Februar 2012 bis zum März 2013

Tabelle 10: Spezifische Jahres-Endenergiemengen und Anteile am Wärmeverbrauch für die Beckenwassererwärmung sowie der Warmwasserbereitung (Duschen etc.) für den Zeitraum April 2012 bis März 2013. Bezugsfläche ist auch hier die Energiebezugsfläche von 3912 m².

	Becken 1+2	Becken 3	Becken 4+5	Warmwasser Duschen
Wärmeverbrauch [kWh/(m²a)]	59,5	20,5	43,5	35,0
Anteil	37,6 %	12,9 %	27,4 %	22,1 %
Anteil	77,9 %			22,1 %

4.8.3 Stromverbrauch

Wie weiter oben beschrieben wird die Stromversorgung des Bades durch Netzbezug sowie Solarstrom sichergestellt. Die beiden im Außenbereich zusätzlich aufgestellten PV-Tracker liefern ausschließlich an das öffentliche Stromnetz.

In Abbildung 83 sind die spezifischen monatlichen Stromverbrauchswerte dargestellt. Die Monatswerte schwanken in Monaten mit vollständigem Badebetrieb zwischen knapp 12 und knapp 16 kWh/(m²a). Das entspricht absoluten Verbrauchswerten zwischen 46.575 und 61.808 kWh/Monat.

Der Jahresstromverbrauch (April 2012 bis März 2013) des gesamten Bades summiert sich auf insgesamt 155,9 kWh/(m²a), entsprechend absolut 609.873 kWh/a. Davon waren im gleichen Zeitraum 18,6 kWh/(m²a) selbstgenutzter PV-Strom; 1,2 kWh/(m²a) Solarstrom wurden ins öffentliche Netz eingespeist. Die Tracker haben 19.459 kWh/a eingespeist (bezogen auf die Energiebezugsfläche entspricht das 5,0 kWh/(m²a)).

Der monatlich veränderte Ertrag an PV-Strom zeigt den zu erwarteten geringen Solarstromertrag im Winter („Winterloch“) und die maximale sommerliche Solarstromproduktion. Die Solarstromproduktion der PV-Anlage und der Tracker ist gesondert in Abbildung 84 dargestellt. Die Jahressummen des Stromverbrauchs und der Einspeisung sind in Abbildung 85 zusammengestellt.

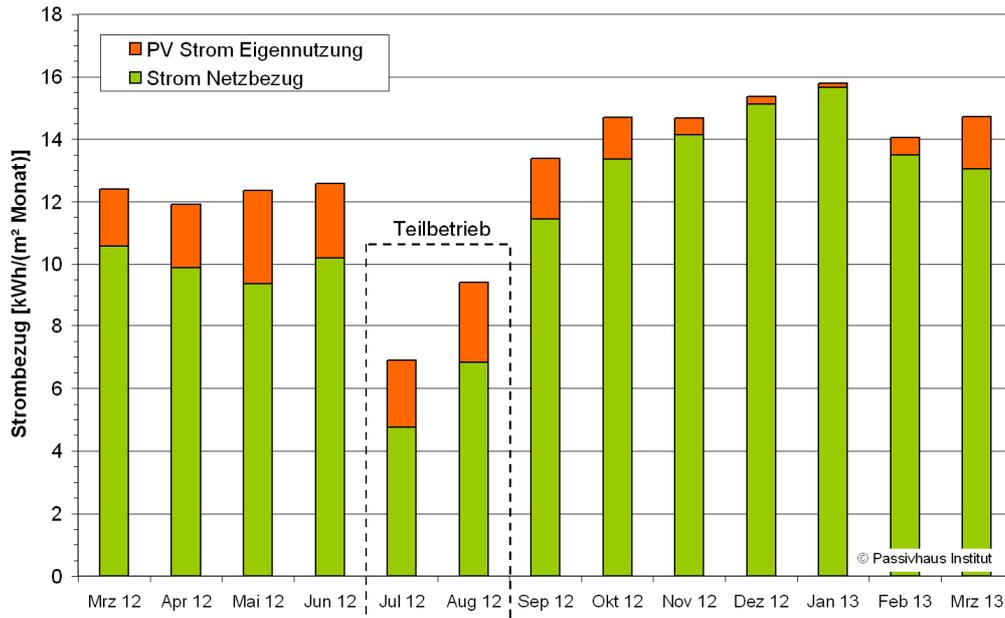


Abbildung 83: Monatliche spezifische Gesamtstromverbräuche des Bades von März 2012 bis März 2013 nach Stromherkunft (Netz und PV)

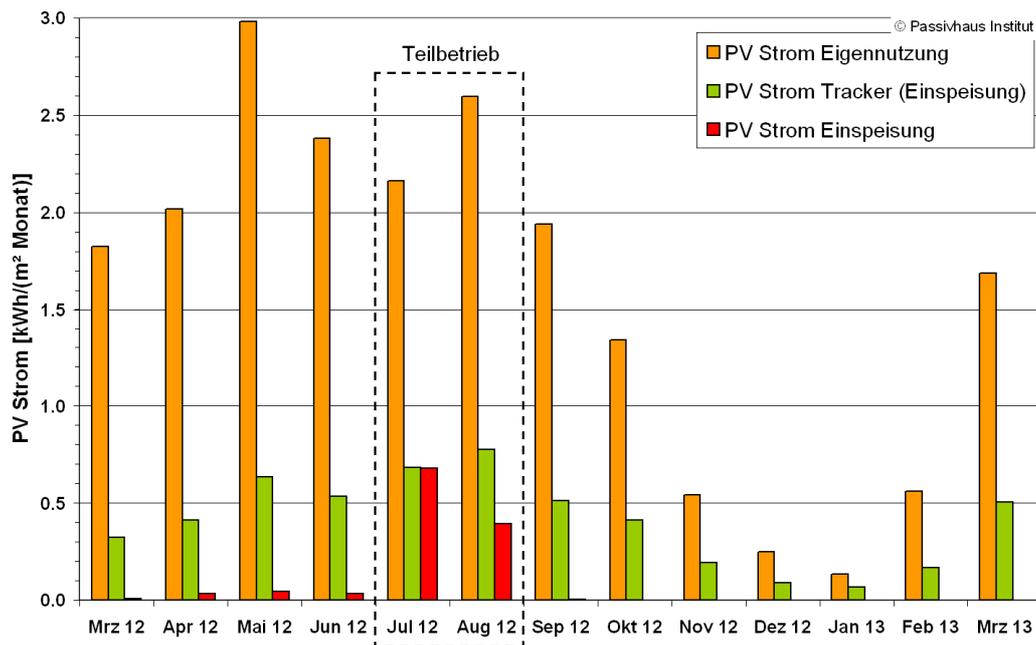


Abbildung 84: Spezifische monatliche Solarstromerträge aufgeteilt nach Quelle und Eigennutzung bzw. Einspeisung

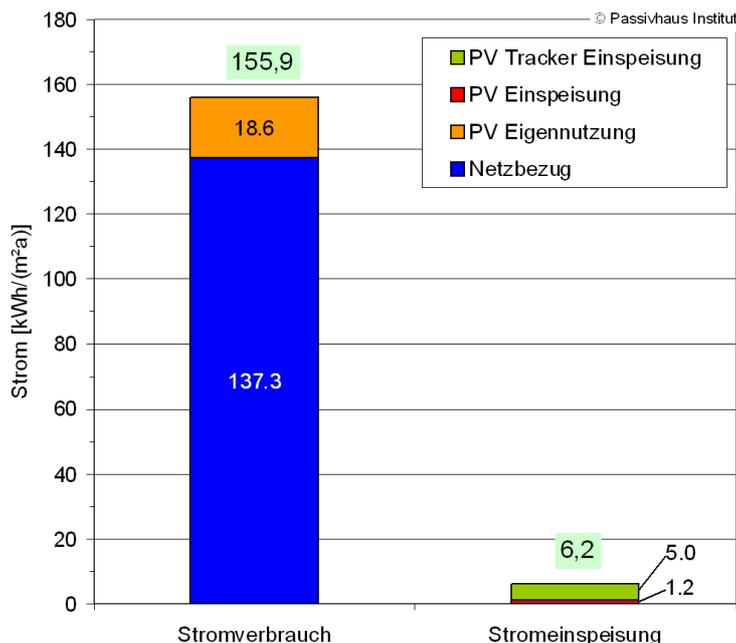


Abbildung 85: Jahressummen der spezifischen Stromverbräuche und der Einspeisung

4.8.3.1 Stromverbrauch nach Teilbereichen

Die einzeln vermessenen Teilbereiche der Stromverbrauchsmessung sind weiter oben in Abschnitt 3.4 erläutert; sie werden hier ausgewertet.

Die Datenaufzeichnung des Teilbereichs „Licht + Steckdosen“ erfolgte vollständig erst ab September 2012 (Aufschaltung auf die GLT). Daher sind die Messwerte für diesen Verbrauchsbereich von April bis Juni 2012 mit den Mittelwerten der Betriebszeit (Sep. 2012 bis März 2013) ergänzt (Abbildung 86). Während der Teilbetriebszeit im Juli und August 2012 wurde der halbe Verbrauchswert angenommen.

Bedingt durch die Änderungen in der Wassertechnik (Filtervergrößerung etc.) sowie an der Betriebsweise einiger Lüftungsanlagen ergeben sich für diese Teilbereiche deutliche Änderungen: Der Bereich „Diverse“ (Schwimmbadtechnik (ohne Umwälzpumpen) sowie alle restlichen Verbraucher des Bades) wächst nach der Revisionszeit bis zum Januar deutlich an; die Lüftungsverbräuche sinken deutlich ab. Durch die Änderungen bei der Durchflussmenge und den Um- bzw. Ergänzungsbauten in den Wasserkreisläufen steigt der Stromeinsatz für die Umwälzpumpen der Wasserkreisläufe ebenfalls deutlich an, von durchschnittlich 2,5 kWh/(m² Monat) auf 4,2 kWh/(m² Monat) nach der Sommerschließung.

Die Beleuchtung hat den entscheidenden Anteil am Stromverbrauch für „Licht + Steckdosen“. Es sind nur einige Steckdosen enthalten, welche u.a. für Reinigungsgeräte genutzt werden, die Beleuchtungssteuerung sowie zwei Uhren und Türensteuerungen. Das Potential der Beleuchtungssteuerung kann im Zusammenhang mit den eingesetzten Leuchtmitteln nicht ausgenutzt werden. Zum Teil wird die Beleuch-

tung manuell geschaltet. Die Verbrauchsdaten zeigen daher auch nicht die erhoffte Reduktion während der helleren Sommermonate. Insgesamt zeigt sich bei Orts-terminen eine gute Tagslichtausnutzung: Viele Stunden ist keine Hallenbeleuchtung notwendig. Die bei dem Bad sehr langen Öffnungszeiten (6:15 Uhr bis zum Teil 21:45 Uhr) führt im Vergleich zu einem höheren Beleuchtungsbedarf. Für Details wären weitere Messungen notwendig.

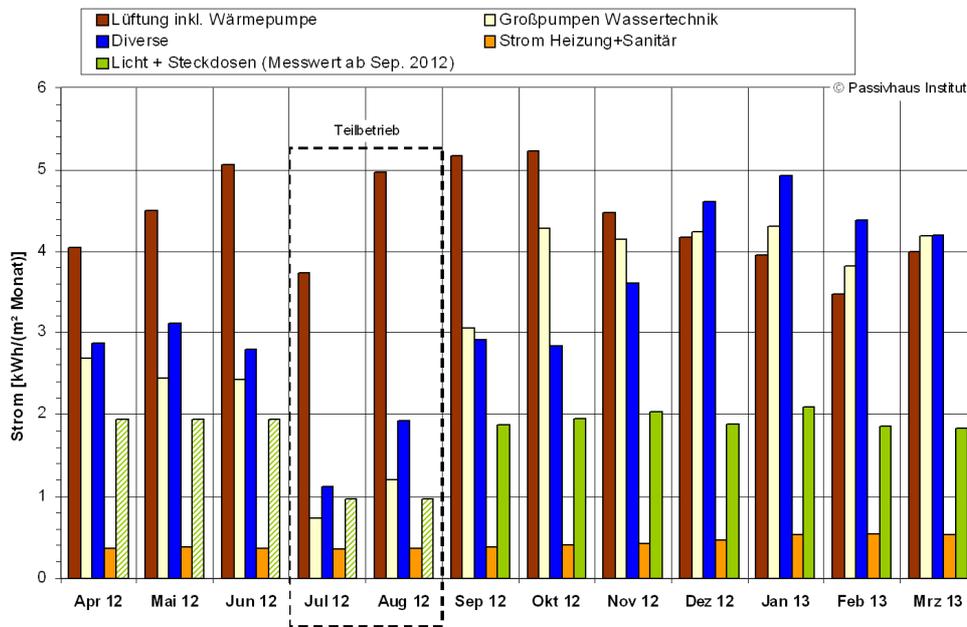


Abbildung 86: Monatliche spezifische Stromverbräuche der Teilbereiche im Hallenbad (April 2012 bis März 2013)

Die Stromverbrauchswerte für ein gesamtes Jahr (April 2012 bis März 2013) in Abbildung 87 zeigen, dass den mit Abstand größten elektrischen Hauptverbraucher die Lüftungstechnik darstellt (34 %). Auch die Umwälzpumpen der Wassertechnik verbrauchen mit 24 % des Gesamtverbrauchs einen großen Teil der elektrischen Energie.

Während der Berechnung aus der Planungszeit wurde vom Fachplaner für den Bereich Heizung/Sanitär ein Erwartungswert von 5,8 kWh/(m²a) angesetzt. Die Messdaten zeigen mit etwas abweichender Technik und inkl. dem Minderverbrauch während der Revisionszeit einen etwas geringeren Wert von 5,1 kWh/(m²a). Für die sechs Umwälzpumpen wurde dagegen ein Planungswert von 29,7 kWh/(m²a) angesetzt, real wurden 37,6 kWh/(m²a) verbraucht. Mit den zusätzlichen Filtertechniken in den Beckenwasserkreisläufen ist der Druckverlust und damit der Stromverbrauch deutlich gegenüber der Planung angestiegen. Würde der gemessene Pumpenstromverbrauch der ersten drei Monate für das ganze Jahr hochgerechnet werden, ergäbe sich trotz aller Änderungen mit nur 29,6 kWh/(m²a) der Planungswert. Weitere Ausführungen zum Vergleich der Stromverbräuche mit den Planungsdaten finden sich in Abschnitt 5.1.4.

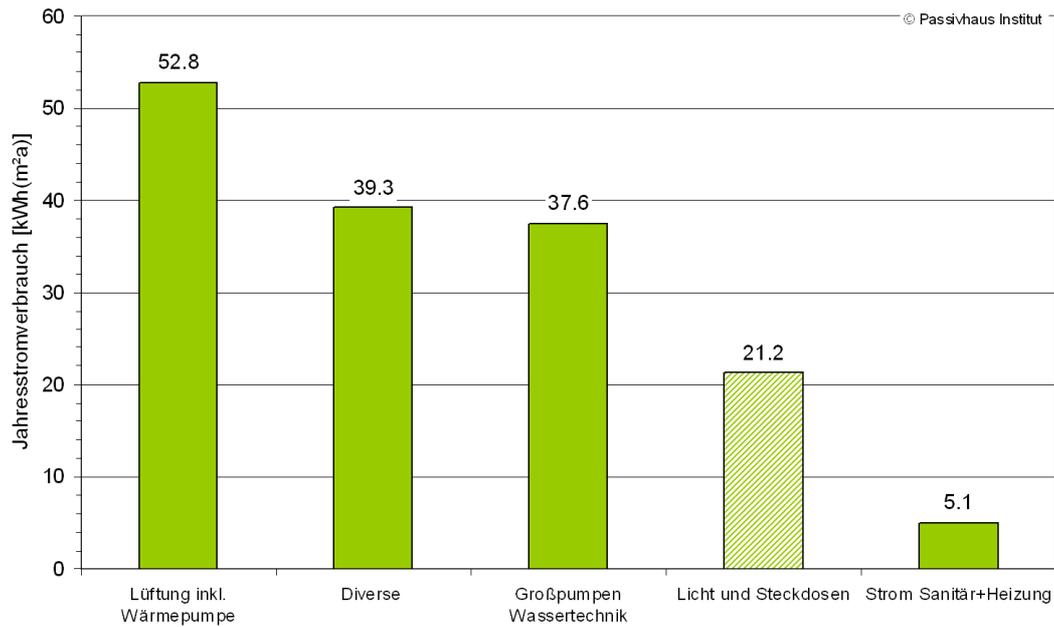


Abbildung 87: Spezifische Jahresstromverbrauchswerte der fünf Hauptbereiche (April 2012 bis März 2013). Die Messung vom Bereich „Licht und Steckdosen“ wurde für die Gesamtjahresberechnung mit Daten ergänzt (vgl. Abbildung 86).

Lüftung

Der Stromverbrauch der sechs Lüftungsanlagen des Bades wird getrennt je Anlage gemessen. In Anlage 1+2 ist eine Wärmepumpe montiert, welche der Fortluft (nach der Wärmerückgewinnungseinheit) Energie entnimmt und diese an den Zuluftvolumenstrom vor dem Nachheizregister überträgt.

Die Stromverbräuche der Anlagen werden hier zur einheitlichen Darstellung und dem besseren Vergleich jeweils auch immer auf die gesamte Fläche (EBF = 3.912 m²) des Gebäudes bezogen.

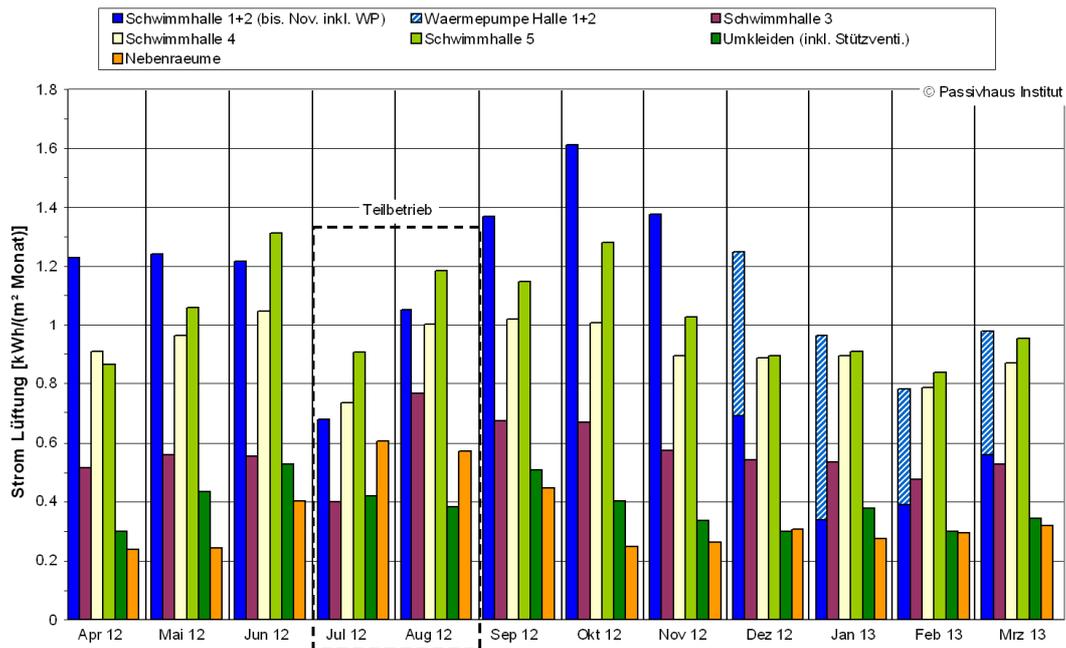


Abbildung 88: Monatliche spezifische Stromverbräuche aller sechs Lüftungsanlagen (April 2012 bis März 2013)

Betrachtet man die Größe des Außenluftvolumenstroms im Vergleich zum Umluftvolumenstrom als Summe aller sechs Lüftungsgeräte des Bades ergibt sich das folgende Bild:

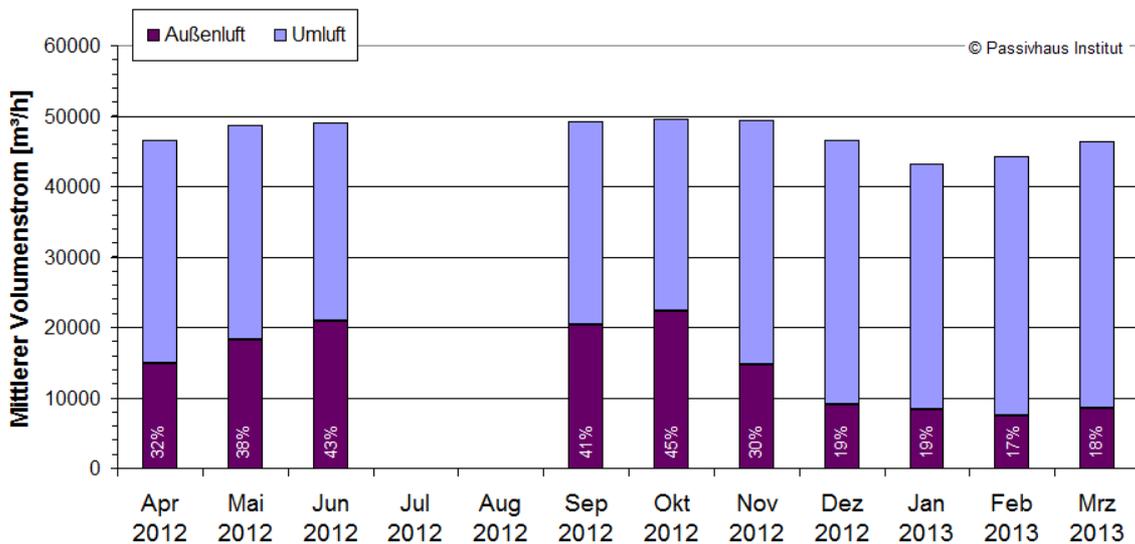


Abbildung 89: Summe der gemessenen monatsmittleren Außen- und Umluftvolumenströme aller sechs Lüftungsgeräte. Der Außenluftanteil beträgt im Mittel 30% der Umluftanteil 70%. Hier besteht ein erhebliches Stromeinsparpotential.

In Abbildung 89 ist zu erkennen, dass der Umluftvolumenstrom aller Geräte des Hallenbades im Mittel etwa 70% beträgt, der Außenluftvolumenstrom nur 30% der

Gesamtzuluftmenge. Nur Letzterer ist für den Feuchteabtransport aus den Hallen und für die Einhaltung der Luftqualität notwendig. Der Umluftvolumenstrom dagegen, ist weder für den Abtransport der Feuchte noch für den Abtransport der Schadstoffe (z.B. THM und Trichloramin) notwendig. Er soll die Durchmischung der Hallenluft sicherstellen, wozu auch geringere Umluftvolumenströme bei entsprechenden Lüftungssystemen ausreichend sind (vgl. Auswertung der Nebelversuche in Abschnitt 4.5.5). Damit zeigt sich, dass noch ein großes Potential bei der Einsparung von Strom für die Lüftungsgeräte vorhanden ist. Ziel des Passivhaus Konzeptes für Hallenbäder ist eine Betriebsweise vollständig ohne Umluftanteil [Schulz et al. 2009].

Wärmepumpe

Aufgrund der hohen Enthalpie der Fortluft bei einem Schwimmbadlüftungsgerät hat der Einsatz einer Fortluftwärmepumpe (WP) zur Erwärmung der Zuluft bzw. des Beckenwassers energetisch hohes Potential (vgl. [Schulz et al. 2009]). Mit geringem Stromeinsatz kann auf diesem Weg die Fortluftenthalpie „rückgewonnen“ werden, anstatt die benötigte Wärme aus einer anderen Quelle direkt zu beziehen. Ob eine WP energetisch vorteilhaft ist, hängt von ihrer Arbeitszahl und der Effizienz des alternativen Heizsystems ab. Ziel ist es dabei durch den Einsatz einer WP Primärenergie einzusparen. Wenn eine WP die Arbeitszahl von z.B. 5 erreicht und für elektrischen Strom eine Primärenergiekennzahl von üblichen 2,6 angesetzt wird, müsste das alternative Heizsystem einen PE-Kennwert von maximal $2,6 / 5 = 0,52$ erreichen. Das bedeutet, dass bei z.B. dem Einsatz von konventionellem Erdgas (PE-Faktor 1,1) der Einsatz einer WP energetisch vorteilhaft ist.

Im Lippe-Bad Lünen ist im Lüftungsgerät der Halle 1+2 eine Fortluftwärmepumpe integriert. Der Stromverbrauch dieser Wärmepumpe wird seit 15.11.2012 separat aufgezeichnet und weist Tagesverbrauchswerte zwischen 36 und 84 kWh/Tag auf. In Abbildung 90 ist die Abhängigkeit des Stromverbrauchs von der Außentemperatur und vom Außenluftvolumenstrom erkennbar. Auf Basis der vorhandenen Messdaten können dennoch bisher keine belastbaren Berechnungen zur Arbeitszahl der Wärmepumpe gemacht werden, da sich die mit der WP erzeugten Wärmemenge unter den vorhandenen Randbedingungen nicht verlässlich ermitteln lässt. Im Rahmen des Monitorings wurden erste überschlägige Abschätzungen gemacht: Hierfür wurde die Wärmeabgabe an die Zuluft mittels der Temperaturdifferenz vor und hinter dem Kondensator, sowie dem gemessenen Zuluftvolumenstrom berechnet. Da die Temperaturmessungen jedoch mit Unsicherheiten behaftet ist (unvollständige Kalibrierung der Sensoren im Lüftungsgerät, Störung durch Abstrahlung des Nachheizregisters bzw. des Kondensators sowie ungleichmäßiger Durchströmung des Lüftungsrohres etc.), musste der Temperaturmesswert manuell korrigiert werden um ein plausibles Ergebnis zu erhalten. Die auf diese Weise überschlägig abgeschätzte mittlere Arbeitszahl der WP liegt im Mittel (Januar bis April 2013) in der Größenordnung um 3, wobei auf Grund der Betriebsweise Schwankungen der Tagesmittel zwischen ca. 1 und 6 auftraten. Der Erwartungswert einer Jahresarbeits-

zahl zwischen 5 bis 7 wird damit deutlich unterschritten. Genauere Analysen zum Thema stehen noch aus. Zunächst sollen Versuchsreihen durchgeführt werden um die Wärmeerzeugung der WP genauer bestimmen zu können. Falls sich die bisherige Auswertung bestätigen sollte, sind in Zusammenarbeit mit dem Hersteller Verbesserungspotentiale auszuarbeiten und umzusetzen, damit die Enthalpierückgewinnung mittels WP, sowohl im Lippe-Bad als auch in zukünftigen Projekten effizienter erfolgen kann.

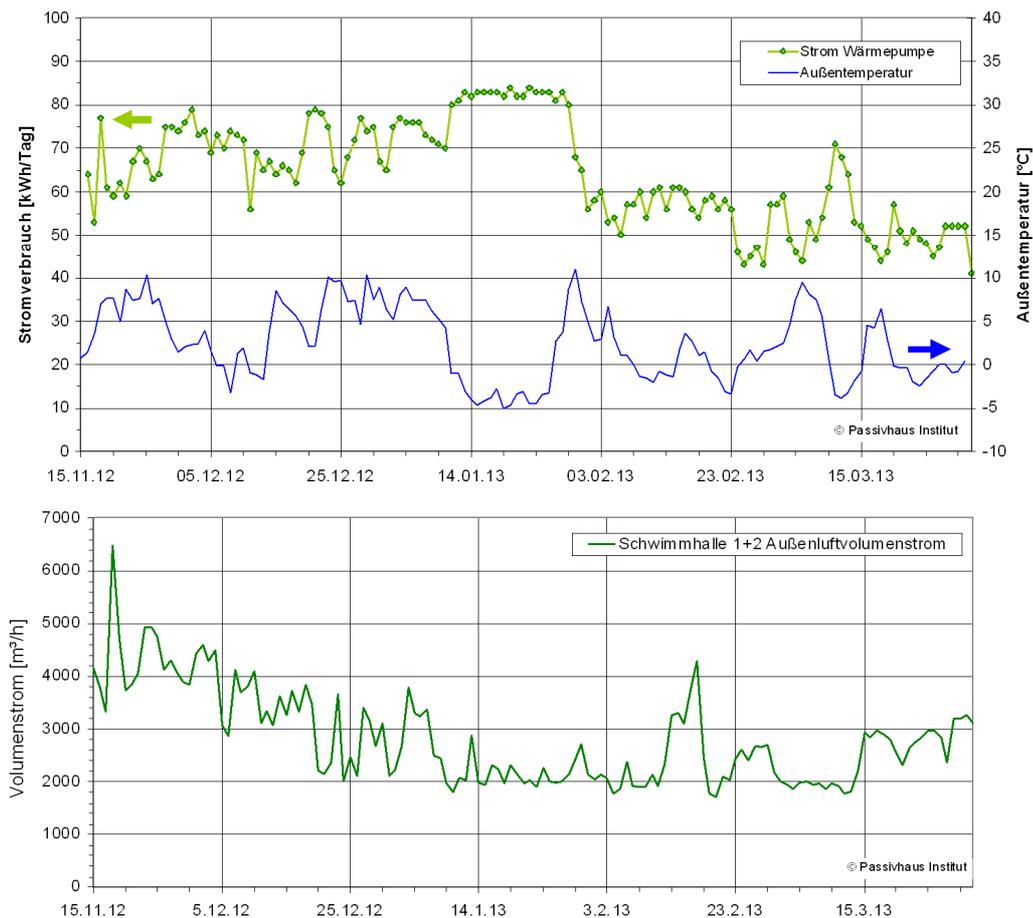


Abbildung 90: Stromverbrauch der Wärmepumpe im Lüftungsgerät von Halle 1+2 und Außenlufttemperatur sowie (unten) der Außenluftvolumenstrom des Gerätes vom 15.11.2012 bis zum 30.3.2013 (Tageswerte)

4.8.4 Stromverbrauch und Durchfluss Beckenwasserkreisläufe

Die sechs Umwälzpumpen der Beckenwasserkreisläufe werden dauerhaft betrieben. Nur für die Filtrerrückspülung wird der Volumenstrom regelmäßig unterbrochen. An der Durchflussmessung der Beckenwasserkreisläufe ist das Betriebsverhalten ablesbar, und erkennbar wann Filtrerrückspülungen durchgeführt wurden (Abbildung 91).

Der elektrische Stromverbrauch für diese sechs Umwälzpumpen wird - wie beschrieben - gesondert gemessen. Er ist abhängig vom Druckverlust des Systems mit den Rohrleitungen und unterschiedlichen Wasserfiltern sowie vom Volumen-

strom. Mit den Messdaten kann der spezifische elektrische Aufwand pro Kubikmeter Wasser für den Betrieb der Kreisläufe berechnet werden. Die Ergebnisse liegen je nach Wasserkreislauf und Betrachtungszeitraum zwischen 0,048 und 0,070 kWh/m³ (Tabelle 11). Aufgrund der gegenüber der Planung erhöhten Umwälzleistungen bei unveränderter Pumpentechnik, können die Pumpen nicht im optimalen Betriebspunkt betrieben werden. Daher sind die spezifischen Werte nicht optimal und würden bei erneuter Auslegung noch besser ausfallen.

Tabelle 11: Spezifischer Stromverbrauch³ zur Beckenwasserumwälzung in unterschiedlichen Zeiträumen und Volumenstrom bei Normalbetrieb (inkl. Rückspülunterbrechung)

Spez. Stromverbrauch Umwälzung			
[kW pro m³/h]	Becken 1+2	Becken 3	Becken 4+5
26.03.2013	0,067	0,068	0,050
27.03.2013	0,068	0,066	0,051
28.03.2013	0,067	0,068	0,048
24.3. bis 01.05.2013	0,067	0,070	0,049
Volumenstrom bei Normalbetrieb (ohne Rückspülung)			
[m³/h]	124	54	217

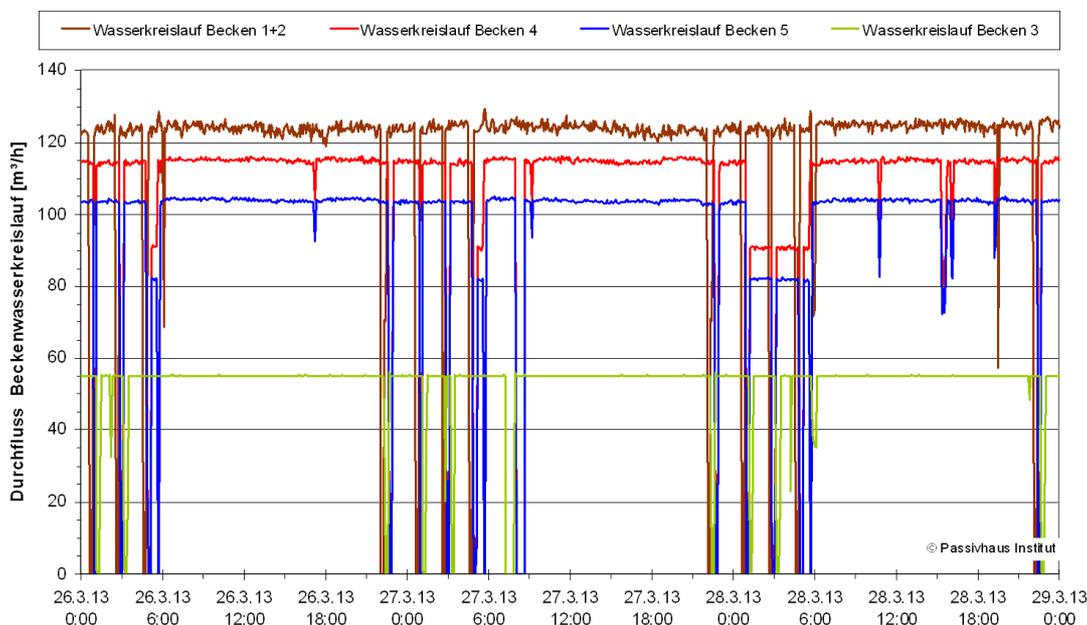


Abbildung 91: Durchfluss der 4 Wasserkreisläufe vom 26. bis zum 28.03.2013 (5-Minuten Daten)

³ Nachträglich wurden in den Beckenwasserkreisläufen zusätzliche Kornkohlefilter nachgerüstet, womit zusätzliche Druckerhöhungspumpen notwendig wurden. Der Stromverbrauch dieser Druckerhöhungspumpen sowie der Pumpen im Nebenstrom der Wärmeübertrager zur Beheizung der Kreisläufe konnten bei dem Stromverbrauch nicht berücksichtigt werden.

Um Energieeffizienz bewerten zu können, ist es sinnvoll, die benötigte Energie auf die angebotene Dienstleistung zu beziehen. Die Dienstleistung im Bereich der Badewasseraufbereitung ist die Bereitstellung von sauberem Wasser für z.B. ein 50 m-Sportbecken. Für eine Bewertung der Energieeffizienz ist es hilfreich eine geeignete Bezugsgröße auszuwählen:

Sauberes Wasser bereit zu stellen kann auf unterschiedlichem Wege geschehen. Mittels der Norm DIN 19643 wird ein bestimmtes Umwälzvolumen zur Wasserreinigung festgelegt. Dabei werden Beckenart und -größe berücksichtigt. Zusätzlich geht in die Berechnung des Umwälzvolumens die realisierte Filterart mittels des sogenannten „k-Faktor“ ein. Allen Filterarten wird der k-Faktor 0,5 zugeordnet; eine Ausnahme stellt nur die Ultrafiltration (UF) mit dem k-Faktor von 1 dar. Da der k-Faktor in der entsprechenden Formel im Nenner steht wird bei der UF nur die Hälfte des Umwälzvolumens benötigt. Die im Betrieb eines Bades tatsächlich gefahrenen Umwälzmengen können von diesen Rechenwerten abweichen. Gerade bei der UF liegen Erfahrungen vor, welche zeigen dass das berechnete Umwälzvolumen zu gering ist. Der k-Faktor sollte bei diesen Anlagen eher bei 0,7 als bei 1 liegen. Der k-Faktor ist in der Norm [DIN 19643] erläutert.

Um die Stromverbrauchswerte der Umwälzpumpen von Beckenwasserkreisläufen unterschiedlicher Bädern – unabhängig von der Filtertechnik und dem tatsächlich gefahrenen Umwälzvolumenstrom – miteinander vergleichen zu können, schlägt das PHI folgendes vor: Der Stromverbrauch zum Betrieb der Umwälzpumpen (oder auch der gesamte Stromverbrauch für die hygienisch notwendige Wasseraufbereitung) sollte immer auf das mit dem k-Faktor von 0,5 berechnete Umwälzvolumen bezogen werden. Die Ermittlung ist also recht einfach: Der Stromverbrauch wird geteilt durch die Anzahl der Stunden (Messzeit) und durch den für das Becken mit $k = 0,5$ berechneten Umwälzvolumenstrom. Es ergeben sich Vergleichswerte in der Einheit kW pro m^3/h .

Tabelle 12: Spezifischer Stromverbrauch⁴ zur Beckenwasserumwälzung an zwei Beispieltagen bezogen auf das berechnete Umwälzvolumen mit dem k-Faktor 0,5 bei Normalbetrieb.

Spez. Stromverbrauch Umwälzung			
[kW pro m^3/h]	Becken 1+2	Becken 3	Becken 4+5
Bezugsgröße: Berechneter Umwälzvolumenstrom mit k-Faktor = 0,5	130 m^3/h *	75 m^3/h	290 m^3/h
26.03.2013	0,061	0,048	0,036
27.03.2013	0,062	0,046	0,035

*) Ohne Zuschläge für Attraktionen und Massagedüsen

⁴ Siehe Fußnote Nr. 3 auf der vorherigen Seite.

4.9 End- und Primärenergie

Für die endgültige energetische Bewertung des Gebäudes ist es notwendig, eine Primärenergiebilanz zu erstellen, d.h. die Art der Wärmebereitstellung zu berücksichtigen. Dazu wird der Endenergiebedarf mit Primärenergiefaktoren (PE-Faktoren) gewichtet. Die PE-Faktoren wurden bereits für den vorausgehenden Projektbericht [BGL 2011] festgelegt; sie werden unverändert übernommen. Zur Erläuterung wird im Folgenden ein Abschnitt aus dem Bericht zitiert:

„Im Gebäude des Schwimmbades befinden sich zwei Blockheizkraftwerke, von denen eines mit Biogas und eines mit Erdgas betrieben wird. Die BHKWs sind Teil des Fernwärmenetzes der Stadt Lünen, für welches aufgrund eines hohen Anteils regenerativer Energien ein sehr niedriger Primärenergiefaktor von 0,17 ermittelt wurde (vgl. [Wibera 2010]). Das Bad bezieht einen Teil der benötigten Wärme aus dem Fernwärmenetz.“

Da im Bad ein hoher Bedarf an Niedertemperaturwärme besteht, kann sowohl Kondensationsabwärme der BHKWs (Brennwertnutzung) als auch Abwärme aus dem Aufstellraum der BHKWs genutzt werden. Die Nutzung dieser Abwärme ist ausschließlich in Verbindung mit dem Bad möglich. Daher wird der Primärenergiefaktor für diese Abwärme zu Null angesetzt. Der Primärenergiefaktor für Strom wird den Regelungen der aktuellen Energie-Einsparverordnung (EnEV) entsprechend mit 2,6 angenommen.“

Da bei dieser Berechnung des PE-Faktors die notwendige elektrische Hilfsenergie für z.B. die Pumpen des NT-Kreislaufs nicht berücksichtigt wurde, wird die Energie bei dieser Auswertung beim Gesamtstromverbrauch bilanziert. Werden der gesamte jährliche Strom und Wärmeverbrauch summiert, ergibt sich ein Endenergieverbrauch des Hallenbades von 414,0 kWh/(m²a) (Abbildung 92). Aufgrund der extrem günstigen PE-Faktoren reduziert sich der Wärmeverbrauch auf einen minimalen Wert (21,9 kWh_{PE}/(m²a)). Dominant ist der Stromverbrauch, welcher vom Endenergiewert 155,9 kWh_{End}/(m²a) auf primärenergetisch 405,3 kWh_{PE}/(m²a) ansteigt. Dabei ist der gesamte im Gebäude verbrauchte Strom bilanziert - unabhängig von seiner Herkunft. Insgesamt ergibt sich damit ein Primärenergieverbrauch von **427,2 kWh_{PE}/(m²a)** für das Hallenbad. Während der Planung wurde ein Primärenergiebedarf von 391 kWh_{PE}/(m²a) – allerdings ohne den realisierten Umluftbetrieb der Lüftungsanlagen – abgeschätzt (siehe [BGL 2011] Seite 104). Die Ansätze während der Planung unterschieden sich an vielen Punkten von der realisierten technischen Ausstattung und insbesondere der Betriebsweise. Daher sind zur Zeit der Primärenergiebedarf und der Primärenergieverbrauch NICHT direkt mit einander vergleichbar. Es besteht noch Potential durch weitere Optimierung der Betriebsweise den Energieverbrauch zu senken (Ausführungen im Bericht).

Der auf dem Gelände des Hallenbades produzierte PV-Strom kann vollständig mit dem verbrauchten Strom verrechnet werden: Der auf dem Haus bzw. Grundstück produzierte PV-Strom verdrängt konventionellen Strom aus dem Netz. Dem nicht

erneuerbaren Anteil von Solarstrom wird nach [Gemis] ein PE-Faktor von 0,3 angerechnet. Eine Möglichkeit der primärenergetischen Berücksichtigung für den im Netz verdrängten Strom ist den anrechenbarer PE-Faktor für den erzeugten PV-Strom wie folgt zu berechnen: $2,6 - 0,3 = 2,3$. Nach Abbildung 93 werden die insgesamt erzeugten $24,8 \text{ kWh}_{\text{End}}/(\text{m}^2\text{a})$ PV-Strom damit primärenergetisch zu $56,9 \text{ kWh}_{\text{PE}}/(\text{m}^2\text{a})$. Diese erzeugte Menge kann vom Primärenergie-Gesamtverbrauch abgezogen werden. Dieser reduziert sich damit auf $427,2 - 56,9 = 370,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

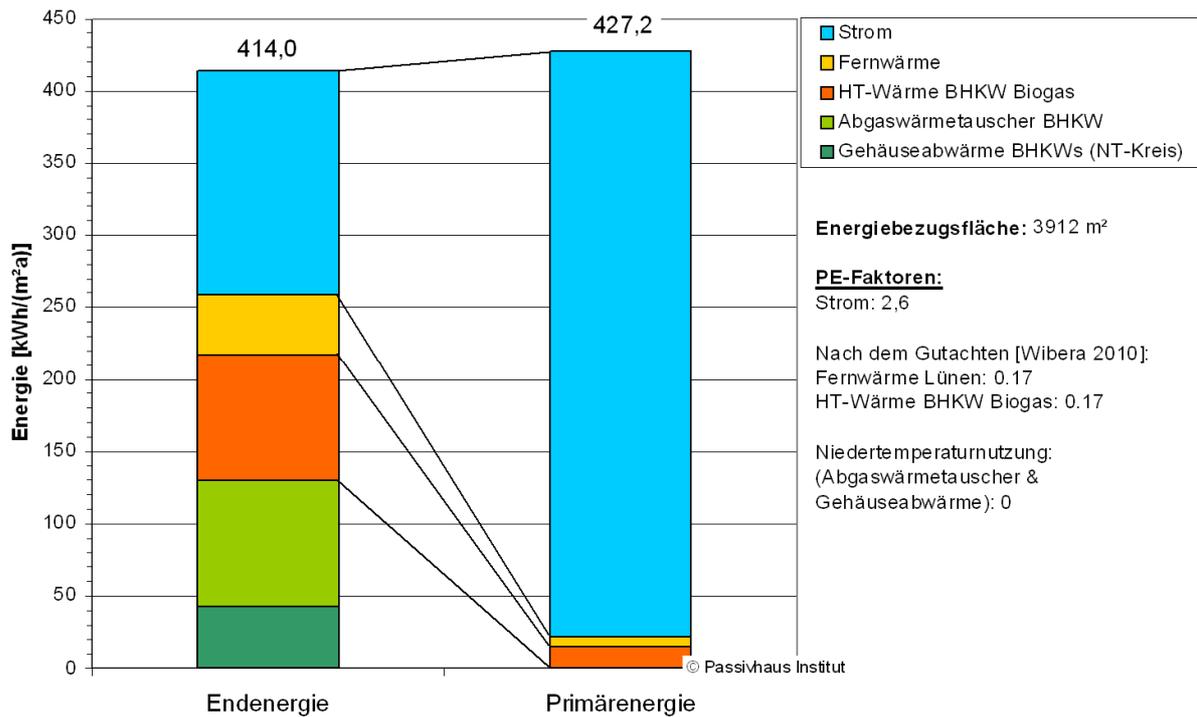


Abbildung 92: Endenergieverbrauch und daraus berechneter Primärenergieverbrauch aller Energieaufwendungen des Lippe-Bades im Bilanzjahr April 2012 bis März 2013. Informationen zu den PE-Faktoren sind dem Text zu entnehmen. Der erzeugte PV-Strom wird in dieser Verbrauchsdarstellung nicht berücksichtigt.

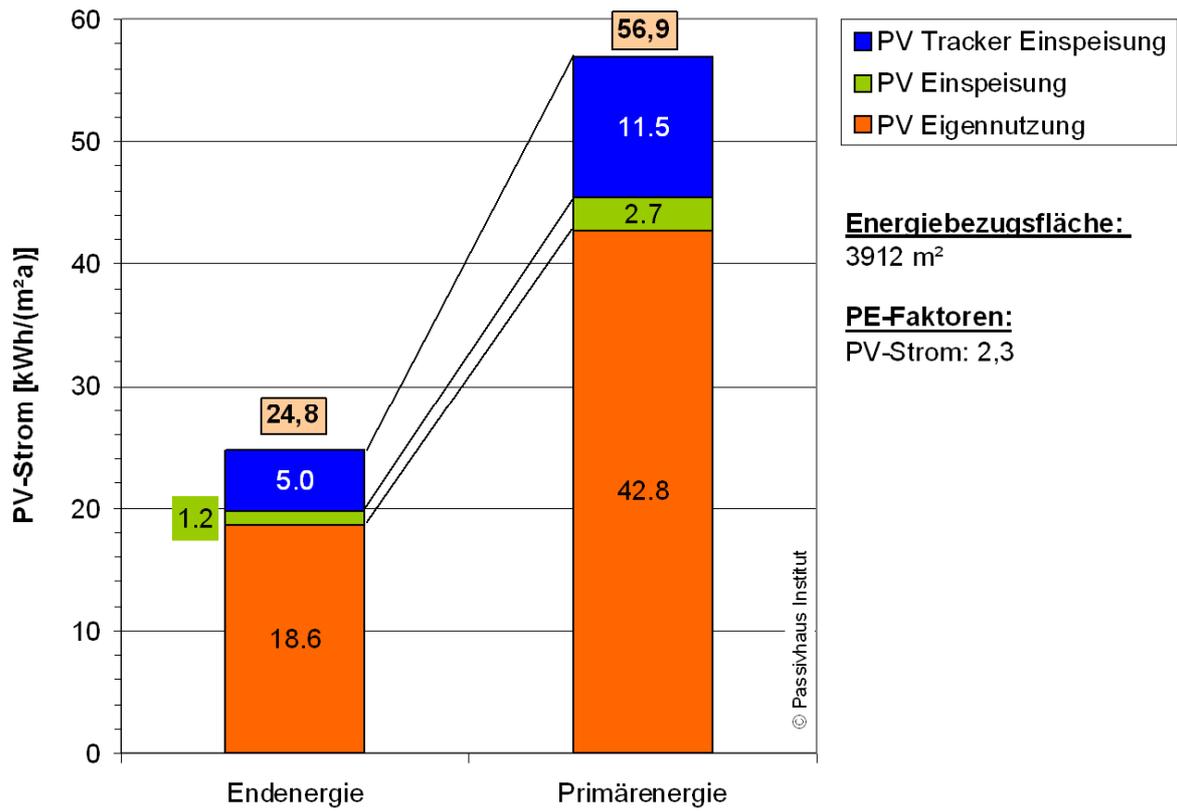


Abbildung 93: Jährliche Solarstromproduktion auf dem Gebäude bzw. mit den PV-Trackern auf dem Gelände (Bilanzjahr April 2012 bis März 2013). Die Werte sind zur Vergleichbarkeit wieder auf die Energiebezugsfläche des Hallenbades bezogen.

5 Optimierung durch Energiebilanzierung

Die Möglichkeit, bereits während der Planungsphase den Energiebedarf eines Gebäudes verlässlich voraussagen zu können, ist eine grundlegende Voraussetzung um hohe Energieeffizienz erreichen zu können. Sie ermöglicht die Optimierung einzelner Komponenten sowie des ganzheitlichen Gebäudekonzeptes. Die Energieströme in einem Hallenbad sind auf Grund vieler Wechselwirkungen und Regelungen sehr komplex und daher nur schwer erfassbar. Um die Energieeffizienz einschätzen und verbessern zu können, war ein wesentlicher Bestandteil der Forschungs- und Beratungsleistungen während der Planung des Lippe-Bades die Erstellung einer Energiebedarfsrechnung (vgl. [Schulz et al. 2009] und [BGL 2011]). Hierzu wurde im Wesentlichen das Passivhaus Projektierungspaket (PHPP) für die Energieströme in einem Bad angepasst und erweitert, inklusive mehrerer Temperaturzonen, verschiedener Lüftungsstrategien und Becken- sowie Warmwassererwärmung. Die Berechnungen dieser stationären Energiebilanz auf Monatsbasis wurden für spezifische Fragestellungen mit dynamischen Simulationen auf Stundenbasis verglichen und ergänzt. Verwendet wurde hierfür die vom PHI eigens entwickelte Software [DYNBIL]. Dynamische Simulationen sind zeitaufwändig und auf Grund der vielen Eingabeparameter oft fehleranfällig. Prinzipiell ermöglichen sie eine detaillierte Aussage zum thermischen und auch dem hygrischen Verhalten und Energiekennwerten von Gebäuden, jedoch sind sie vor dem Hintergrund ihrer Komplexität wenig für den alltäglichen Planungs- und Optimierungsprozess geeignet. Im Falle des Lippe-Bades stimmen die Ergebnisse der dynamischen Simulation und des angepassten PHPP gut überein, womit sich das vereinfachte stationäre Berechnungsverfahren prinzipiell für die Energiebedarfsberechnung auch von komplexen Schwimmbädern qualifiziert. Jedoch sind weitere Validierung und Aufarbeitung der Dateneingabe für den ungeschulten Nutzer notwendig, bevor das Tool verbreitet eingesetzt werden kann.

Das PHPP ist im Wesentlichen eine stationäre Energiebilanz auf Monatsbasis in der monatlich angepasste Randbedingungen (Außenklima) angesetzt werden. Die Dateneingabe erfolgt möglichst vereinfacht, so dass Parameter für die eine monatliche Aufschlüsselung nicht notwendig sind mit Mittelwerten als konstant angenommen werden (z.B. die internen Wärmequellen und der Luftwechsel). Im speziell entwickelten Schwimmbad-PHPP wurden die Berechnungen erweitert und ein Verfahren entwickelt mit dem die Zusammenhänge in der Schwimmhalle besser abbilden zu können. Je nach Außenfeuchte und Feuchtequellen im Raum wird ein mittlerer Luftwechsel zur Entfeuchtung berechnet. Es kann zudem zwischen unterschiedlichen Betriebsweisen während und außerhalb der Öffnungszeiten unterschieden werden. Weitere Ergänzungen wurden im PHPP durchgeführt um die Beckenwassererwärmung unter den eingegebenen Randbedingungen berechnen zu können. Es wird davon ausgegangen, dass im Bad über das ganze Jahr hinweg nur eine Betriebsweise realisiert wird.

Allen in [BGL 2011] veröffentlichten Berechnungen des Lippe-Bades liegen Annahmen für verschiedene Teilbereiche zu Grunde. Für manche Aspekte mussten Abschätzungen getroffen werden, da zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht alle Planungsdetails feststanden (z.B. Strombedarf der Schwimmbadtechnik). Bei anderen Aspekten hingegen war eine genaue Parameterbestimmung schlicht nur beschränkt möglich, da keine verlässlichen Messwerte aus anderen Projekten vorlagen (z.B. die zu erwartenden Verdunstungsmengen und Enthalpieverluste). Ein detaillierter Vergleich der aus dem Monitoring vorliegenden Verbrauchsdaten mit der Energiebilanz ermöglicht nun eine Überprüfung und somit Bestätigung/Präzisierung der getroffenen Annahmen. Auf diese Weise kann das angepasste PHPP als Projektierungswerkzeug für Schwimmbäder validiert und erweitert werden und dann verlässlich für die Beurteilung weiterer Energieeinsparpotentiale im Lippe-Bad sowie in zukünftigen Projekten verwendet werden.

5.1 Vergleich: Messdaten und berechneter Endenergiebedarf

Die Energieströme in einem Hallenbad hängen stark von der realisierten Betriebsweise ab. Für die Projektierung des Bades wurde eine energiesparende Nutzung angenommen, die bisher aus unterschiedlichsten Gründen nur zum Teil umgesetzt werden konnte. Eine Übereinstimmung der in [BGL 2011] vorausgesagten und erreichten Energiekennwerte ist daher nicht zu erwarten. Dennoch ist der direkte Vergleich von Interesse, da er aufzeigt, an welcher Stelle Abweichungen aufgetreten sind. Der vorab berechnete Gesamtendenergiebedarf (Wärme + Strom) wurde mit $550 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBFA}})$ bilanziert. Die Messungen des ersten Jahres ergeben trotz abweichender (tendenziell ungünstigerer) Betriebsbedingungen einen Verbrauchswert von nur $412 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBFA}})$. Die bilanzierten und gemessenen Werte (März 2012 bis einschließlich April 2013) sind in Abbildung 94 im Vergleich dargestellt, unterteilt in drei Teilbereiche – Raumheizung, Wassererwärmung und Strom. Der größte Unterschied ist unverkennbar im Bereich der Wassererwärmung, während die Verbrauchswerte für die Raumbeheizung und die Stromverbraucher gut zu den projektierten Werten passen.

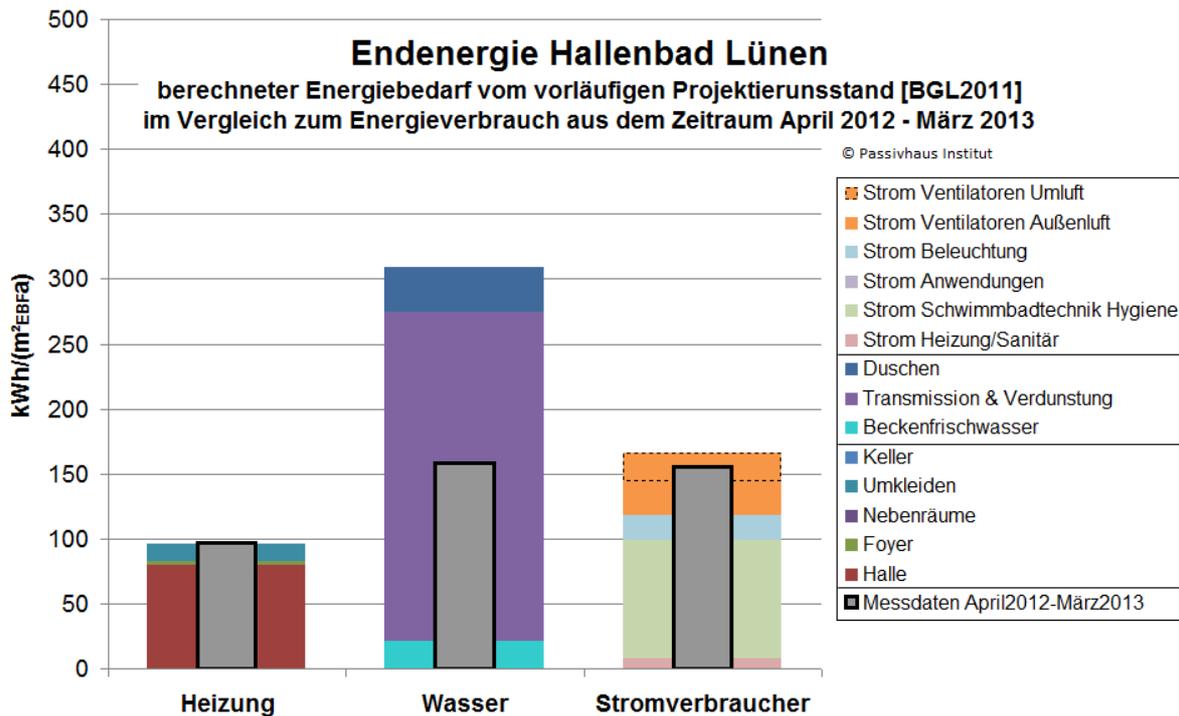


Abbildung 94: Die berechnete Endenergie aus der ursprünglichen Energiebilanz des Lippe-Bades (Stand: September 2011. Quelle: [BGL 2011]) im direkten Vergleich mit den Messwerten (abweichende Betriebsbedingungen) aus dem Zeitraum April 2012 bis einschließlich März 2013. Es handelt sich um spezifische Werte mit Bezug auf die Energiebezugsfläche.

Da die Betriebsweise des Lippe-Bades während des Monitorings nicht konstant war, ist ein Vergleich der berechneten und gemessenen Jahreswerte für eine weiterführende Analyse der Abweichungen nicht zielführend. Stattdessen wurden Teilbereiche aus Zeiträumen mit verlässlichen Daten und konstanter Betriebsweise ausgewählt und die entsprechend gemessenen Randbedingungen in der Energiebilanz nachgeführt. Die entsprechende Auswertung der Messdaten und die daraus folgenden Erkenntnisse sind in den folgenden Textabschnitten im Einzelnen für die Teilbereiche Beckenwassererwärmung, Raumheizung, Strom und Trinkwarmwasser erläutert.

5.1.1 Beckenwassererwärmung

Nach den Bedarfsrechnungen während der Planungsphase des Bades ist die Beheizung des Beckenwassers der größte Endenergieverbraucher (siehe Abbildung 94). Diese Voraussage wurde vom Monitoring bestätigt (vgl. Abschnitt 4.8.2 zum gemessenen Energieverbrauch der verschiedenen Teilbereiche) zur Aufteilung des gemessenen Wärmeverbrauchs), wenn auch nicht im selben Ausmaß. Die Messwerte liegen deutlich niedriger als erwartet, daher ist eine genaue Betrachtung der Energieströme für die Beckenwassererwärmung von besonderem Interesse.

Die Beckenwassererwärmung wird durch folgende Einflussfaktoren bestimmt:

- Erwärmung der benötigten **Frischwassernachspeisung**:
30 Liter pro Badegast hygienischer Bedarf nach Norm bzw. Wasserverluste durch notwendige Filterrückspülungen und sonstige Wasserausträge z.B. durch Verdunstung oder nasse Badegäste
- Nacherhitzung der **Netto-Wärmeverluste**:
Wärmeverluste durch z.B. Verdunstung, Transmission und Konvektion *abzüglich* Wärmegewinne durch z.B. Schwimmer, Pumpentechnik und Transmission und Konvektion

Die einzelnen Faktoren der entsprechenden Energiebilanz enthalten viele Unsicherheiten, die den berechneten Heizwärmebedarf erheblich beeinflussen. Insbesondere die Wärmeverluste auf Grund der Verdunstung sowie die Wärmegewinne durch Personen und Schwimmbadtechnik sind schwer abschätzbar. Beide Parameter hängen stark vom Nutzerverhalten und der Betriebsweise des Bades ab (Badezeit, Schwimmstil, Beckenwasser- und Hallenluftbedingungen etc.), die nur zum Teil durch das Monitoring erfasst werden können. Bei einigen wesentlichen Einflussfaktoren besteht Unklarheit bezüglich der anzusetzenden Annahmen, so z.B. für die Verdunstungsmengen und den entsprechenden, dem Wasser zuzuordnenden Wärmeverlust. Auch die typische mittlere Wärmeabgabe von Schwimmern bzw. Badegästen an das Wasser ist nicht genau bekannt.

Aus dem Monitoring sind die Frischwassermengen und der Heizwärmeverbrauch pro Beckenkreislauf bekannt, sowie Wassertemperaturen an verschiedenen Punkten in den jeweiligen Kreisläufen, die Umwälzmengen sowie die Frischwassertemperatur am Eintritt in das Gebäude. Für die Wasserbilanz wird außerdem die Wassermenge der Filterspülwasseraufbereitung separat aufgezeichnet. Eine Auswertung dieser Daten soll, soweit möglich, Aufschluss über die Eignung der getroffenen Annahmen in der Energiebilanz geben.

Der **Frischwasserbedarf** (Nachspeisung im laufenden Badbetrieb) wird üblicherweise durch die benötigten Wassermengen für die regelmäßige Filterspülung dominiert. Ein im Vergleich kleiner Zusatzbedarf entsteht durch Wasserverluste wie z.B. Verdunstung oder Austrag durch Badegäste. Um die benötigten Wassermengen im Badbetrieb zu reduzieren und gleichzeitig auch an Heizbedarf zu sparen, wurde im Lippe-Bad eine Aufbereitung des Filterspülwassers geplant, mit der ca. 70 % des benötigten Filterspülwassers dem Beckenkreislauf erhalten bleiben und nur ca. 30 % durch kaltes Frischwasser nachgespeist werden müssen. Nach [VDI 2089] müssen aus hygienischen Gründen im Mittel 30 Liter Frischwasser pro Badegast bereit gestellt werden – eine Filterwasseraufbereitung bringt nur einen energetischen Vorteil, solange dieser Wert nicht unterschritten wird. Abbildung 95 zeigt die gemessenen monatlichen Frischwassermengen im Vergleich zu den projektierten Werten. Die geplante Filterspülwasseraufbereitung war im betrachteten Zeitraum aus

technischen Gründen nicht in Betrieb. Die Übereinstimmung der monatlichen Frischwassermengen bis Juni 2012 mit der Bedarfsabschätzung ohne Filterwasseraufbereitung ist akzeptabel (der Verbrauch liegt im Mittel ca. 19 % höher). Während der temporären Teilschließung für Revisionszwecke im Juli und August sinken die Werte nachvollziehbar ab. Danach ist der Frischwasserverbrauch für alle drei Kreisläufe höher als zuvor und liegt nun im Mittel 76 % über der Erwartung. Die Erhöhung ist auf eine Umrüstung der Filtertechnik zurück zu führen, bei der unter Anderem die Filtertechnik angepasst und die Filterflächen vergrößert wurden. Es ist geplant, die Filtertechnik zukünftig zu optimieren und auch die Filterspülwasseraufbereitung in Betrieb zu nehmen. Ausgehend von der ursprünglichen Projektierung liegt das Einsparpotential bei ca. 1.700 m³/Monat, also 80 % Reduktion gegenüber den aktuellen Verbrauchswerten. Reduzierte Frischwassermengen sind nicht nur im Sinne der Wassereinsparung erstrebenswert, sondern auch wegen der einhergehenden Reduktion der Heizenergie zur Erwärmung bis auf Beckenwassertemperatur.

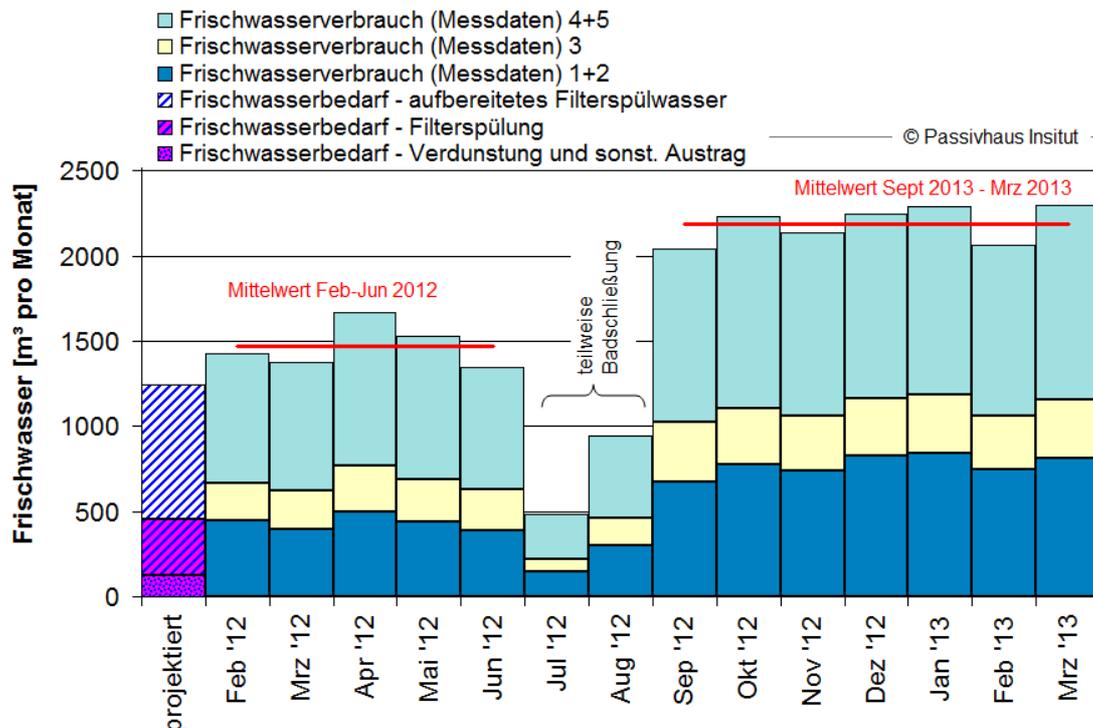


Abbildung 95: Frischwassermenge – Der angesetzte Bedarfswert für die Summe aller Kreisläufe im Vergleich zu den gemessenen monatlichen Verbräuchen der drei Kreisläufe seit Februar 2012.

Den Erwartungen zu Folge müsste bei einem real erhöhten Wasserverbrauch auch der **Heizenergieverbrauch** höher liegen, jedoch entspricht dies nicht den Beobachtungen. Wie in Abbildung 96 erkennbar, liegt der Heizwärmeverbrauch im Mittel des Messzeitraums deutlich niedriger als ursprünglich projektiert. Auch sind die Verbrauchsanteile der Beckenkreisläufe am Gesamtheizverbrauch anders als erwartet. Trotz höchstem Frischwasserverbrauch und größten Wasseroberflächen ist der Heizwärmeverbrauch für die beiden Sportbecken (4+5) in der Praxis niedriger als

für das viel kleinere und wärmere Eltern-Kind-Becken (1+2). Die hier gezeigten Zahlen sind *nicht* direkt vergleichbar, da die realisierten Temperaturen und Luftfeuchten in der Halle nicht den geplanten Randbedingungen entsprachen. Zur näheren Betrachtung der Heizwärme für die Beckenwassererwärmung und Ursachenanalyse der Abweichungen zwischen den projizierten und gemessenen Werten wurden die verschiedenen Einflussfaktoren bei gegebenen Randbedingungen näher betrachtet.

Hinweis: Für die Temperatur des Frischwassers liegen erst ab Mitte August 2012 verlässliche Daten vor. Temperaturen für die restlichen Monate des ausgewerteten Jahres wurden mittels Anpassung einer Sinuskurve an die vorhandenen Messdaten abgeschätzt. Es ergibt sich eine jahresmittlere Temperatur von 13,3 °C, also ca. 3 °C über der angesetzten Frischwassertemperatur der Projektierung für das Referenzklima.

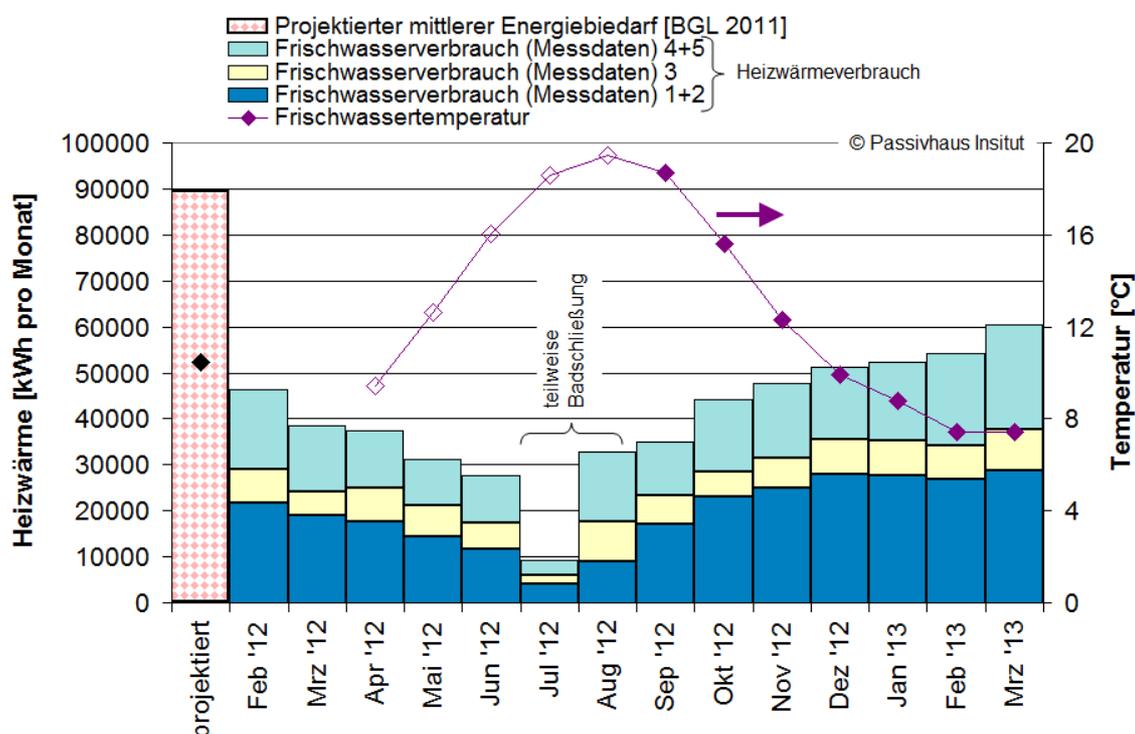


Abbildung 96: Monatlicher Heizwärmebedarf und -verbrauch für die drei Beckenkreisläufe, sowie die monatlich gemessene Frischwassertemperatur (leere Rauten = Hochrechnung). Der Verbrauch ist deutlich niedriger als erwartet, trotz höherem Frischwasserverbrauch. Allerdings liegen andere Randbedingungen vor, als bei der Projektierung.

5.1.1.1 Verdunstung

Den Erwartungen zufolge machen die Wärmeverluste durch Verdunstung den Großteil der notwendigen Beckenwassererwärmung aus. Die zu erwartende Verdunstungsmenge $M_{D,B,u/b}$ in kg/h entspricht nach [VDI 2089]:

$$M_{D,B,u/b} = \frac{\beta}{R_D \cdot \bar{T}} \cdot (p_{D,W} - p_{D,L}) \cdot A_B$$

β	Stoffübergangskoeffizient [m/h]
R_D	spezifische Gaskonstante für Wasserdampf [J/(kgK)]
\bar{T}	Mittelwert der Beckenwasser- und Lufttemperatur [K]
$p_{D,W}$	Sättigungsdruck bei Beckenwassertemperatur [Pa]
$p_{D,L}$	Dampfdruck der Hallenluft [Pa]
A_B	Beckenwasserfläche [m ²]

Die Höhe der tatsächlichen Verdunstung wird maßgeblich durch den Stoffübergang β bestimmt, welcher jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Für die Auslegung der Lüftungsgeräte (Spitzenlast) wurden in der Energiebilanz während der Planungsphase auf Basis der [VDI 2089] Stoffübergangskoeffizienten angesetzt. Diese Kennwerte wurden in der ursprünglichen Energiebilanz übernommen, auch wenn es sich hierbei um Spitzenwerte handelt, nicht um Mittelwerte im Badbetrieb – damit liegen die Berechnungen auf der sicheren Seite. Wie bereits in [Schulz et al. 2009] (Seite 23) beschrieben, sind in der Praxis mittlere Verdunstungsmengen von ca. 50 % des nach VDI berechneten Wertes zu erwarten. Auf Basis der Messdaten können diese Kennwerte nun pro Becken überprüft und in der Energiebilanz angepasst werden. Eine direkte Messung der Verdunstung aus dem Beckenwasser ist im laufenden Betrieb nicht möglich. Die Größenordnung kann jedoch über die erbrachte Entfeuchtungsleistung der Hallenbelüftung berechnet werden: Bei konstanter Innenraumfeuchte entspricht die Differenz der zugeführten Feuchte (Zuluft) und der entnommenen Feuchte (Abluft) den Feuchtequellen im Raum. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass die gesamte berechnete Entfeuchtungsleistung ihren Ursprung in Verdunstung von Beckenwasser hat. Für die Energiebilanz wird zudem davon ausgegangen, dass die entsprechende Verdunstungsenthalpie zu 100% dem Beckenwasser entnommen wird und nicht der Hallenluft. In der Praxis tritt ein Teil der Verdunstung sicherlich außerhalb der Becken auf z.B. von Wassertropfen/-pfützen, die sich durch Wasseraustrag der Badegäste auf dem Boden bilden, durch Verdunstung auf der Haut von nassen Gästen oder von Handtüchern, Schwimmequipment etc. Insbesondere bei starker Wasserbewegung und Tropfenbildung ist auch davon auszugehen, dass die benötigte Verdunstungsenthalpie der umgebenden Luft entnommen wird anstelle dem Beckenwasser. Weitere Unsicherheiten entstehen durch Feuchteein- und -austräge in der jeweiligen

Halle z.B. während der Bodenreinigung oder bei Luftaustausch mit anderen Räumen (Türöffnungen) sowie durch Regelungen der Luftmenge, die nicht für die Entfeuchtung benötigt werden (z.B. regelmäßige Kalibrierung der Lüftungsgeräte, bei welcher kurzzeitig 100 % Außenluft in die Halle eingebracht wird). Auch die Unsicherheiten in der Messung selbst können an dieser Stelle zu einer Verschiebung der Ergebnisse führen⁵. Um den Effekt berücksichtigen zu können, dass nicht die gesamte aus den Lüftungsdaten berechnete Entfeuchtungsleistung ihren Ursprung in der Beckenwasserverdunstung hat, wird der Rechenwert pro Becken mit einem pauschalen Korrekturfaktor reduziert. Wie hoch der tatsächliche Anteil in der Praxis ist, lässt sich nicht genau bestimmen und kann von Halle zu Halle abweichen. Als Annahme wurden in den Vergleichsrechnungen für die Beckenwassererwärmung Reduktionsfaktoren zwischen 0,5 und 1 angesetzt (siehe 5.1.1.5). Für den verbleibenden Verdunstungsanteil, welcher nicht dem Beckenwasser angerechnet wird, muss die notwendige Verdunstungsenthalpie ihren Ursprung an anderer Stelle haben z.B. der Hallenluft. Dieser Effekt sollte sich in den Messdaten der Heizwärme der einzelnen Hallen widerspiegeln. Die entsprechende Analyse erfolgt in Kapitel 5.1.2.

In Tabelle 13 sind die in der ursprünglichen Energiebilanz angesetzten Werte den aus dem Monitoring berechneten mittleren Stoffübergangskoeffizienten gegenübergestellt. Während der Ruhezeiten liegen die Messwerte im Bereich von 60 bis 100 % von den Werten nach dem Ansatz in Anlehnung an die VDI, also in vertretbarer Übereinstimmung in Anbetracht der Unsicherheit der Berechnung. Tagsüber entspricht die berechnete Verdunstungsmenge im Mittel je nach Becken 20 bis 40 % der Auslegung. Die berechneten Stoffübergänge liegen zwischen 7 und 11 m/h. Die Korrelation der VDI von stärkerer Verdunstung bei tieferen Becken kann mit den vorliegenden Daten nicht bestätigt werden. Schwankungen des Stoffübergangs können durch verschiedenste Einflussfaktoren verursacht werden, insbesondere durch die Beckennutzung, Hallenfeuchte und das Temperaturniveau (Hallenluft zu Beckenwasser). Abbildung 97 zeigt ein Beispiel für die berechnete stundenmittlere Entfeuchtungsleistung im Tagesverlauf im Vergleich zur Beckenbelegung. Zusätzliche Grafiken mit der berechneten Entfeuchtungsleistung im Zeitverlauf sind im Abschnitt 8 (Anhang) aufgeführt.

Für ein besseres Verständnis wurden für alle Becken die Daten von Zeiträumen mit möglichst konstanten Randbedingungen (Hallenfeuchte, Luft- und Beckenwassertemperatur) ausgewertet und der Einfluss auf die Verdunstung untersucht. Die berechneten mittleren Stoffübergänge aller Becken sowie die berechnete spezifische Entfeuchtungsleistung (= Verdunstung) pro Quadratmeter Beckenoberfläche unter verschiedenen Randbedingungen sind in Abbildung 98 und Abbildung 99 dargestellt. Die berechneten Entfeuchtungsleistungen liegen im Bereich von 0,07 bis

⁵ Es werden an dieser Stelle Daten von Standard-Sensoren der Hersteller im Lüftungsgerät verwendet, die vom PHI zwar auf Plausibilität geprüft, aber nicht abschließend kalibriert wurden. Eine solche Kalibrierung ist für die Fortsetzung der Messung geplant.

0,19 kg/(m²_{Beckenfläche}·h). Tendenziell ist, wie zu erwarten, eine Absenkung bei höheren Temperaturdifferenzen zwischen Hallenluft und Beckenwasser, sowie bei höheren Hallenfeuchten erkennbar.

Tabelle 13: Übersicht der Stoffübergangskoeffizienten β [m/h] für die Berechnung der Verdunstung. Die Werte nach Lüftungsauslegung der VDI 2089 sind den Werten gegenübergestellt, die im Mittel aus dem Monitoring hervorgehen.

Stoffübergangskoeffizient β [m/h]	Energiebilanz Planungsphase		Berechnung aus mittlerer Entfeuchtungsleistung über die Hallenlüftung	
	Badebetrieb	Nacht	Badebetrieb	Nacht
Eltern-Kind & Warmbecken	40	6,3	9,7 [24%]	5,7 [92%]
Lehrschwimmbecken (mit Hubboden)	28	6,3	7,6 [27%]	4,0 [64%]
Sportbecken 4 (Nichtschwimmer)	34,5	6,3	7,0 [20%]	4,7 [74%]
Sportbecken 5 (Altbau)	28	6,3	11 [39%]	6,4 [101%]

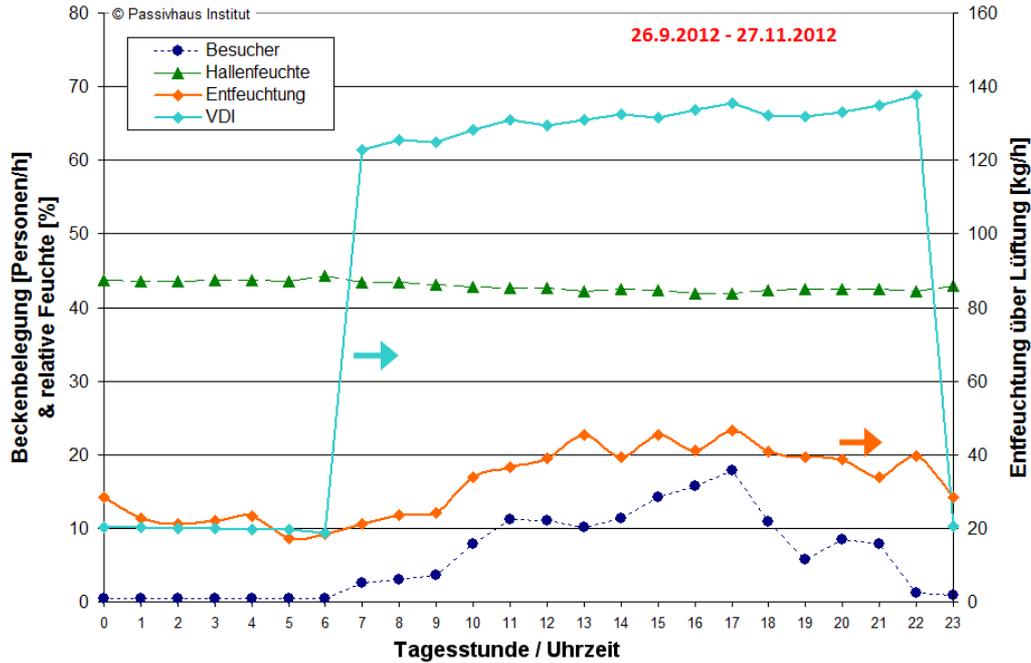


Abbildung 97: Mittleres Tagesprofil der Beckenbelegung (LASE Scanner) und der erbrachten Entfeuchtungsleistung über die Lüftung in Halle 1+2 über ca. 8 Wochen. Die Entfeuchtungsleistung steigt wie erwartet tendenziell bei höherer Beckennutzung an. Außerhalb der Öffnungszeiten ist die Entfeuchtung von ähnlicher Größenordnung wie projiziert, tagsüber jedoch deutlich niedriger.

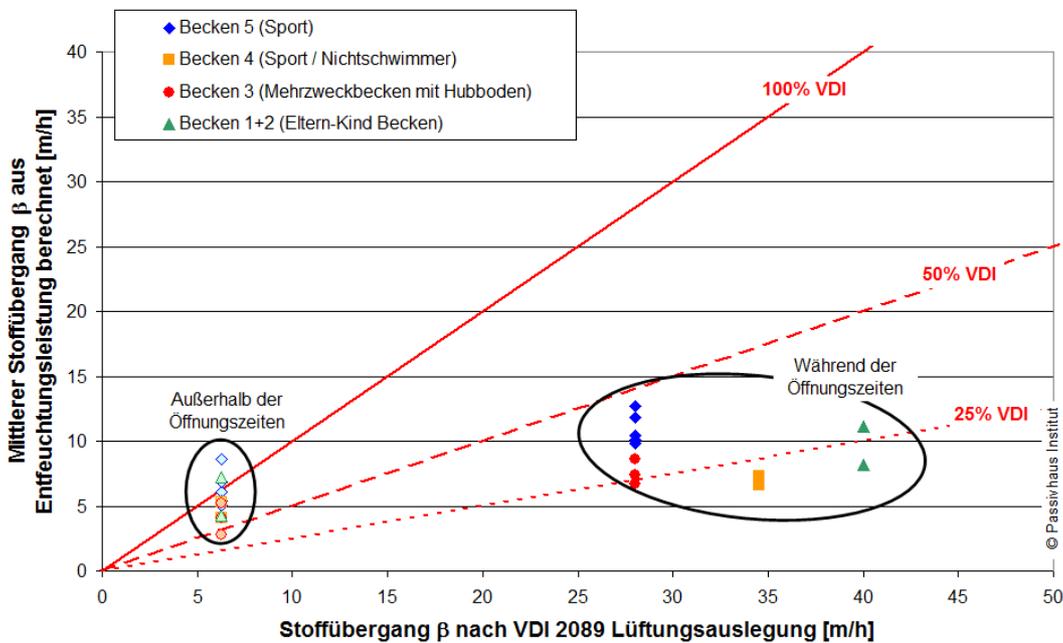


Abbildung 98: Die aus der Entfeuchtungsleistung berechneten Stoffübergänge für die Verdunstung der einzelnen Becken aus jeweils mehreren repräsentativen Zeiträumen mit unterschiedlichen Randbedingungen. Während der Öffnungszeiten liegen die Mittelwerte immer unter 50% der Kennwerte für die Spitzenlastauslegung der Lüftung nach [VDI 2089].

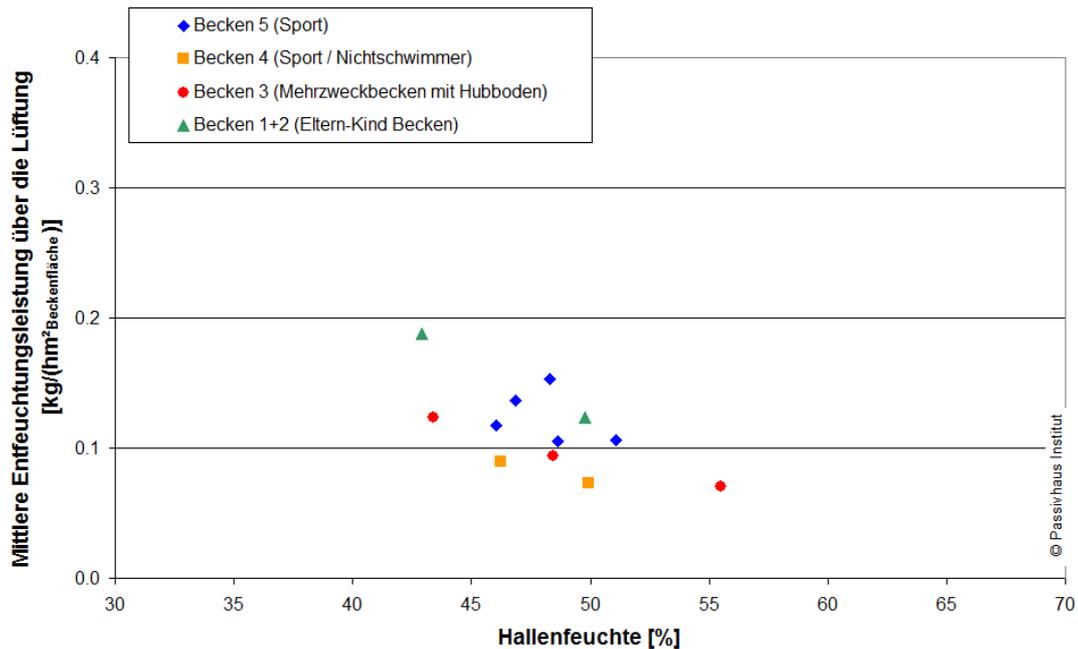


Abbildung 99: Die berechnete mittlere Entfeuchtungsleistung der einzelnen Hallen aus mehreren repräsentativen Zeiträumen mit konstanten Randbedingungen, aufgezeigt bei der jeweiligen Hallenfeuchte. Tendenziell bestätigt sich die Erwartung einer reduzierten Verdunstung bei erhöhter Luftfeuchte.

5.1.1.2 Frischwassererwärmung

Neben der notwendigen Nacherhitzung der Wärmeverluste auf Grund der Verdunstungsenthalpie zur Erhaltung der gewünschten Beckenwassertemperatur macht die Erwärmung des nachgespeisten Frischwassers einen wesentlichen Anteil am Heizbedarf des Beckenwassers aus. Dieser Heizenergiebedarf für die Frischwassererwärmung lässt sich theoretisch leicht aus der Wassermenge, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und dem Temperaturhub (Frischwasser- auf Beckenwassertemperatur) berechnen. Alle drei Parameter sind aus dem Monitoring bekannt.

Unsicherheiten entstehen jedoch dadurch, dass sich das Beckenwasser in ständiger Umwälzung über das Becken, die Überlaufrinnen, den Schwallwasserbehälter, die Rohrleitungen und Filter etc. im warmen Keller befindet. Das benötigte Frischwasser wird in den jeweiligen Schwallwasserbehälter nachgespeist, wo es sich sofort mit dem bereits warmen Wasser vermischt. Bevor es auf der Zuleitung zum Becken über die HT- und NT-Wärmetauscher aktiv erhitzt wird, erfolgt ein Wärmeaustausch mit dem Keller. Wie viel Wärme das Frisch-/Beckenwassergemisch dem Keller entzieht und somit nicht mehr aktiv nachgeheizt werden muss, lässt sich schwer abschätzen und schwer messtechnisch nachvollziehen. In einem Zusatzversuch wurden über mehrere Stunden die Temperaturen an verschiedenen Stellen in den einzelnen Beckenkreisläufen gemessen. Auf Grund der hohen Durchflussmengen, dem geringen prozentualen Frischwasseranteil und der hohen Wärmespeicherkapazität von Wasser, lassen sich jedoch keine Temperaturdifferenzen messen, aus denen eine

Wärmeaufnahme aus dem Keller abgeschätzt werden könnte. In den Vergleichsrechnungen von berechnetem Energiebedarf und gemessenem Energieverbrauch unter gleichen Randbedingungen werden verschiedene Varianten untersucht. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass sich das Frischwasser gar nicht oder bis zu 30 % auf Kellertemperatur erwärmt (siehe 5.1.1.5).

Die vorgesehene Wärmerückgewinnung aus dem Filterspülabwasser zur passiven Vorerwärmung des Frischwassers wurde bisher nicht in Betrieb genommen und darf daher bei der Nachführung der Energiebilanz nicht berücksichtigt werden.

5.1.1.3 Wärmequellen im Wasser

Wärmequellen im Beckenwasserkreislauf tragen dazu bei, das Wasser zu erwärmen und senken daher den Nachheizbedarf. In der Energiebilanz werden zwei wesentliche Wärmequellen berücksichtigt. Potentielle solare Gewinne werden in der Energiebilanz vernachlässigt.

- (a) Schwimmbadtechnik (SBT): Die Wassermengen werden durch Umwälzpumpen dauerhaft in Bewegung gehalten, durch weitere SBT wird die Wasserhygiene sichergestellt. Der benötigte Strom für diese Umwälzung und Wasseraufbereitung ist erheblich; ein Großteil dieser Energie kommt dem Wasser letztendlich in Form von Wärme zu Gute. Die Stromaufnahme der Umwälzpumpen der einzelnen Beckenkreisläufe wurde im Zuge des Monitorings einzeln erfasst während die restlichen Elemente der SBT im Beckenkreislauf die als Wärmequelle relevant sein könnten (z.B. Beckenbeleuchtung, Chlorelektrolyse, UV Desinfektion) nicht dauerhaft separat gemessen wurden. Für die Vergleichsrechnungen wurde 70 bis 100 % des gemessenen Stromverbrauchs der Umwälzpumpen plus den mittleren vorhergesagten Strombedarf der zusätzlichen SBT-Hauptverbraucher je Beckenkreislauf (ca. 18 kW in Summe für alle Beckenkreisläufe) als Wärmequelle für das Wasser angerechnet. Diese Bandbreite wird auf Basis der bisherigen Datenauswertung und Erfahrungen als plausible Wärmequelle für das Beckenwasser erachtet. Nähere Untersuchungen in diesem Bereich stehen noch aus.
- (b) Personen: Je nach Tätigkeit und Umgebungstemperatur geben Personen Wärme an die Umgebung ab. Typische Kennwerte für die Wärmeabgabe an Luft sind 80 W für eine sitzende und 100 W für eine stehende, leicht aktive Person. Bei Schwimmen gelten jedoch andere Randbedingungen, da sie sich zum Großteil unter Wasser befinden. In Anbetracht der physikalisch höheren Wärmeübergabe an Wasser als an Luft und der meist sportlichen Aktivität von Badenden ist davon auszugehen, dass die Wärmeabgabe beim Baden tendenziell höher liegt als bei einem typischen Raumaufenthalt, verlässliche Kennwerte sind den Autoren jedoch nicht bekannt. In [Mareés 2003] werden 11,5 W pro kg Körpergewicht bei einer Schwimmgeschwindigkeit von 3 km/h (25 m in 30 Sekunden) zitiert. Dies

entspricht umgerechnet für 50 kg Körpergewicht ca. 570 W, für 80 kg um 900 W. Mareés schreibt jedoch auch, dass der Energieumsatz von verschiedensten Einflüssen stark beeinflusst wird, so z.B. vom Schwimmstil und -geschwindigkeit, dem Trainingsgrad des einzelnen Schwimmers und auch vom Geschlecht. Eine Abschätzung der Autoren zur Wärmeabgabe des Körpers aus typischen mittleren Kalorienverbrauchswerten beim Schwimmen führt zu Leistungen zwischen ca. 400 und 700 W/Person. Sportschwimmer produzieren dabei mehr Wärme als Badegäste mit einem ruhigen Schwimmstil. Für Nichtschwimmer, wie z.B. spielende Kinder im Warmbecken oder Gäste, die Schwimmgymnastik betreiben, gelten diese Werte nicht. Für die ursprüngliche Energiebilanz wurde mit 100 W/Person im Mittel auf der sicheren Seite gerechnet. Für den Abgleich der Verbrauchswerte wurden bis zu 500 W/Person als Mittelwert angesetzt. Neben der Unsicherheit der mittleren Wärmeabgabe pro Person ist die Belegung nicht von allen Becken bekannt. Als Annahme wurde stark vereinfacht davon ausgegangen, dass sich die Besucher gleichmäßig auf die vier Becken verteilen und jeweils im Durchschnitt eine Stunde im Wasser aufhalten. Bei einer Besucherzahl von 220.000 Personen im Jahr entspräche dies im Mittel 9,4 Badegästen pro Becken während der Öffnungszeiten. Für Becken 1+2 liegen die Belegungsdaten durch die Auswertung der automatischen Zählung mit einem Beckenscanner vor. Diese Daten zeigen, dass die ursprüngliche Abschätzung zumindest für dieses sehr gut passt. Die Differenz der Entfeuchtungsleistung für die einzelnen Hallen, während der Öffnungszeiten gegenüber nachts, weisen auf eine niedrigere Belegung von Becken 3 und eine höhere Nutzung der beiden Sportbecken 4+5 hin.

5.1.1.4 Beckenwände & Wasseroberfläche

An allen Wasseroberflächen entsteht ein Wärmeaustausch mit der Umgebung. Die Transmission durch die Beckenwände und -böden kann auf Basis der Bauteil-U-Werte berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass durch die Eigenschaften von Wasser der Wärmeübergangswiderstand an Oberflächen nahezu null ist. Der Wärmeübergang an der Wasseroberfläche wurde in der ursprünglichen Energiebilanz zunächst nicht ausreichend berücksichtigt. Wie die nachfolgenden Vergleichsrechnungen zeigen, kann dieser Faktor aber durchaus einen Einfluss auf das Endergebnis haben. Als orientierende Größe kann der nach [DIN EN ISO 6946] anzusetzende Wärmeübergangswiderstand in Innenräumen bei abwärts gerichtetem Wärmestrom von $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ herangezogen werden, was einem Wärmeübergang von $5,88 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ entspricht. Ist der Stoffübergangskoeffizient β der Verdunstung bekannt, so kann der Wärmeübergang α auf Basis der Analogie zwischen Wärme- und Stoffübertragung an der verdunstenden Oberfläche mit Hilfe der Lewis-Zahl Le und der Wärmekapazität der feuchten Luft c_{Lm} leicht berechnet werden: $\alpha = Le \cdot \beta \cdot c_{Lm}$. Dabei gilt für verdunstendes Wasser $Le \approx 1$ [Dubbel 1997]. Tabelle 14

gibt eine Übersicht von Wärmeübergangskoeffizienten unter einer Bandbreite von Randbedingungen typisch für Hallenbäder.

Tabelle 14: Übersicht der Wärmeübergangskoeffizienten berechnet auf Basis der Lewis Relation.

Stoffübergang β [m/h]	Lufttemperatur [°C]	Relative Luftfeuchte	Wärmeübergangskoeffizient α [W/(m ² K)]
7	32	48% / 64%	2,31 / 2,32
	28	48% / 64%	2,34 / 2,36
15	32	48% / 64%	4,95 / 4,98
	28	48% / 64%	5,02 / 5,05
28	32	48% / 64%	9,24 / 9,30
	28	48% / 64%	9,37 / 9,42
40	32	48% / 64%	13,21 / 13,29
	28	48% / 64%	13,38 / 13,46

5.1.1.5 Energiebilanz für die Beckenwassererwärmung

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, ist die Energiebilanz für die Beckenwassererwärmung mit vielen Unsicherheiten behaftet. Im November 2012 waren die Randbedingungen in allen Becken/Hallen relativ konstant. Dieser Monat wird daher als Basis für den Vergleich des monatlichen Verbrauchs und des berechneten Energiebedarfs unter unterschiedlichen Annahmen herangezogen. In Abbildung 100 bis Abbildung 102 sind die Ergebnisse einzeln für die drei Beckenkreisläufe grafisch dargestellt (Hinweis: Unterschiedliche Skalen). Als Randbedingung für Temperaturen (Beckenwasser und Hallenluft) und die Hallenfeuchte wurden die entsprechenden Monatsmittelwerte verwendet. Für den Frischwasserverbrauch und den Pumpenstrom wurden ebenfalls die Messdaten in die Berechnung eingepflegt.

Zur Erläuterung der acht gerechneten Varianten mit schrittweise angepassten Parametern:

- Berechnung der Verdunstungsenthalpie wie in der ursprünglichen Energiebilanz auf Basis der Stoffübergangskoeffizienten β in Anlehnung an die [VDI 2089]
- Verdunstungsenthalpie entsprechend 100% der berechneten Entfeuchtungsleistung über die Lüftung im November (siehe Kapitel 5.1.1.1)

- Annahme, dass nur 75 % der berechneten Entfeuchtungsleistung als Verdunstungsenthalpie dem Beckenwasser zugerechnet werden können (siehe Kapitel 5.1.1.1)
- Annahme, dass sich das zu erwärmende Frischwasser bereits bis zu 30% auf Kellertemperatur erwärmt, bevor es aktiv nachgeheizt wird (siehe Kapitel 5.1.1.2)
- Erhöhte Wärmeabgabe der Schwimmer von durchschnittlich 500 W/Person (siehe Kapitel 5.1.1.3)
- Annahme, dass 100 % der Stromaufnahme der Umwälzpumpen und SBT-Hauptverbraucher an den entsprechenden Beckenkreislauf abgegeben wird (siehe Kapitel 5.1.1.3)
- Angepasste Beckenbelegung auf Basis der Personenzählung in Becken 1+2
- 5,88 W/(m²K) Wärmeübergangskoeffizient an der Wasseroberfläche, entsprechend den Angaben für abwärts gerichteten Wärmestrom im Innenraum nach [DIN EN ISO 6946] (siehe Kapitel 5.1.1.4)

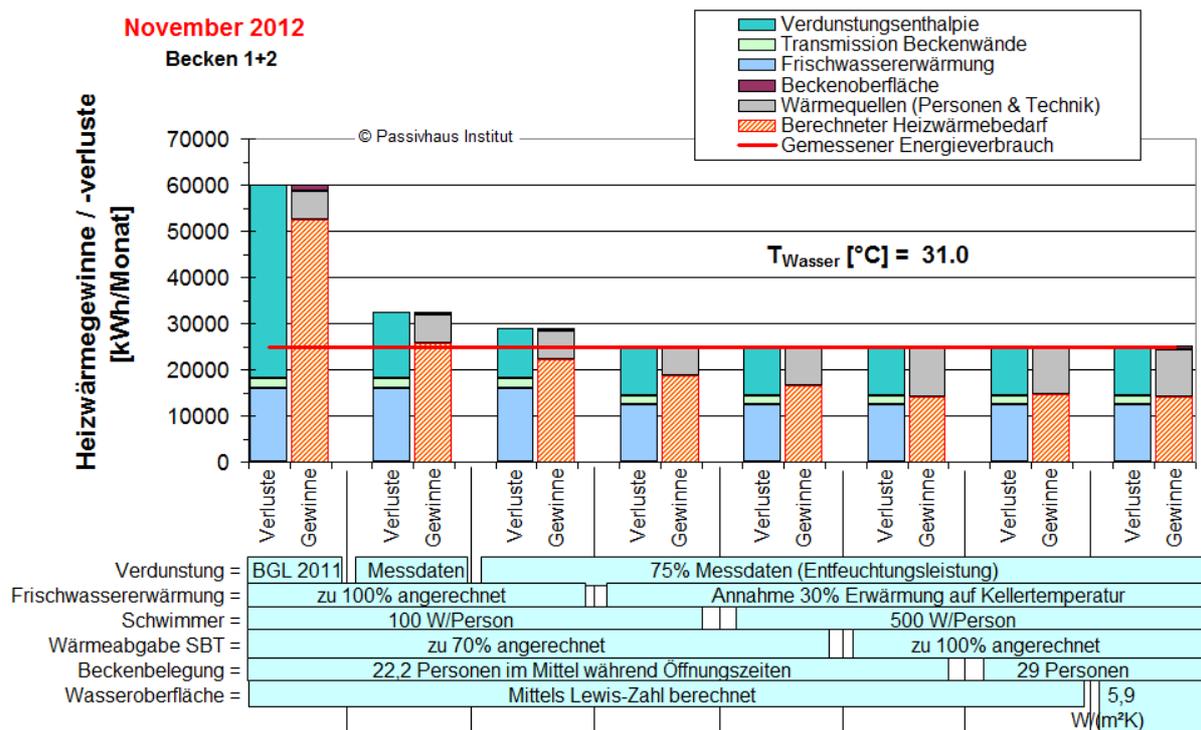


Abbildung 100: Der gemessene Heizwärmeverbrauch für Becken 1+2 im November 2012 im Vergleich zum berechneten Energiebedarf unter verschiedenen inkrementell angepassten Annahmen.

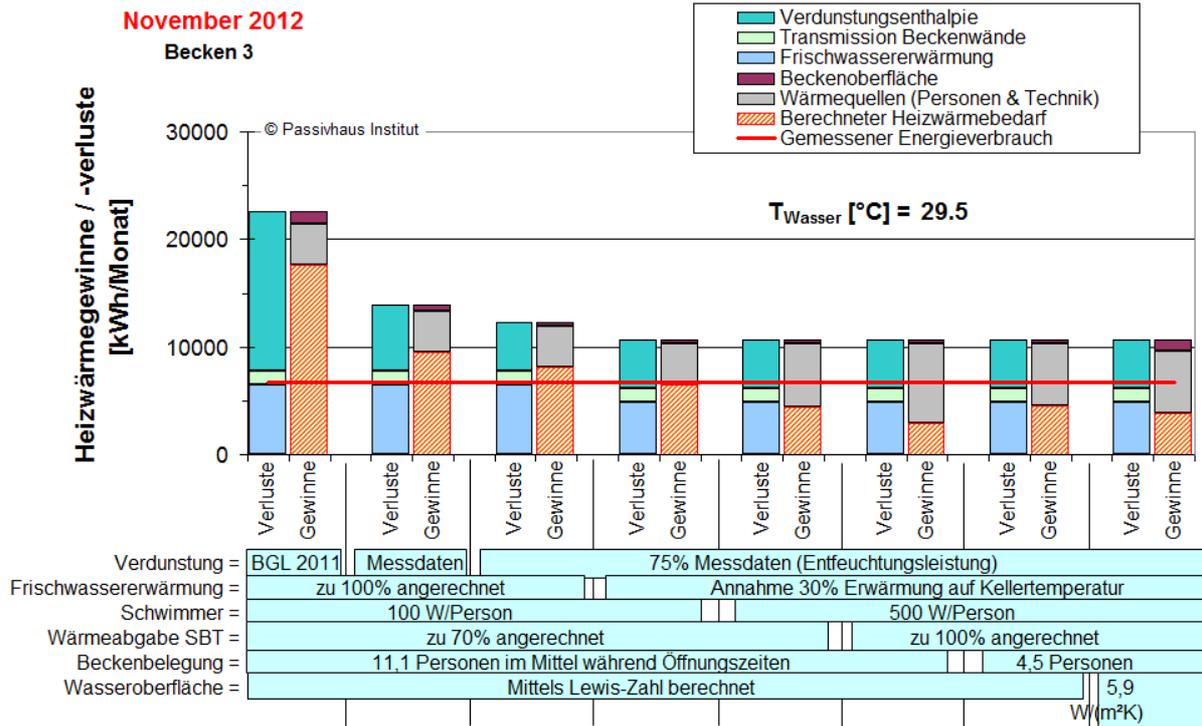


Abbildung 101: Der gemessene Heizwärmeverbrauch für Becken 3 im November 2012 im Vergleich zum berechneten Energiebedarf unter verschiedenen inkrementell angepassten Annahmen.

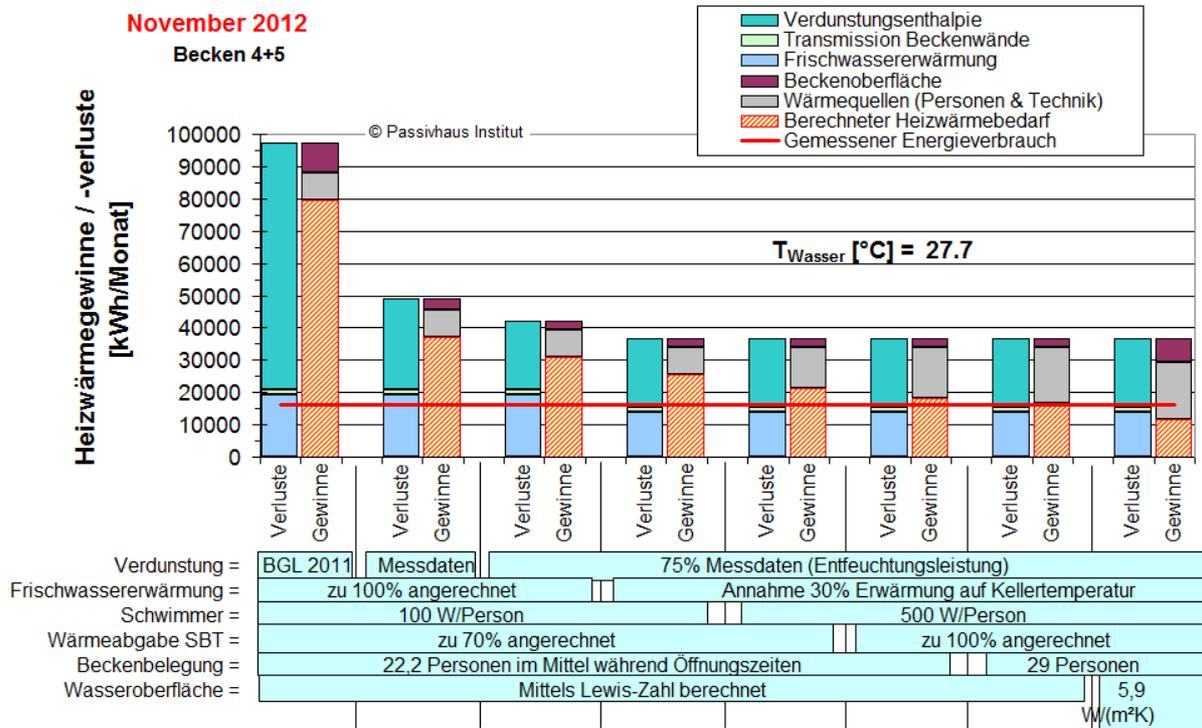


Abbildung 102: Der gemessene Heizwärmeverbrauch für Becken 4+5 im November 2012 im Vergleich zum berechneten Energiebedarf unter verschiedenen verschiedenen inkrementell angepassten Annahmen.

Unter Variation der Annahmen kann für alle Kreisläufe eine Übereinstimmung mit dem Messwert erreicht werden. Auffällig ist, dass sowohl beim Lehrschwimmbecken (3) als auch beim Sportbeckenkreislauf (4+5) der gemessene Energieverbrauch in etwa der Größenordnung des berechneten Energiebedarfs allein für die Frischwassermenge liegt. Demnach muss es in diesen Beckenkreisläufen signifikante Wärmequellen geben die dazu beitragen den Heizwärmebedarf zu senken. Insbesondere in den Sportbecken ist der Energiebedarf deutlich niedriger als erwartet – die genauen Zusammenhänge sollten zukünftig noch detaillierter untersucht werden.

In Abbildung 103 sind die projektierten Energiebedarfswerte für die Beckenwassererwärmung im Jahresverlauf den Messdaten und dem Energiebedarf der nachgeführten Energiebilanz gegenübergestellt. Dieser Vergleich verdeutlicht, dass die ursprüngliche Energiebilanz deutlich zu pessimistisch angesetzt war. Für die nachgeführte Berechnung wurden als Randbedingung die gemessenen Werte aus dem Winter 2012/2013 verwendet (Temperaturen, Verdunstungsmenge, Frischwasserverbrauch). Im Mittel sind die Ergebnisse in relativ guter Übereinstimmung mit den Messdaten. Wie in der Grafik erkennbar, spiegelt sich der Jahresgang des Heizwärmeverbrauchs auf Grund der monatlich unterschiedlichen Frischwassertemperatur nicht in den Ergebnissen der Energiebilanz wider. Für den Jahresheizwärmebedarf sind die monatlichen Unterschiede nicht relevant, aus Gründen der Vereinfachung wird in der Energiebilanz daher mit einer Jahresmitteltemperatur für das Frischwasser gerechnet.

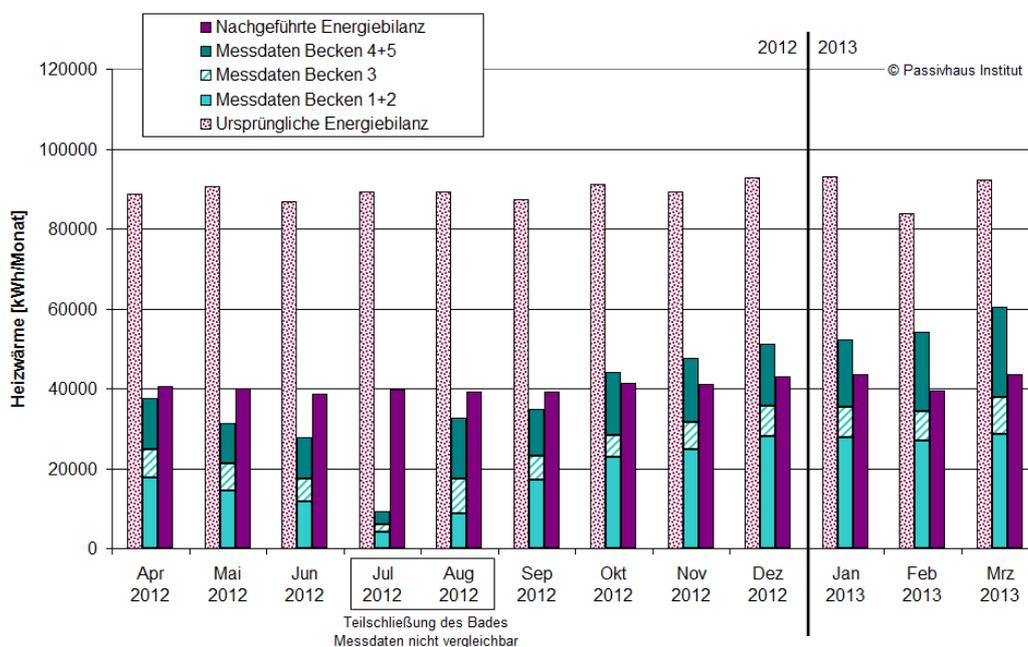


Abbildung 103: Vergleich des monatlichen Energiebedarfs der Beckenwassererwärmung vom Planungsstand [BGL 2011] mit dem gemessenen Heizenergieverbrauch und den Bedarfswerten der nachgeführten Energiebilanz im Jahresverlauf.

Wichtig ist die Erkenntnis, dass im Gegensatz zur Annahme der ursprünglichen Energiebilanzierung für die Beckenwassererwärmung nicht die Verdunstung dominant ist. Der Energiebedarf der Frischwassererwärmung macht in allen Kreisläufen im Vergleich zur Verdunstung einen vergleichbaren Anteil aus. Es ist demnach energetisch durchaus lohnenswert die Frischwassermengen zu reduzieren, wobei selbstverständlich die Beckenwasserhygiene zwingend zu berücksichtigen ist. Die Analysen zeigen außerdem, dass es für die Energiebilanz von großer Relevanz ist, auch die Wärmequellen im Beckenwasser näher zu betrachten.

Weitere Eingrenzungen bzw. Hinweise für allgemein geeignete Annahmen und Kennwerte für die Bilanzierung von Hallenbädern konnten im Rahmen der bisher durchgeführten Untersuchungen nicht erstellt werden. Die Zusammenhänge müssten dazu bei kontrollierten und bewusst unterschiedlichen Randbedingungen tiefer gehend untersucht werden. Dies ist ggf. in einem Folgeprojekt möglich.

5.1.2 Raumheizung

Der zweitgrößte Wärmeverbraucher nach der Beckenwassererwärmung ist die Raumbeheizung (vgl. 4.8.2). Zum Überprüfen und ggf. Verbessern der Energiebilanz in diesem wichtigen Teilbereich werden die entsprechenden Messdaten analysiert und mit den Rechenwerten abgeglichen. Der Heizwärmebedarf der Raumluft wird von verschiedensten Faktoren beeinflusst. Die folgenden gemessenen Parameter aus dem Monitoring wurden in der Energiebilanz nachgeführt, um festzustellen, ob der gemessene Heizwärmeverbrauch der einzelnen Bereiche mit der angesetzten Berechnungsmethode des Schwimmbad-PHPP nachvollzogen werden kann:

- Außenbedingungen: Temperatur, Solarstrahlung und relative Feuchte (siehe Abschnitt 4.2)
- Mittelwerte der gemessenen Raumtemperaturen als Temperaturanforderung der verschiedenen Temperaturzonen in der Energiebilanz
- Luftmengen: Mittlerer Außenluft- und Umluftvolumenstrom
- Reduktion der internen Wärmequellen in den Nebenräumen von pauschal $3,5 \text{ W/m}^2$ auf $2,1 \text{ W/m}^2$

Die Qualität der Gebäudehülle wurde (abgesehen von der Luftdichtheit) in der Energiebilanz nicht angepasst. Die Transmissionsverluste und solaren Gewinne verändern sich gegenüber der ursprünglichen Energiebilanz demnach nur entsprechend der angepassten Innen- und Außentemperaturen. Bei den hohen Luftmengen spielen die Lüftungswärmeverluste für die Gesamtenergiebilanz eine nicht unerhebliche Rolle. Hierfür wiederum sind die Effizienz der Wärmetauscher und die erzielte Wärmerückgewinnung ausschlaggebend. Auf Basis der vorhandenen Mess-

daten in den Lüftungsgeräten konnte zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung noch keine verlässliche Auswertung zur Effizienz der Wärmetauscher gemacht werden. Die Berechnung wird gegenüber dem Normalfall in Wohn- oder Bürogebäuden durch die hohen Abluftfeuchten mit Kondensatbildung in der Fortluft und durch absichtliche Disbalance (zum Bauteilschutz) der Luftmengen erheblich komplexer. Die ersten Auswertungen bestätigen, dass die Effizienz im Bereich der erwarteten Kennwerte liegt (70 bis 80 % je nach Gerät), genauere Analysen zu diesem Thema stehen jedoch noch aus.

5.1.2.1 Schwimmhallen

Da der Außenluftwechsel der Schwimmhallen vom Entfeuchtungsbedarf abhängt, ist das Schwimmbad-PHPP so adaptiert, dass an dieser Stelle keine Volumenströme vom Nutzer vorgegeben werden (wie sonst üblich), sondern diese aus den eingestellten Randbedingungen berechnet werden. Entsprechend der Feuchtequellen in den Hallen, werden vom PHPP der benötigte Außenluftwechsel und die entsprechenden Lüftungswärmeverluste auf monatlicher Basis berechnet. Um nicht in die Algorithmen einzugreifen, sondern statt dessen zu überprüfen, ob die Berechnung bei vorgegebenen Randbedingungen korrekt rechnet, wurden bei der Nachführung der Energiebilanz daher nicht die gemessenen Außenluftmengen übernommen, sondern die aus dem Monitoring hervor gehende mittlere Verdunstungsmenge. In Abbildung 104 sind die aus den Messwerten berechneten monatsmittleren Entfeuchtungsleistungen (= Abschätzung der Feuchtequellen / Verdunstung in der Halle, vgl. Abschnitt 5.1.1.1) der einzelnen Hallengeräte abgebildet. In der Energiebilanz wird von einer ganzjährig konstanten Betriebsweise ausgegangen, für die nachgeführte Energiebilanz wurde hierfür der Mittelwert von November 2012 bis einschließlich Februar 2013 verwendet (Zeitraum mit verlässlichen und relativ stabilen Betriebsbedingungen). Abbildung 105 zeigt die monatlich gemessenen mittleren Außenluftvolumenströme im Vergleich zu dem mit dem PHPP berechneten Außenluftbedarf auf Basis der vorgegebenen Verdunstungsmengen. Vor Dezember 2012 sind die gemessenen Volumenströme deutlich höher als die mit dem PHPP berechneten, was sich mit den in diesen Monaten höheren tatsächlichen Feuchtequellen als in der Energiebilanz angesetzt erklären lässt. Selbst in den folgenden Monaten sind die berechneten Außenluftmengen etwas niedriger (ca. 10 bis 15 %) als die realisierten. Mit zu niedrig berechneten Außenluftmengen werden mit der Energiebilanz auch die Lüftungswärmeverluste unterschätzt. Die wahrscheinlichste Ursache für diese Abweichung sind regelungstechnische Einflüsse, die in der Praxis zu höheren Luftwechseln führen, so z.B. die regelmäßige Kalibrierung der Geräte. Diese Beobachtung soll weiterhin bei konstanteren Betriebsbedingungen des Bades beobachtet werden, um zukünftig zu entscheiden, ob an dieser Stelle eine Anpassung der Energiebilanz notwendig ist.

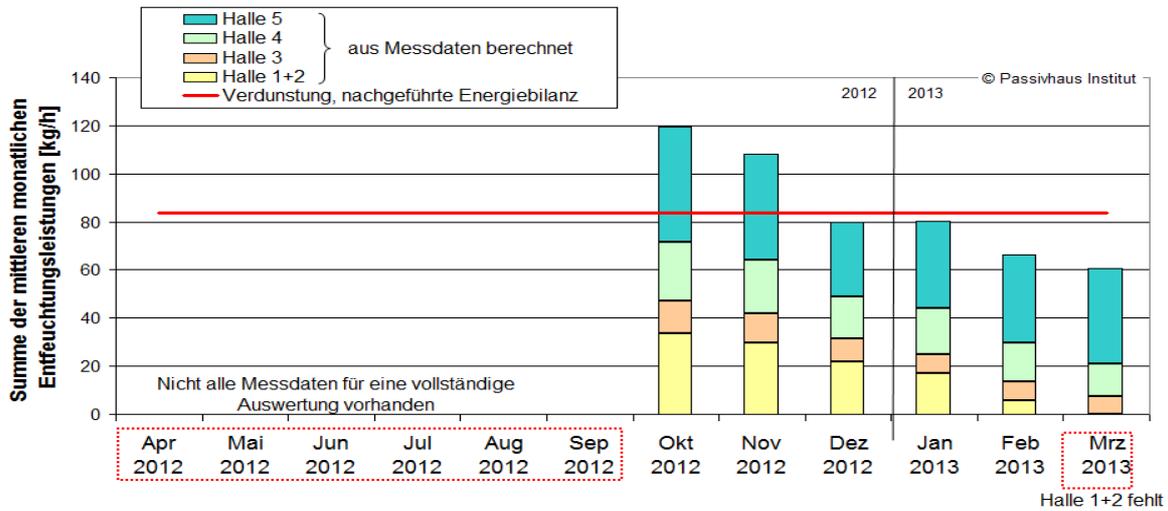


Abbildung 104: Aus den Messdaten berechnete Entfeuchtungsleistung über die Lüftung im jeweiligen Monatsmittel für die einzelnen Hallen. Für die nachgeführte Energiebilanz wurde der Mittelwert von Oktober 2012 bis Februar 2013 verwendet.

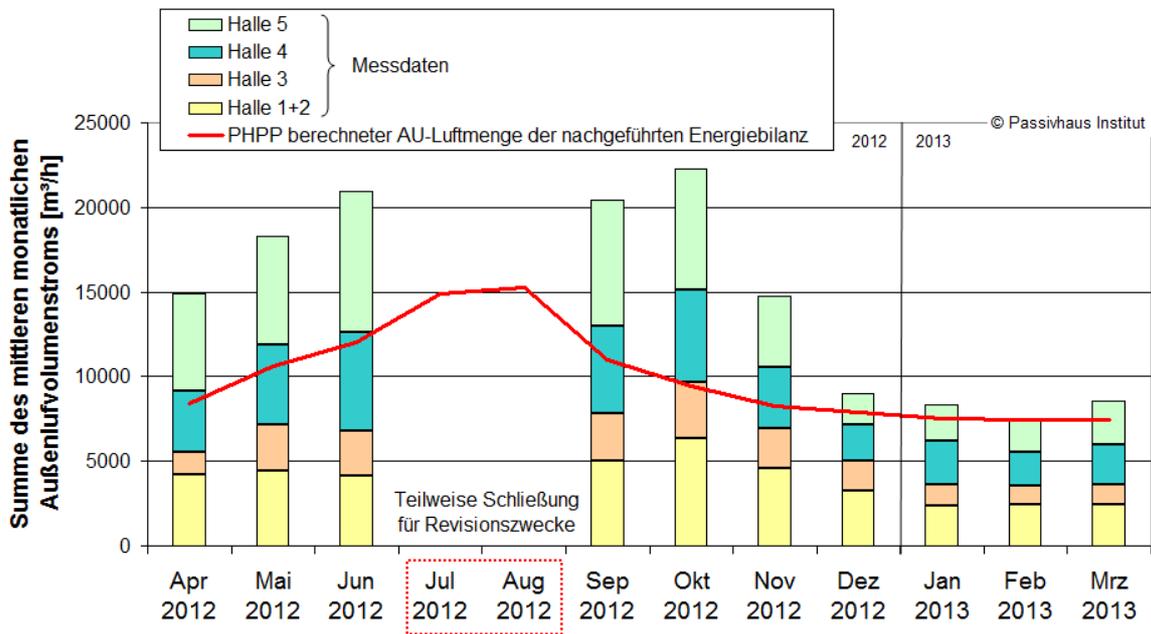


Abbildung 105: Der gemessene mittlere monatliche Außenluftvolumenstrom der einzelnen Hallen (aufsummiert) im Vergleich zum berechneten Außenluftbedarf aus der nachgeführten Energiebilanz. Selbst in den Monaten mit weniger Verdunstung als rechnerisch angesetzt (ab Dezember 2012, siehe Abbildung 104) sind die mit dem PHPP berechneten Außenluftmengen etwas niedriger als die realisierten. In den Monaten mit höher gemessener Verdunstung (vor Dez 2012) sind die gemessenen Volumenströme deutlich höher als berechnet.

Abbildung 106 zeigt den monatlich gemessenen Energieverbrauch der einzelnen Hallen im Vergleich zur Energiebilanz (Stand [BGL 2011]) und der nachgeführten Berechnung. (Hinweis: In diesem Vergleich wird auch die Enthalprierückgewinnung über die Wärmepumpe als Heizenergieverbrauch dargestellt, da die Wärmepumpe im Energiebilanzmodell *nicht* abgebildet wurde.) Die Größenordnung der Mess- und Rechenwerte ist in guter Übereinstimmung; Die berechneten Werte liegen jedoch in allen Monaten unter dem gemessenen Heizwärmeverbrauch. Die Ursache konnte nicht endgültig geklärt werden, es gibt verschiedene Erklärungsmöglichkeiten wie z.B. höhere Lüftungswärmeverluste durch höhere Außenluftmengen oder eine schlechtere Effizienz der Wärmerückgewinnung, oder andere nicht vollständig berücksichtigte Wärmeverluste z.B. durch Verdunstung in der Hallenluft. Wie in Abschnitt 5.1.1.1 zum Thema Verdunstung des Beckenwassers beschrieben, ist es durchaus möglich, dass ein Teil der Verdunstungsenthalpie aus der Hallenluft stammt und somit über die Lüftungsgeräte nachgeheizt werden muss. In Abbildung 106 ist ein zusätzlicher Balken eingezeichnet, der die mögliche Erhöhung des Heizwärmebedarfs unter der Annahme, dass 20 % der Verdunstungsenthalpie als Wärmesenken in den Hallen anzurechnen sind, beziffert.

Zur näheren Untersuchung wäre ein Vergleich mit der dynamischen Simulation hilfreich, in welcher die Hallen einzeln abgebildet werden.

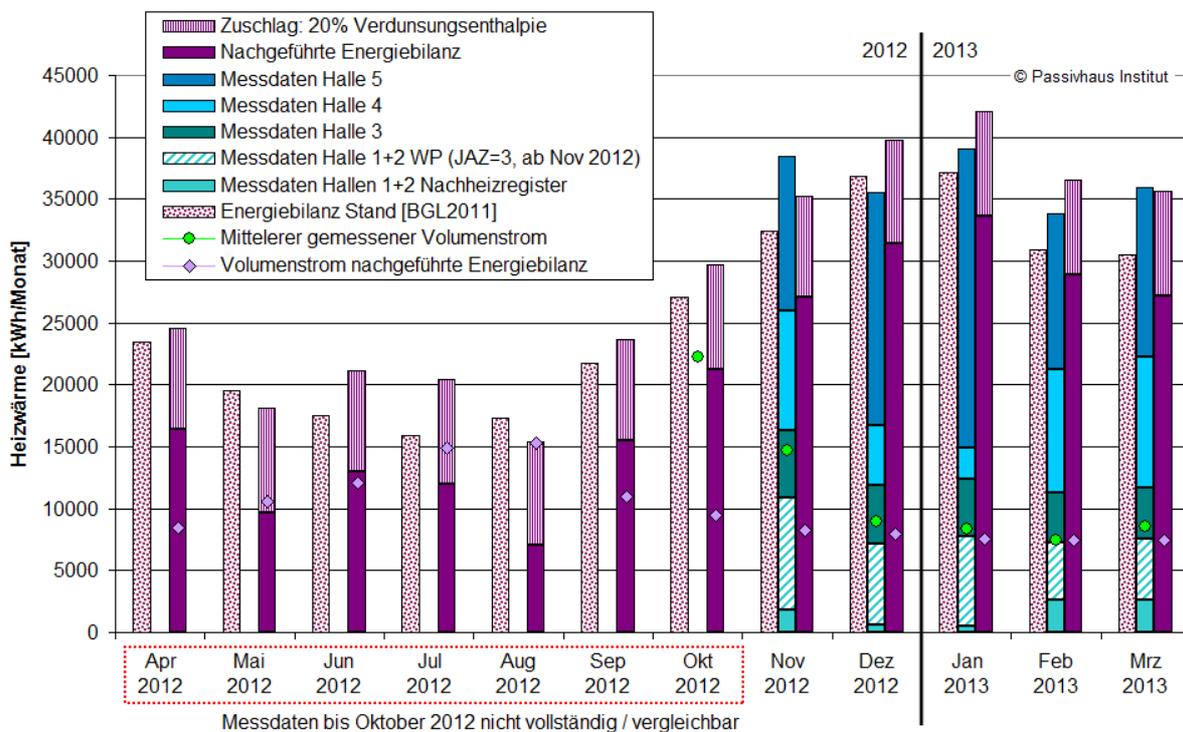


Abbildung 106: Vergleich des monatlichen Energiebedarfs vom Planungsstand [BGL 2011] mit dem gemessenen Heizenergieverbrauch (inkl. Enthalprierückgewinnung über die WP) und den Bedarfswerten der nachgeführten Energiebilanz für die Schwimmhallen.

5.1.2.2 Umkleiden / Duschen

In der ursprünglichen Energiebilanz wurden für den Umkleidebereich 26 °C Solltemperatur angesetzt und für die Duschen 28 °C. Die realisierten Temperaturen der Umkleiden lagen im Winter 2012/2013 etwa 1 K niedriger als geplant, dafür in den Duschräumen ca. 1 K höher. Die Temperaturen in der Berechnung wurden entsprechend der Mittelwerte seit Oktober 2012 mit 25,2 °C und 29,4 °C angesetzt.

Eine Nachheizung, wie sie in dieser Zone zwischen den Umkleideräumen und der Duschzone erfolgt, ist in dem PHPP nicht vorgesehen und musste manuell in die Energiebilanz eingepflegt werden. Hierfür gibt es prinzipiell verschiedene Möglichkeiten mit verschiedenen Vor- und Nachteilen. Die gewählte Methode aus der Planungsphase führte insgesamt zu zu niedrigen Heizbedarfswerten und wurde daher überarbeitet.

Zusätzlich zu den Solltemperaturen und Berechnungsmethoden für die Nacherhitzung wurde gegenüber der Energiebilanz aus der Planung auch der Luftwechsel aktualisiert. Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben wird die Luftmenge nach der Feuchte in den Duschräumen geregelt, dabei ergibt sich in den Wintermonaten ein mittlerer Volumenstrom von 4.885 m³/h (6.000 m³/h während der Öffnungszeiten). Dieser Wert liegt deutlich niedriger als die Annahmen aus der Planungsphase, die bewusst auf der sicheren Seite lagen. Da die Regelung zum Zeitpunkt der Veröffentlichung [BGL 2011] noch nicht endgültig geklärt war, wurde damals davon ausgegangen, dass das Gerät während den Öffnungszeiten durchgängig den Nennvolumenstrom von 10.000 m³/h befördert. Die damals zu hoch angesetzten Lüftungswärmeverluste kompensierten zum Teil die zuvor beschriebenen zu optimistischen Annahmen für die Duschluft-Nacherhitzung. Das hatte zur Folge, dass die Energiebilanz nach Planungsstand und die aktualisierte Version zu ähnlichen Ergebnissen im Jahresheizwärmebedarf führen.

In Abbildung 107 ist der gemessene Heizwärmeverbrauch für das ausgewertete Messjahr im Vergleich zum Energiebedarf Stand [BGL 2011] und der nachgeführten Energiebilanz mit den Randbedingungen aus dem Monitoring dargestellt. Die Werte vor Oktober 2012 sind wegen unterschiedlicher Randbedingungen in der Berechnung und der Praxis nicht belastbar. Die Werte der aktuellen Energiebilanz ab Oktober 2012 liegen im Mittel 25 % unter den Messwerten. Diese Diskrepanz entspricht in den Wintermonaten ca. 2.500 kWh/Monat bzw. 0,6 kWh/(m²_{EBF}Monat) und ist somit für die Gesamtenergiebilanz nicht ausschlaggebend. Die Ursachen für die Abweichungen konnten bisher nicht endgültig geklärt werden. Mögliche Gründe sind ein schlechterer effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage, weniger interne Wärmequellen bzw. höhere Wärmesenken (Verdunstung).

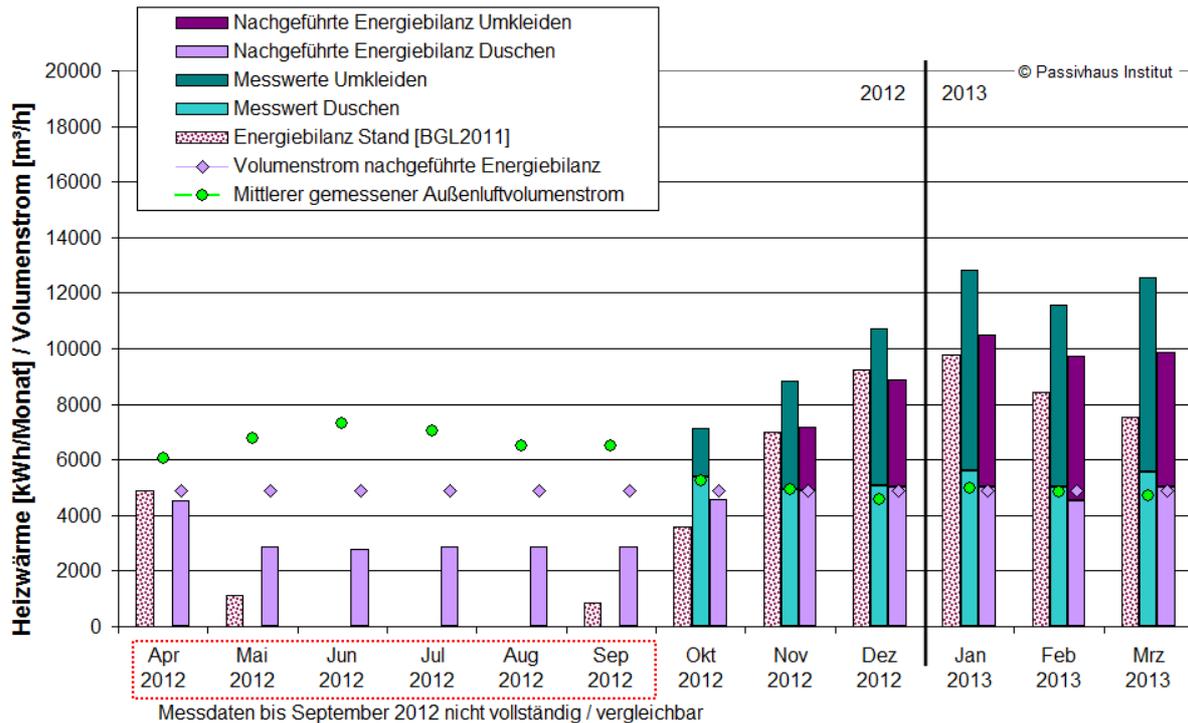


Abbildung 107: Vergleich des monatlichen Energiebedarfs vom Planungsstand [BGL 2011] mit dem gemessenen Energieverbrauch und den Bedarfswerten der nachgeführten Energiebilanz für die Umkleieräume und Duschbereiche. Die Energiebilanz mit angepassten Randbedingungen führt weiterhin zu Ergebnissen, die im Mittel ca. 25 % unter den Messwerten liegen.

5.1.2.3 Foyer, Keller und Nebenräume

Der Heizwärmebedarf bzw. -verbrauch der Nebenräume macht den geringsten Anteil der Gesamttraumheizwärme aus. Die verschiedenen Bereiche im Hallenbad die alle über das Lüftungsgerät „Nebenräume“ versorgt werden, wurden in der Energiebilanz als drei unterschiedliche Temperaturzonen abgebildet: Foyer, Keller und sonstige Nebenräume. Die Räume sind in verschiedenen Bereichen des Bades mit unterschiedlich warmen Nebenräumen angeordnet, daher sind abweichende Temperaturen trotz gemeinsamer Luftversorgung zu erwarten und wurden auch gemessen.

In der Energiebilanz (Stand [BGL 2011]) aus der Planungsphase wurde mit einer Solltemperatur von 22 °C gerechnet. Die meisten Räume weisen höhere Temperaturen auf, allerdings sind diese alle von wärmeren Zonen umgeben. Im Foyer und in den Personalräumen im Untergeschoss traten im Winter 2012/2013 niedrigere Werte bis zu 18,8 °C auf. Der Sollwert für die Heizwärmebilanz wurde entsprechend des Mittelwertes Dezember 2012 bis März 2013 auf 19,2 °C abgesenkt. Zudem wurde der mittlere Volumenstrom an den gemessenen Mittelwert von Oktober 2012 bis Januar 2013 angepasst.

Die Mess- und Rechenergebnisse sind in Abbildung 108 abgebildet. Auch in diesem Bereich sind die Messwerte höher als die berechneten Bedarfswerte. Wie auch in

den zuvor beschriebenen Abschnitten gibt es hierfür verschiedene mögliche Ursachen. Für die Gesamtenergiebilanz des Bades ist die Beheizung der Neben-zonen nebensächlich, die erzielte Übereinstimmung ist daher ausreichend.

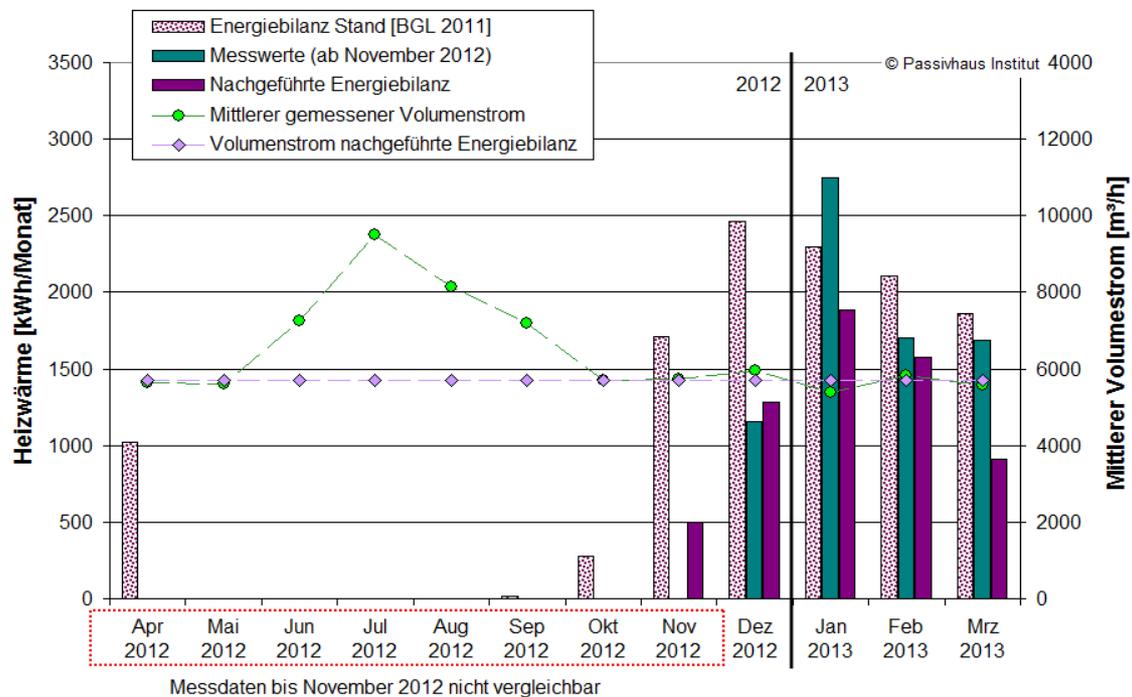


Abbildung 108: Vergleich des monatlichen Energiebedarfs vom Planungsstand [BGL 2011] mit dem gemessenen Energieverbrauch und den Bedarfswerten der nachgeführten Energiebilanz für das Foyer, den Keller und sonstige Nebenräume. Von Mai bis September besteht nach der Energiebilanz kein Heizbedarf.

5.1.3 Trinkwarmwasser

Den dritten Anteil der Heizwärme macht die Trinkwarmwassererwärmung (TWW) aus. Der Energiebedarf für die Erwärmung des Trinkwarmwassers (Duschen etc.) wird in der Energiebilanz über die angenommene monatliche Personenzahl, den jeweiligen Duschwasserbedarf pro Person und den Temperaturhub von der jahresmittleren Kaltwassertemperatur auf Duschtemperatur von 40 °C berechnet. Die Speicher- und Verteilverluste werden separat berechnet und auf den Energiebedarf für die Trinkwassererwärmung aufgeschlagen. In der ursprünglichen Energiebilanz (Stand [BGL 2011]) sind keine Verteilverluste enthalten, da zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung diesbezüglich noch nicht ausreichend Informationen vorlagen. In der nachgeführten/aktualisierten Energiebilanz wurden die Verteilverluste auf Basis der Rohrleitungslängen und Dämmqualitäten vom Stand der Ausführungsplanung berechnet.

In der Energiebilanz werden zur Berechnung des Energiebedarfs 18 Liter/Person bei 40 °C (Duschtemperatur) angesetzt, berechnet aus drei Minuten Duschzeit bei einem Durchfluss von 6 Liter/Minute der wassersparenden Duschköpfe. Der gemessene

Warmwasserverbrauch im ausgewerteten Messzeitraum liegt bei durchschnittlich 15,6 Liter/Person bei 45 °C (Temperatur bei der Zapfung am TWW-Speicher). Der äquivalente Warmwasserverbrauch bei der angesetzten Duschtemperatur von 40 °C wird zu ca. 18,5 Liter/Person berechnet und ist somit nur leicht erhöht gegenüber der Annahme der Energiebilanz (+ 3 %). Diese Auswertung weist auf eine gute Qualität der gewählten wassersparenden Armaturen hin, da sich trotz reduzierter Durchflussmenge keine erheblich längeren Duschzeiten auftreten. Die Armaturen haben somit effektiv zu einer Wasser- und Energieeinsparung beigetragen.

Im Vergleich sind der gemessene Heizwärmeverbrauch im Auswertungszeitraum April 2012 bis März 2013 für die TWW-Bereitung mit 136.800 kWh/Jahr in sehr guter Übereinstimmung mit dem ursprünglich projektierten Wert von 136.138 kWh/Jahr (Abweichung < 1 %). Bei genauerer Betrachtung wird jedoch deutlich, dass sich unterschiedliche Effekte kompensieren und so zu einem übereinstimmenden Ergebnis führen – denn der Energieverbrauch entspricht der Projektierung, trotz niedrigerer Besucherzahlen und höherer mittlerer Frischwassertemperatur. Um die Ursache der Abweichungen zwischen Messung und Energiebedarfsrechnung eingrenzen zu können, wurde die Energiebedarfsrechnung für das TWW mit den bekannten Parametern aus dem Monitoring (monatliche Frischwassertemperaturen und Besucherzahlen) angepasst. Eine solche Anpassung (siehe Abbildung 109) führt zu monatlichen Bedarfswerten, die im Mittel 9 % *unter* den Verbrauchswerten liegen. Demzufolge waren die ursprünglichen Annahmen zur Berechnung des Energiebedarfs etwas zu optimistisch – entweder bezüglich des Duschwasserverbrauchs pro Badegast oder bezüglich der Wärmeverluste. Für den vorliegenden Bericht wurden an dieser Stelle keine weiterführenden Analysen durchgeführt. Der Energiebedarf für das TWW und die identifizierten Abweichungen zwischen Messung und Energiebilanz sind ein vergleichbar kleiner Anteil der Gesamtenergieströme des Bades. Eine Optimierung ist daher nicht von bedeutender Priorität. Mit einer pauschalen Erhöhung der Annahme für die Duschzeit pro Badegast um eine halbe Minute sind die Berechnungen in besserer Übereinstimmung mit den Messdaten.

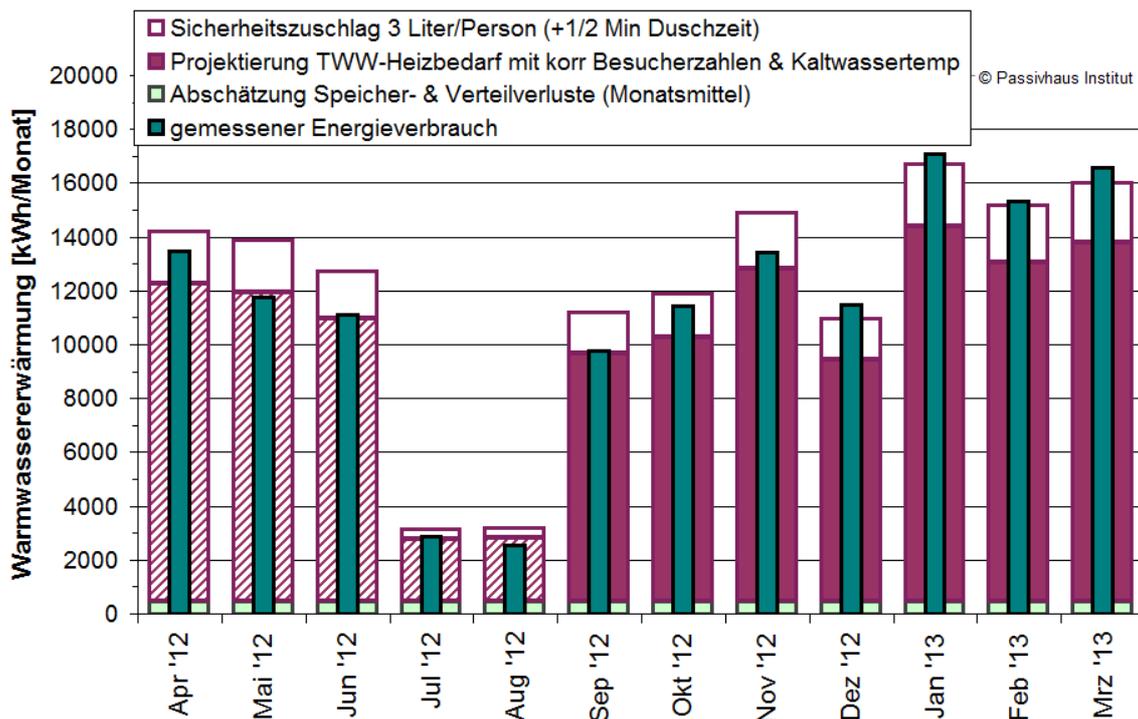


Abbildung 109: Der monatlich gemessene Heizwärmeverbrauch zur TWW-Erwärmung im Vergleich zur Bedarfsrechnung nach Anpassung der Besucherzahlen und Frischwassertemperaturen. (Hinweis: Die schraffierten Balken basieren auf Hochrechnungen der Frischwassertemperatur.) Die Annahmen der Projektierung sind tendenziell zu optimistisch, daher wird für die nachgeführte/aktualisierte Energiebilanz ein Sicherheitszuschlag für den Duschwasserverbrauch pro Person angerechnet.

Hinweis zu Speicher- und Verteilverlusten

Die berechneten Speicher- und Verteilverluste in der aktualisierten Energiebilanz des Lippe-Bades machen einen sehr geringen Anteil des Heizbedarfs für die TWW-Erwärmung aus. Im Lippe-Bad wird die Wasserhygiene durch eine Ultrafiltration und Chlordioxidanlage direkt am Hauseingang des Trinkwasserhauptanschlusses (vgl. [BGL 2011], S.72 ff) sichergestellt, so dass die Warmwasserspeicherung und -verteilung auf einem niedrigeren Temperaturniveau erfolgen kann. Das Monitoring zeigt Speichertemperaturen zwischen 40 °C und 45 °C. Diese Optimierung führt zu einer Einsparung von ca. 50 % der Speicher- und Verteilverluste gegenüber einer konventionellen Herangehensweise mit Beheizung des TWW auf 60°C. Es wurde zudem während der Planung darauf geachtet eine dauerhafte Zirkulation zu vermeiden, um Verteilverluste zu reduzieren.

5.1.4 Strom

Die Ermittlung des Strombedarfs ist nicht der primäre Bestandteil des PHPPs, insbesondere im Kontext der sehr speziellen Verbraucher eines Schwimmbades. Einzelne Bereiche können mit diesem Tool recht genau berechnet werden, so z.B. der Strombedarf für die Lüftung und die Beleuchtung. Der jährliche Gesamtstrombedarf der restlichen Verbraucher wird pauschal in der Energiebilanz eingetragen. Die Ermittlung dieses jährlichen Strombedarfs erfolgt bei einer so speziellen Gebäudenutzung unabhängig vom PHPP. Vor dem Hintergrund des bedeutenden Anteils an der Energieeffizienz eines Bades wird bei Folgeprojekten dringend empfohlen diese Berechnungen möglichst genau durchzuführen. Diese Aufstellung kann als Basis dienen, um Optimierungspotentiale zu identifizieren und soweit wie möglich auszuschöpfen. Es empfiehlt sich z.B. alle Pumpen aufzulisten und deren jährlichen Strombedarf auf Basis von erwarteten Laufzeiten und Stromaufnahme im Betriebspunkt abzuschätzen. Es sollten in jedem Fall möglichst effiziente Geräte ausgewählt werden.

Aus den Messdaten geht hervor (vgl. Abschnitt 4.8.3.1), dass die Hauptstromverbraucher im Hallenbad Lünen die Lüftungsgeräte darstellen, gefolgt von den Umwälzpumpen der drei Beckenkreisläufe („Großpumpen“) und der Summe aller restlichen Verbraucher („Diverse“), sowie Licht und Steckdosen. Mit der Energiebilanz aus der Planungsphase wurde eine ähnliche Gewichtung vorhergesagt (die Umwälzpumpen der Beckenkreisläufe waren damals jedoch nicht separat von der restlichen Schwimmbadtechnik aufgeführt). Ein Vergleich der Strombedarfsdaten in der ursprünglichen Energiebilanz mit den Verbrauchswerten ist nur bedingt möglich, da die Umsetzung an verschiedensten Stellen von der Planung abweicht. Dennoch wird in Abbildung 110 der ursprünglich angesetzte Strombedarf mit dem gemessenen Stromverbrauch für die verschiedenen Teilbereiche im Vergleich gezeigt. In Anbetracht der abweichenden Randbedingungen ist die Übereinstimmung der einzelnen Bereiche besser als erwartet. Für die Lüftung ist der gemessene Stromverbrauch etwas höher als der erwartete Bedarf. Dies ist plausibel, da der Messwert zusätzlich den in der Energiebilanz nicht explizit abgebildeten Stromverbrauch der Wärmepumpe enthält. Im Bereich der Schwimmbadtechnik waren zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Berichts [BGL 2011] noch relativ wenige Informationen bekannt, diese Berechnungen lagen daher bewusst auf der sicheren Seite. Vor diesem Hintergrund ist nachvollziehbar, dass die Messwerte in einer ähnlichen Größenordnung liegen, trotz der erhöhten Umwälzmengen. Für die restlichen Bereiche (Licht, Steckdosen, Sanitär und Heizung) ist die Übereinstimmung im Rahmen der möglichen Genauigkeit sehr gut. Dies setzt allerdings – wie im ersten Absatz erwähnt – eine sehr detaillierte Aufarbeitung der gesamten Ausstattung in der Planungsphase voraus.

Es bestehen in diesem Bereich des Endenergieverbrauchs in Lünen weiterhin Einsparmöglichkeiten gegenüber dem aktuellen Betrieb, die zum Teil mittels der Ener-

giebilanz aus der Planungsphase identifiziert werden konnten. Als Beispiel ist insbesondere der Strombedarf der Lüftung zu nennen, der stark von der realisierten Umluftmenge beeinflusst ist.

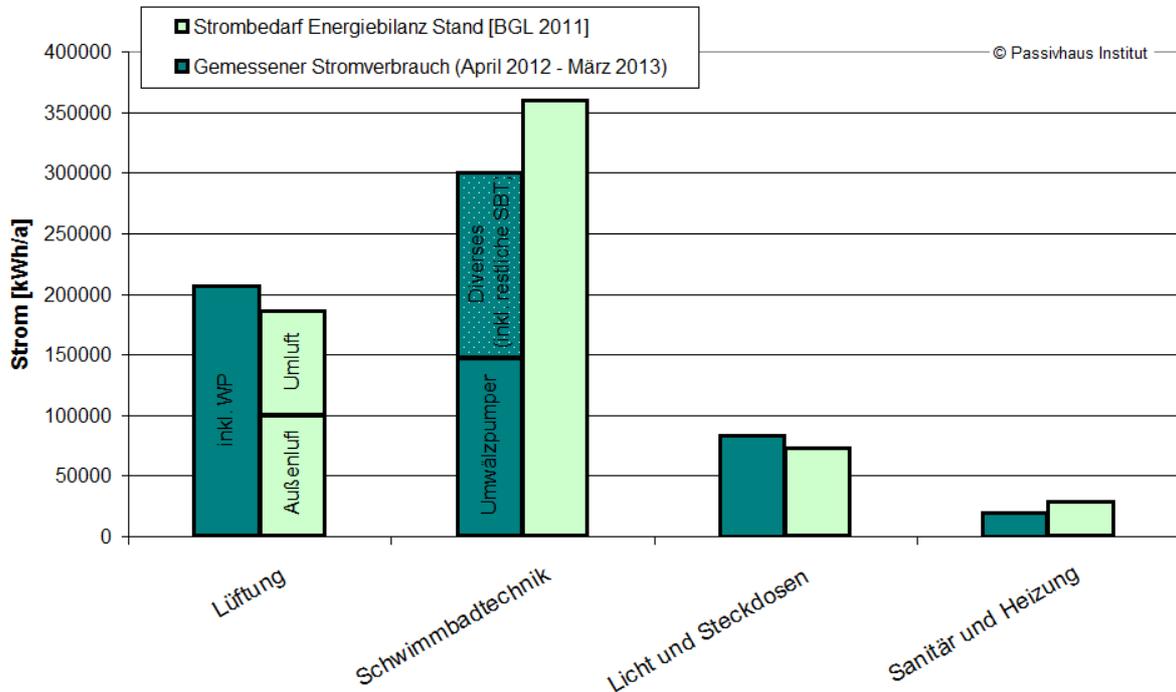


Abbildung 110: Gegenüberstellung des projizierten Strombedarfs während der Planungsphase mit den Messdaten aus dem Jahr April 2012 – März 2013 nach verschiedenen Teilbereichen.

5.2 Energiebilanzierung: Zusammenfassung & Aussichten

Die in diesem Kapitel aufgeführten Vergleiche zwischen den gemessenen Energieverbräuchen im Lünener Hallenbad und den berechneten Bedarfswerten der einzelnen Bereiche geben einen Einblick in die Komplexität der Energiebilanz eines Schwimmbades. Trotz der unumgänglichen Herausforderungen und Unsicherheiten konnte erfolgreich gezeigt werden, dass das speziell entwickelte Mehrzonen-PHPP für Hallenbäder für die Projektierung und Optimierung der Hauptenergieverbraucher sehr gut geeignet ist.

Das Tool wurde während der Planungsphase des Bades für die entstehenden Anforderungen angepasst und befindet sich auch weiterhin in der Entwicklungsphase. Die vorliegenden Messdaten aus dem Monitoring wurden verwendet, um die Annahmen, Ansätze und Berechnungsmethoden der Energiebilanz zu überprüfen und weiter zu verbessern. Lediglich eine größere Anpassung der Berechnungsannahmen war notwendig und zwar im Bereich der Beckenwassererwärmung (vgl.

Abschnitt 5.1.1). An dieser Stelle lagen die Messdaten deutlich unter den prognostizierten Werten. Die Hauptursache für diese Abweichung waren die während der Planungsphase bewusst zu hoch angesetzten Verdunstungsmengen, da keine verlässlichen Daten für eine plausible Einschätzung vorlagen. Da die Verdunstung einen großen Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz des Bades hat (Nachheizung der Verdunstungswärmeverluste sowie die erforderlichen Außenluftmengen zur Entfeuchtung), ist eine möglichst genaue Bestimmung dieser Größe besonders wichtig. Aus den vorliegenden Daten konnte die Größenordnung der Verdunstung ermittelt werden, genauere Analysen stehen jedoch noch aus. Die vorgestellten Messdaten bestätigen, dass die mittleren Stoffübergangskoeffizienten für die Verdunstung in der Praxis während den Nutzungsstunden deutlich niedriger ausfallen als in der [VDI 2089] zur Auslegung der Lüftungsgeräte (Spitzenlast) angegeben. Die ermittelte Größenordnung liegt zwischen ca. 20 % und 40 % der VDI-Auslegung, je nach betrachtetem Beckenkreislauf und gegebenen Randbedingungen. Das Monitoring hat zudem aufgezeigt, dass es weitere Einflussfaktoren gibt, die den Heizwärmebedarf der Beckenkreisläufe beeinflussen und in der Planungsphase nicht ausreichend berücksichtigt werden konnten, so z.B. die Abwärme der Schwimmer und Wärmeübergabe an der Wasseroberfläche.

Abgesehen von der Beckenwassererwärmung sind die Rechenergebnisse der Energiebilanz tendenziell niedriger als der gemessene Verbrauch. Der Jahresverlauf des Raumheizwärmebedarfs der verschiedenen Temperaturzonen sowie auch die Größenordnung der einzelnen Hauptverbraucher (Raumheizung, Wassererwärmung und Strom) werden korrekt abgebildet. Da sich die Messdaten auf einen Zeitraum beziehen, in dem das Bad in verschiedenen Bereichen noch einreguliert wurde und dadurch verschiedene Betriebsweisen realisiert wurden, lässt sich der Jahresverbrauch nicht vollständig mit den berechneten Bedarfswerten vergleichen. Abbildung 111 zeigt dennoch einen Vergleich der nachgeführten Energiebilanz, angepasst mit den beschriebenen Erkenntnissen aus dem Monitoring und den tatsächlichen Messwerten. Die Übereinstimmung ist gut, womit der Rechenansatz bestätigt wird.

Das Hallenbad hat trotz typischer Einregulierungszeit einen sehr guten Energiekennwert im ersten Messjahr erreicht. Die Maßnahmen aus der Planung haben den beabsichtigten Erfolg erzielt. Wie an verschiedenen Stellen in diesem Bericht analysiert, ist die energetische Optimierung hinsichtlich der Betriebsweise trotzdem noch nicht ausgeschöpft. In Abbildung 112 ist eine aktualisierte Energiebilanz für das Bad unter den angestrebten Randbedingungen (z.B. 64 % Hallenfeuchte, reduzierte Umluftvolumenströme, 70 % Filterspülwasseraufbereitung) aufgeführt. Da in einigen Bereichen noch Unklarheit für die Annahmen besteht, handelt sich auch hier um eine *orientierende* Berechnung. Für den Strombedarf der Schwimmbadtechnik (SBT), Beleuchtung und sonstigen Verbrauchern wurden an dieser Stelle die Messwerte aus dem Monitoring übernommen. Der Strombedarf der Lüftung wurde mit dem PHPP berechnet. Gegenüber den Messergebnissen aus dem Zeitraum April 2012 bis März

2013 ist laut dieser Abschätzung eine weitere Reduktion des Endenergiebedarfs um ca. 100 kWh/(m²a) möglich. Den größten Anteil macht hierbei die Einsparung durch die Filterspülwasseraufbereitung aus. Auch der Strombedarf kann durch Reduktion der Umluftmenge deutlich reduziert werden, was bei der primärenergetischen Betrachtung von hoher Relevanz ist.

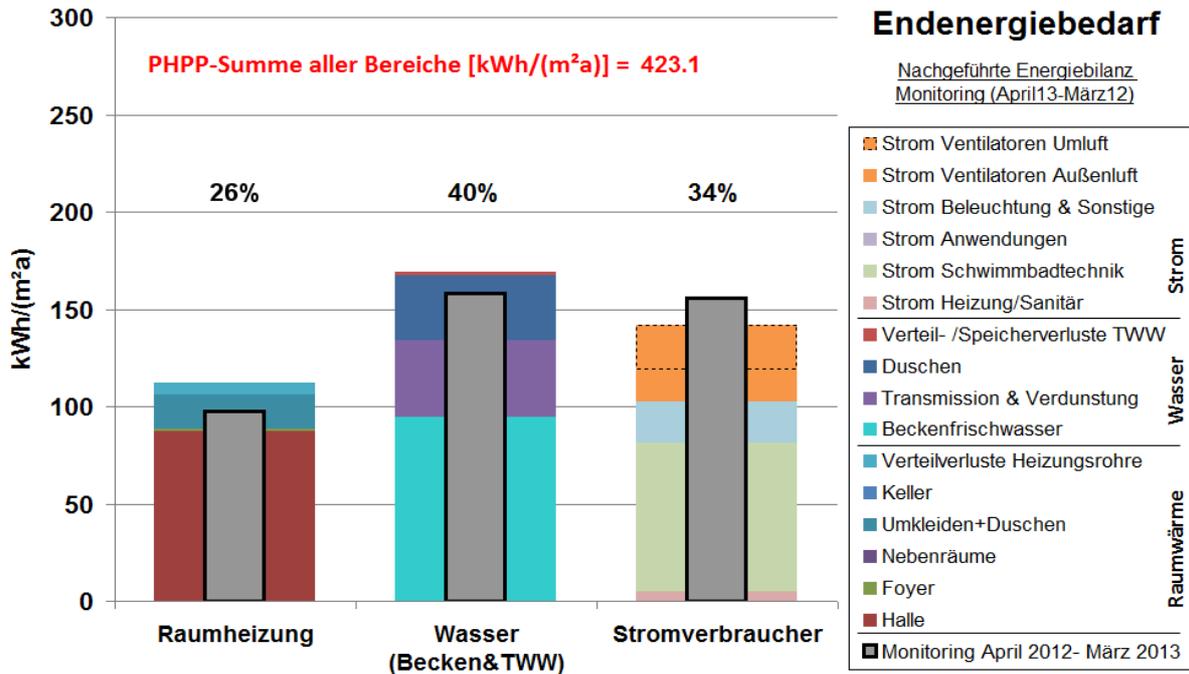


Abbildung 111: Nachgeführte Energiebilanz unter den gemessenen Randbedingungen des Winters 2012/2013 und weiteren Messdaten aus April 2012 bis März 2013. Eine genauere Übereinstimmung mit den Messdaten ist aufgrund der unstetigen Betriebsweise und verbleibenden Unsicherheiten einiger Annahmen nicht zu erwarten. Die Größenordnungen werden korrekt berechnet. Es handelt sich um spezifische Werte mit Bezug auf die Energiebezugsfläche.

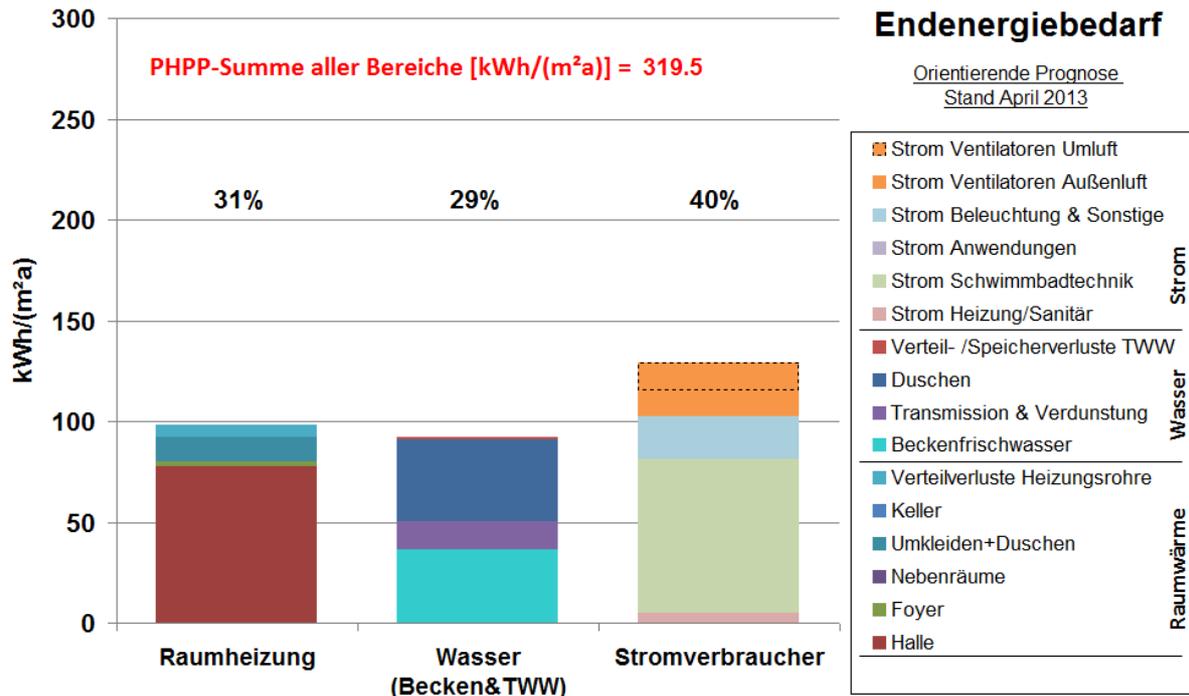


Abbildung 112: Prognose der Energiebilanz mit der empfohlenen Betriebsweise (zukünftiger Betrieb). Gegenüber der aktuellen Betriebsweise besteht weiteres Einsparpotential von ca. 100 kWh/(m²_{EBFA}), verursacht hauptsächlich durch die Wieder-Inbetriebnahme der Filterspülwasseraufbereitung.

Primärenergiebilanz

Wie bereits in Abschnitt 4.9 beschrieben, ist für eine abschließende energetische Bewertung der Primärenergiebedarf von Interesse. Die in diesem Abschnitt ausführlich beschriebene Endenergiebilanz ist hierfür die Grundlage. Als weiteren Schritt müssen die Energieerzeuger für die verschiedenen Verbraucher und die entsprechenden Primärenergiefaktoren angesetzt werden. Dass hierbei eine Verschiebung der Schwerpunkte auf den Strom gegenüber der Heizenergie eintritt wurde bereits in der Planungsphase erkannt und betont (vgl. [Schulz et. al. 2009] und [BGL 2011]). Die größte Unsicherheit bezüglich einer Berechnung des Primärenergiebedarfs besteht darin, vorherzusagen wie viel Energie von den unterschiedlichen Energieversorgern bereitgestellt wird. Hierfür wurden in der Planungsphase Abschätzungen getroffen, die sich in den Messdaten widerspiegeln.

6 Perspektiven

Das Lippe-Bad in Lünen ist eines der beiden ersten Pilotprojekte zur Umsetzung des Passivhauskonzeptes bei Hallenbädern. In gemeinschaftlicher Arbeit wurden bis zum jetzigen Standpunkt über mehrere Jahre die Grundlagen zum Energiekonzept entwickelt, diese dann im Planungsprozess angewendet und letztendlich im laufenden Badbetrieb Schritt für Schritt realisiert. Wie in diesem Bericht aufgezeigt, wurden die ersten wesentlichen Meilensteine erreicht und wichtige Erkenntnisse zum Betrieb eines energieoptimierten Hallenbades gewonnen.

Die umfangreichen Messdaten aus dem Untersuchungszeitraum wurden im Detail ausgewertet, um grundlegende Fragestellungen zu betrachten. An einigen Punkten konnte weiterer Forschungsbedarf festgestellt werden. Das Potential der energetischen Optimierungsmaßnahmen des Bades ist nach diesem ersten Monitoringzeitraum noch nicht endgültig ausgeschöpft. Aufgrund der vorhandenen umfangreichen Messtechnik, dem guten Verständnis der komplexen Gebäudetechnik und deren Regelung bietet das Lippe-Bad jetzt ideale Voraussetzungen für die systematische Klärung weiterer Fragestellungen zum Betrieb energiesparender Hallenbäder. Zukünftige Versuchsreihen bieten ein hohes Potential weitere Perspektiven der Energieeffizienz in Hallenbädern voranzutreiben. Einige beispielhafte Vorhaben für Versuche und weiterführende Analysen im Lippe-Bad sind:

- Dauerhafte Umsetzung der reduzierten Zuluftvolumenströme für die Hallenbereiche zur Reduktion des Stromverbrauchs. Test zum Nachtbetrieb der Lüftungsanlagen ausschließlich zum Feuchteschutz (erhöhte Feuchte / reduzierte Temperatur).
- Untersuchung des energetischen Einflusses der alternativen Lüftungsregelungsstrategie „Entfeuchtung über Umluft mit WP“ für die Hallen.
- Weiterführung der systematischen Untersuchungen zur Verdunstung (z.B. Einfluss der Hallenfeuchte, der Schwimmer etc.)
- Erarbeitung von Optimierungsempfehlungen für die Belüftung der Duschen und Umkleiden.
- Weiterführende Analyse und Optimierungsmöglichkeiten beim Einsatz einer Wärmepumpe zur Nutzung der Fortluftenthalpie.
- Potentiale durch Optimierung der Beckenwasserumwälzung (z.B. Nachtabsenkung, Umwälzung unter Wasser) – Einfluss auf die Verdunstung und den Stromverbrauch der Pumpen.
- Weiterführende Betrachtungen zur Energiebilanz der Beckenwasserkreisläufe (z.B. Wärmeabgabe der Schwimmer, Wärmeübergang an der Wasseroberfläche). Die verschiedenen Einflussparameter wurden im Rahmen dieses Berichts erläutert, konnten jedoch nicht präzisiert werden.

- Weiterentwicklung des Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP) für zukünftige Energiebilanzierung bei der Planung von Hallenbädern. Ein solches Werkzeug ist bisher nicht vorhanden und ist unabdingbar zur Beurteilung von Energieeinsparmaßnahmen. Zur Zeit befindet sich die PHPP-Mehrzonenversion in der Entwicklungsphase.
- Luftqualität: Weiterführung der Untersuchung zu Auswirkung unterschiedlicher Lüftungsstrategien auf die Luftqualität (Desinfektionsnebenprodukte).
- Untersuchung des Warmwasserverbrauchs an den Zapfstellen (Duschköpfen) zur Bewertung und Optimierung der Wärmeverluste und Auslastung der Duschköpfe.

Wie bereits weiter oben geschildert, ist gegenüber den aktuellen Messergebnissen dieser Untersuchung eine weitere Reduktion des Endenergiebedarfs in der Größenordnung von etwa 100 kWh/(m²a) möglich. Das entspricht einer potentiellen Reduktion von etwa nochmals 25 % der jetzt bilanzierten Endenergie.

7 Literaturangaben

- [ages 2007] Zeine, Carl (Projektleiter): **Verbrauchskennwerte 2005**, Energie- und Wasserverbrauchskennwerte in der Bundesrepublik Deutschland. Ages GmbH, Münster 2007
- [BGL 2011] Ahrens, Olaf; Beckert, Stefan; Franke, Thomas; Grove-Smith, Jessica; Hitz, Andreas; Horstmann, Wolfgang; Kah, Oliver; Koch, Gerd; Krick, Benjamin; Ostermann, Uwe; Peper, Søren; Pöter, Markus; Schulz, Tanja; Bramey, Frank: **Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie**, Bädergesellschaft Lünen, Lünen 2011, www.baeder-luenen.de
- [DGfdB R 60.04] DGfdB R 60.04: **Einsparung natürlicher Ressourcen in Bädern**. Deutsche Gesellschaft für das Badewesen, 2002
- [DIN 19643] DIN 19643 – Teil 1: Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin April 1997
- [DIN EN ISO 6946] DIN EN ISO 6946: **Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient**. Berechnungsverfahren, Beuth Verlag, November 1996.
- [Dubbel 1997] Begr. Von H.Dubbel, Hrsg. Beitz, Wolfgang & Grote, Karl-Heinrich: **Dubbel Taschenhandbuch für den Maschinenbau**; 19. Auflage, Springer-Verlag, 1997.
- [DYNBIL] Feist, Wolfgang: Dynbil, Programm zur hygrothermischen, dynamischen Simulation von Gebäuden. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2011.
- [Funcke 2013] Funcke, Markus: **Prüfbericht zur Untersuchung von Trihalogenmethanen (THM) in Luft- und Badewasserproben**. Lehr- und Versuchsgesellschaft für innovative Hygienetechnik GmbH (LVHT GmbH). 15.05.2013, Mülheim a.d. Ruhr
- [Gemis] Fritsche, U.; Leuchtner, J.; Matthes, F.C.: **Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)**, Version 4.6, Öko-Institut, Darmstadt September 2005
- [Heiden/Meyrahn 2012] Heiden, I.; Meyrahn, F.: **Wirtschaftsfaktor Sportstätte** - Präsentation der Ergebnisse „Bäder“. Teilergebnisse zum Satellitenkonto Sport (Deutschland). Zugrundeliegende Basisstudie im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2hm, Stuttgart, Oktober 2012

- [Marées] de Marées, Horst: **Sportphysiologie**; Sportverlag Strauß, Köln, 2003. ISBN: 3-939390-00-3
- [PHPP] W. Feist, R. Pfluger, J. Schnieders, O. Kah; B. Kaufmann; B. Krick; Z. Bastian und W. Ebel: **PHPP Passivhaus Projektierungs Paket Version 7 (2012)**. Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser; Passivhaus Institut; Darmstadt 2012
- [Schlesiger 2001] Schlesiger, G.: Energie- und wassersparende Maßnahmen in Bädern. In: Bundesinstitut für Sportwissenschaft, 2001
- [Schulz et al. 2009] Schulz, Tanja; Pfluger, Rainer; Grove-Smith, Jessica; Kah, Oliver; Krick, Benjamin: **Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad**, Passivhaus Institut Darmstadt, 2009
www.passiv.de
- [VDI 2089] VDI 2089, Blatt 1: **Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern**, Hallenbäder. Entwurf, September 2008
- [VDI 2089- Blatt 2]. VDI 2089, Blatt 2: **Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern - Effizienter Einsatz von Energie und Wasser in Schwimmbädern**; Verbrauchskennzahlen, 2008
- [Wibera 2010] Wibera Wirtschaftsberatung Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfungsgesellschaft: „Gutachten zur Bestimmung des Primärenergiefaktors der Fernwärmeversorgung der Stadtwerke Lünen GmbH für das Jahr 2010“, Düsseldorf, 11.01.2010

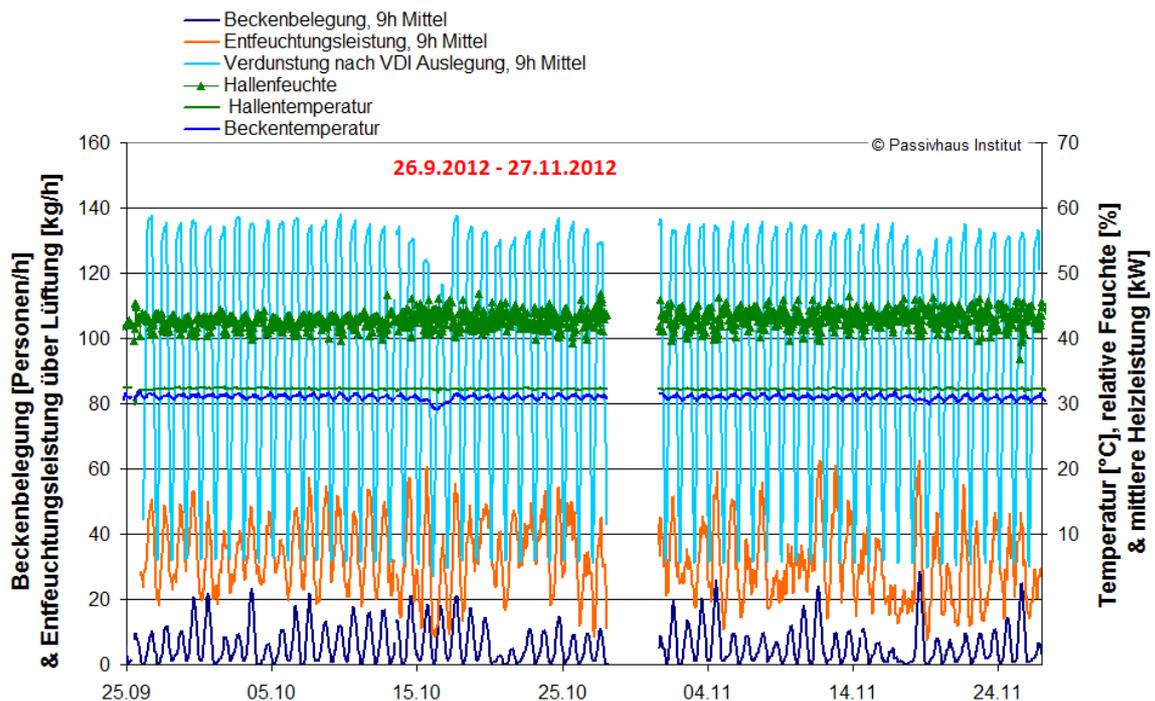
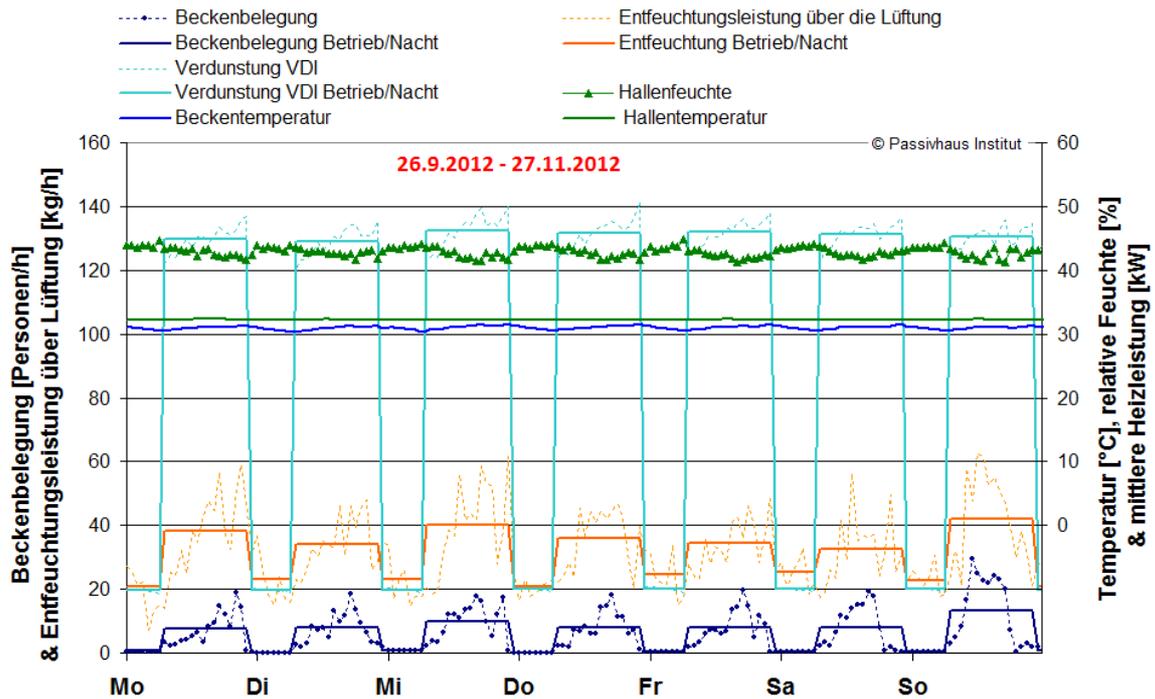


Spritz-Robbe im Eltern-Kind-Becken

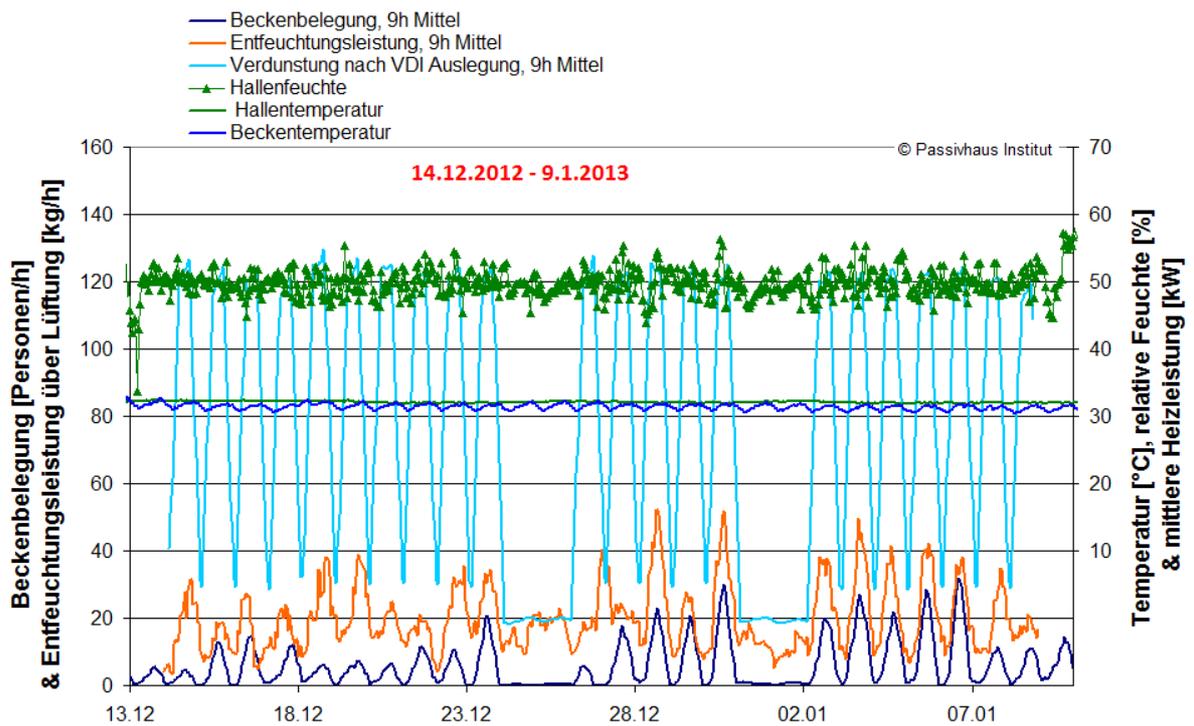
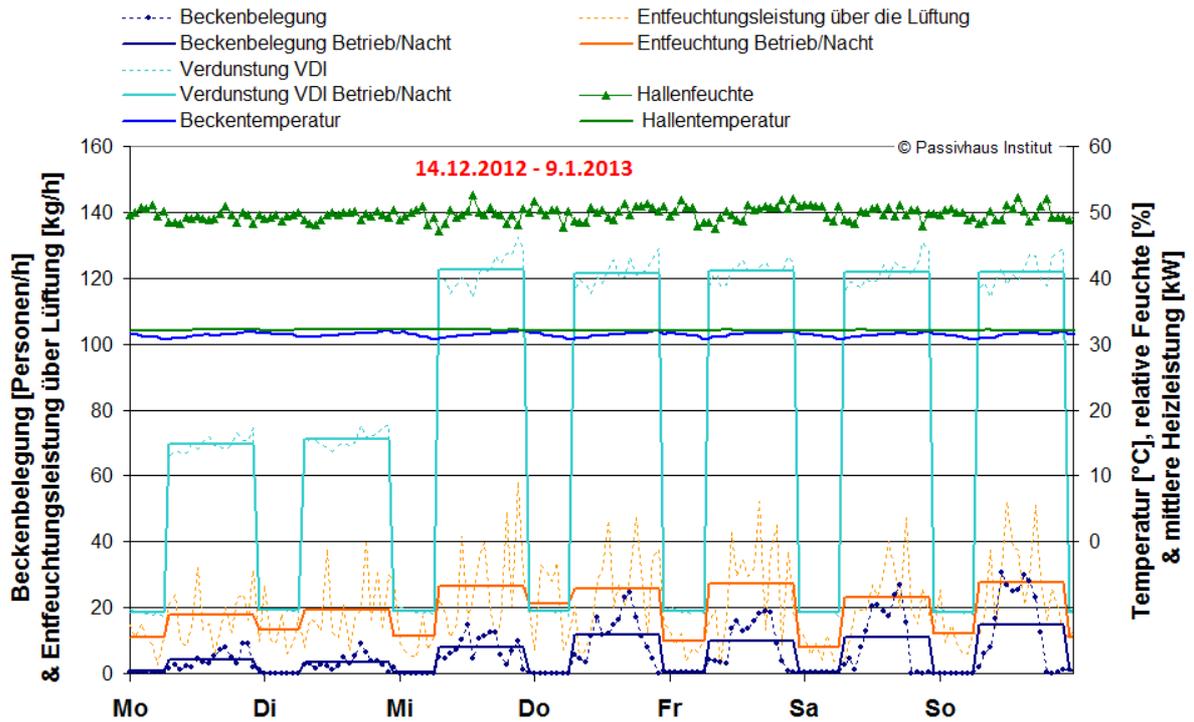
8 Anhang: Entfeuchtungsleistung im Verlauf

In den folgenden Darstellungen sind je Halle zwei Zeiträume mit jeweils unterschiedlichen Randbedingungen (Hallenfeuchten, Temperaturen) als Durchschnittswerte der Wochenstunden (Mittelwerte aller Messwerte einer Größe je Wochentag und Stunde gemittelt) und im Zeitverlauf (Stundendaten) dargestellt. Hiermit ist der Vergleich zwischen den Entfeuchtungsleistungen (berechnet aus Messdaten) und den maximalen Verdunstungsmengen nach VDI 2089 möglich.

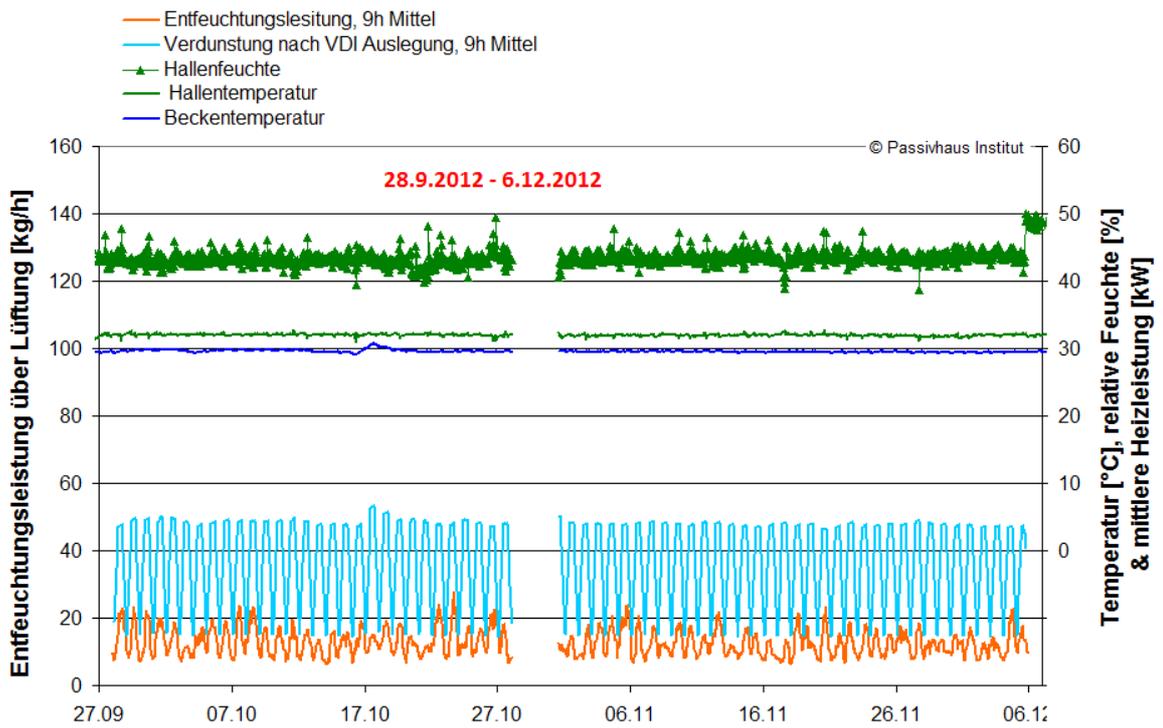
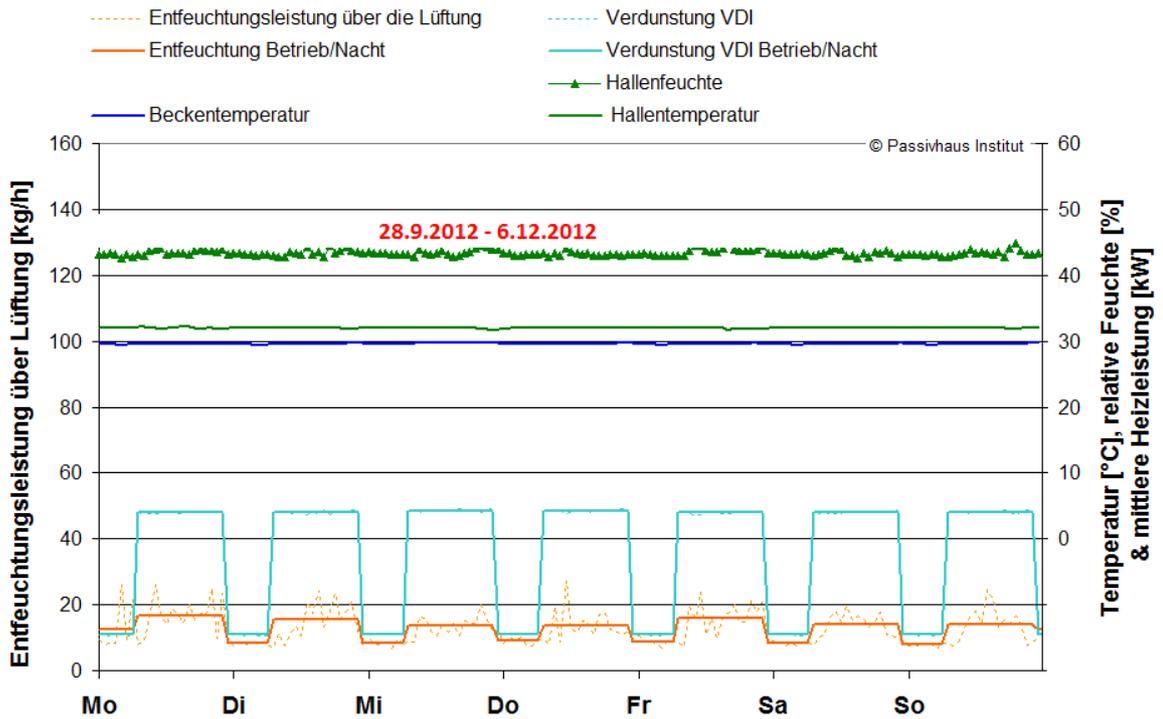
Halle 1+2



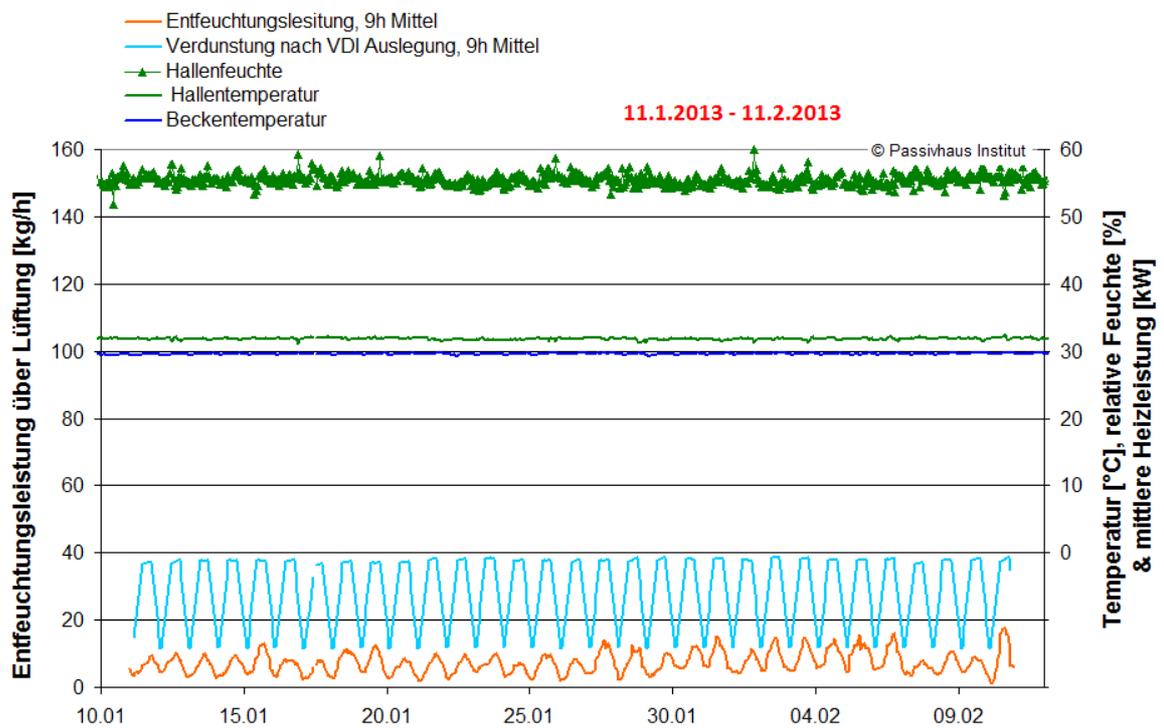
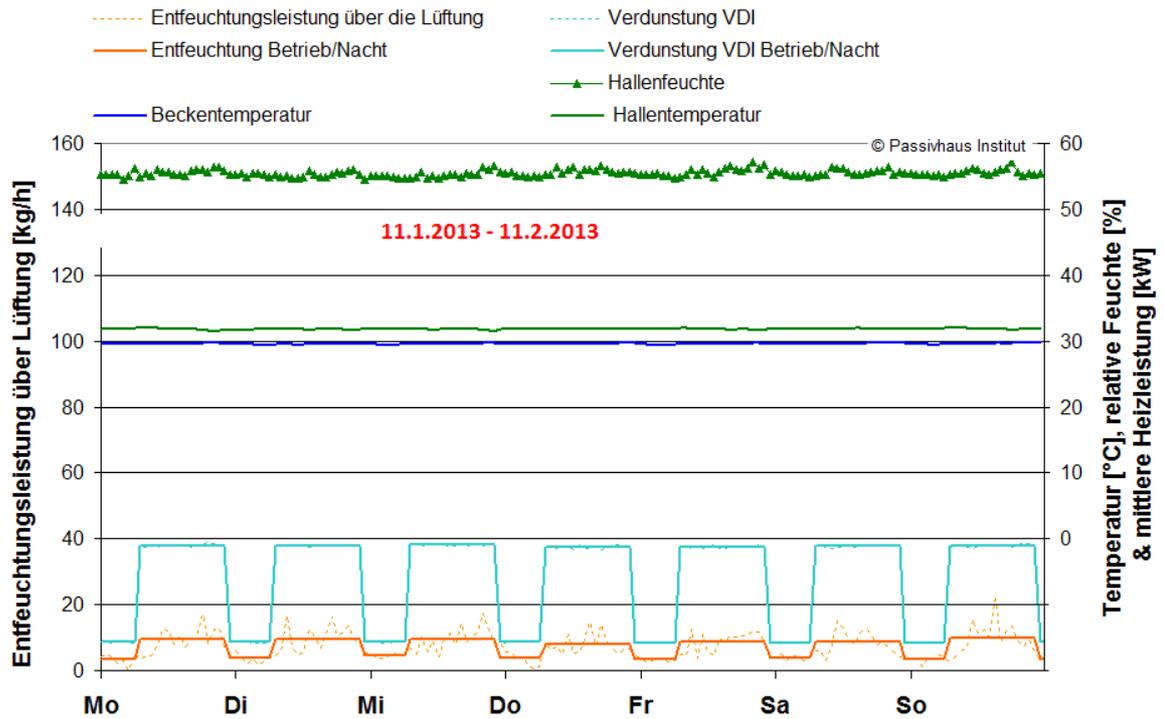
Fortsetzung **Halle 1+2**



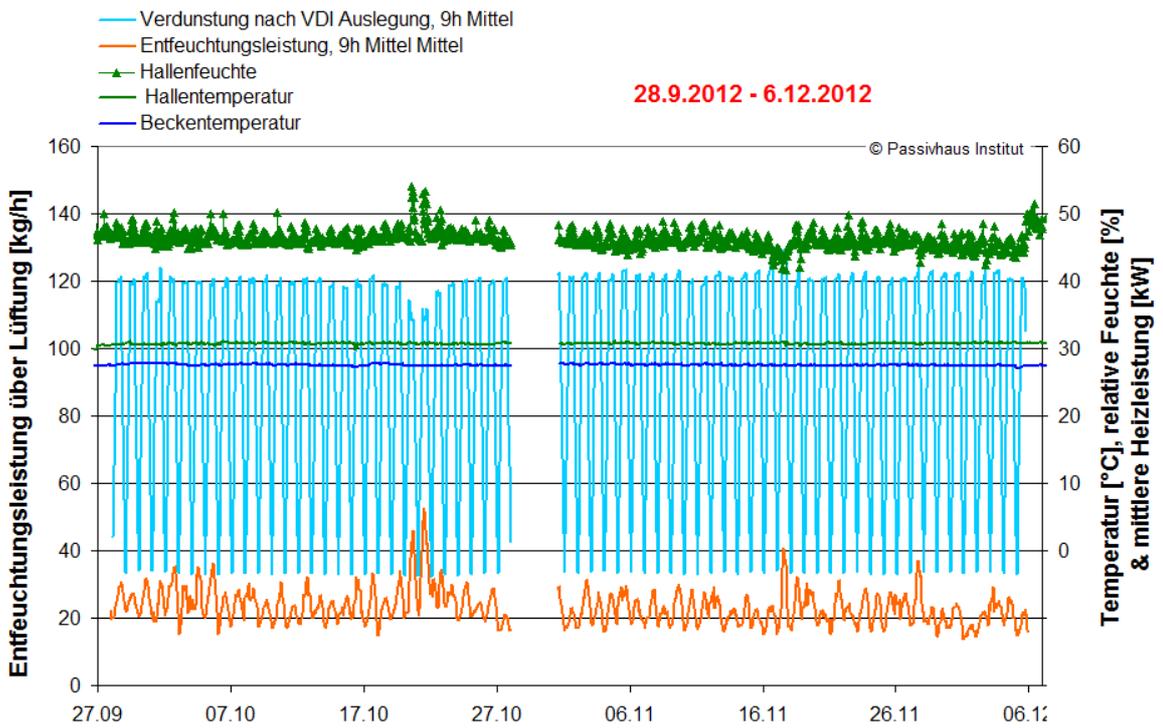
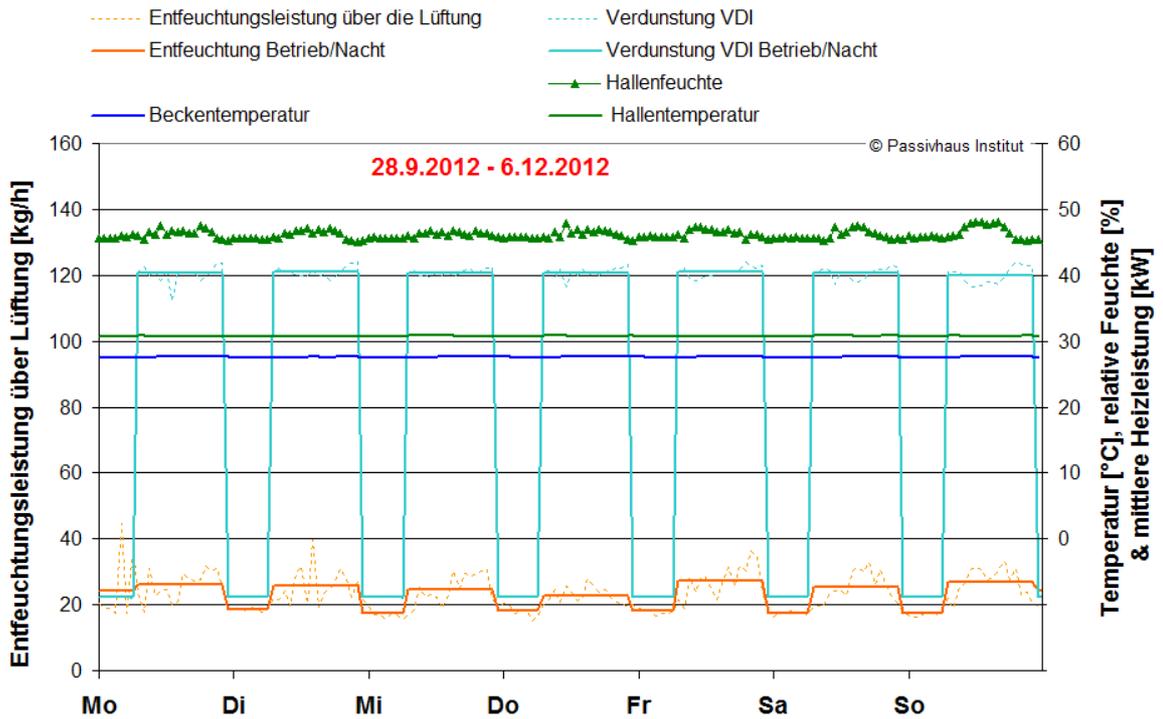
Halle 3



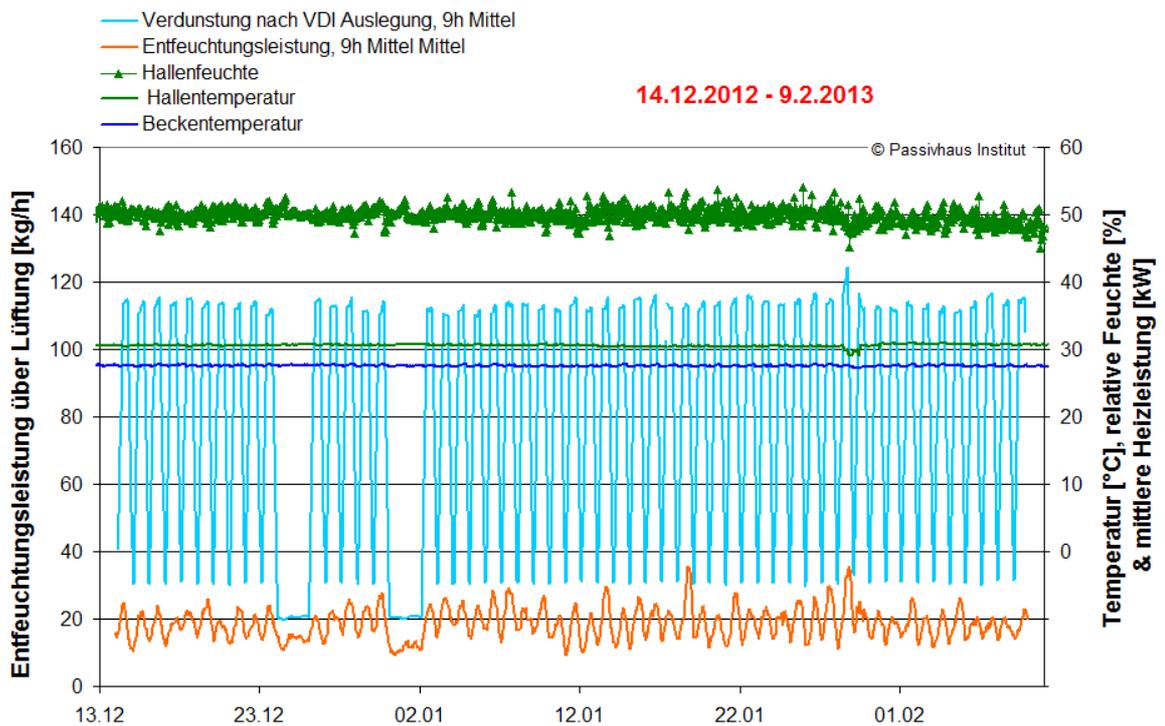
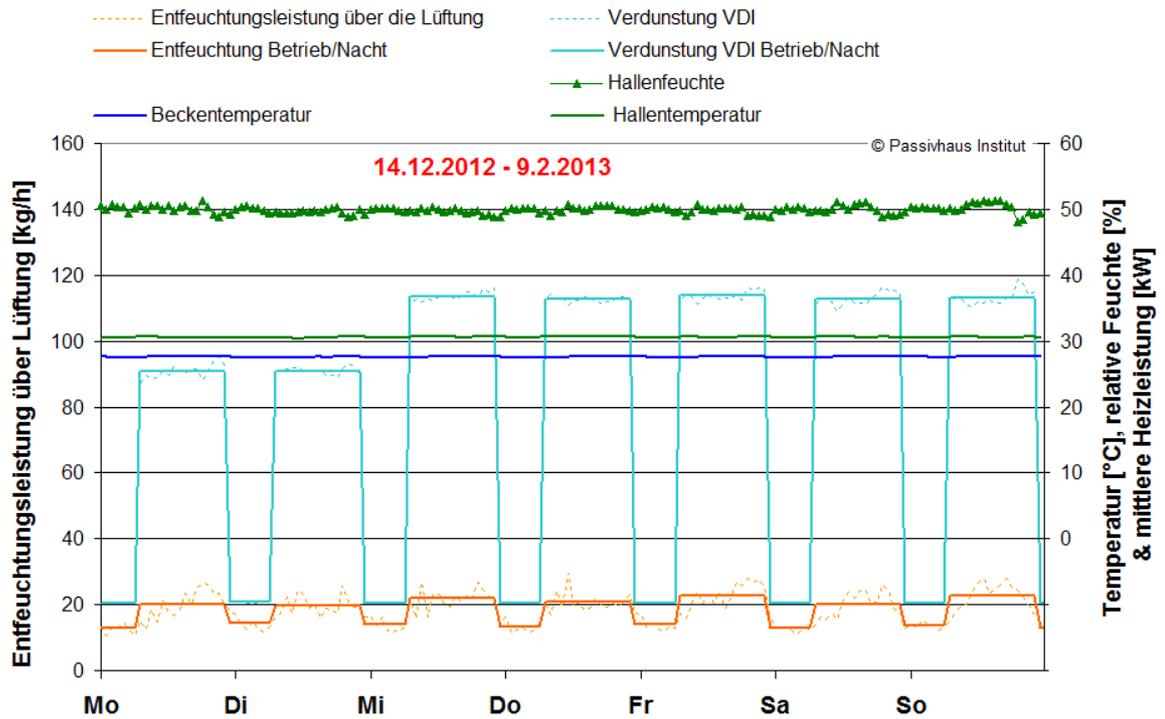
Fortsetzung **Halle 3**



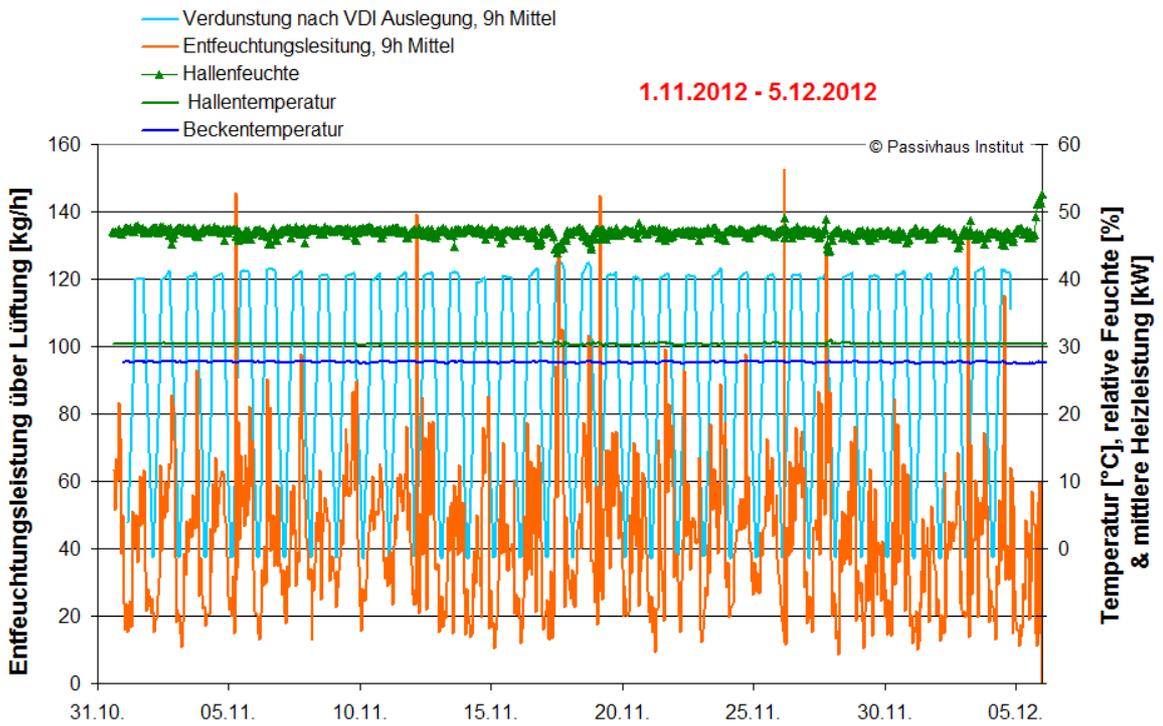
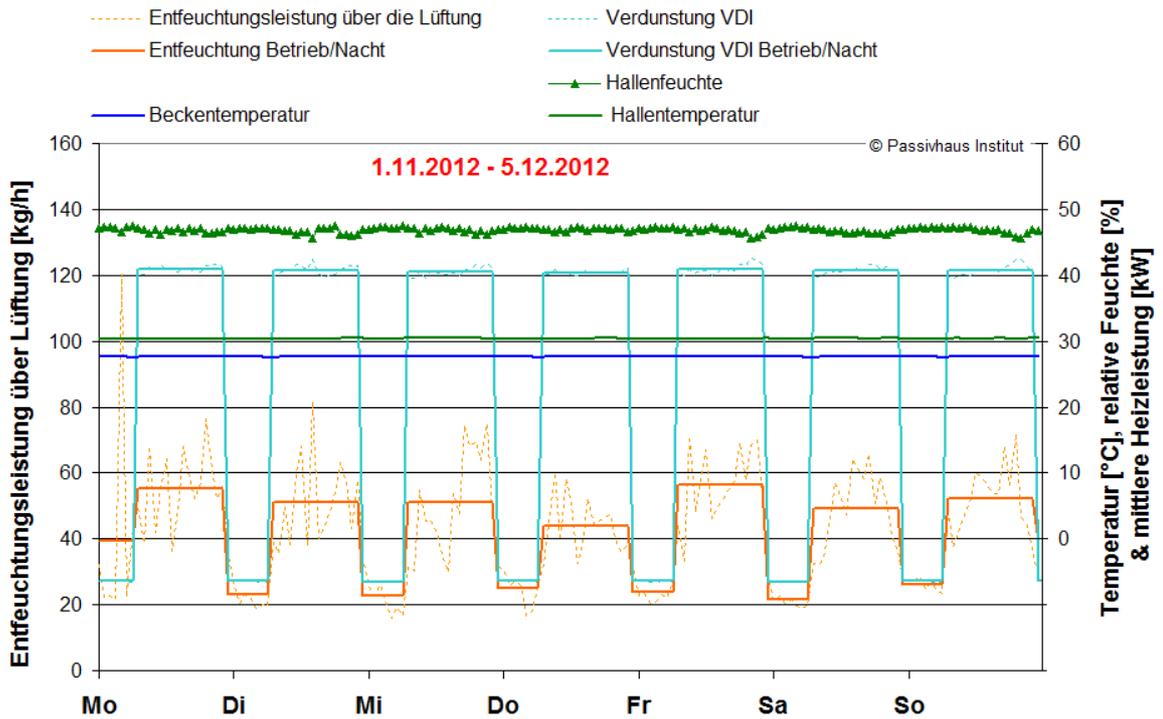
Halle 4



Fortsetzung **Halle 4**



Halle 5



Fortsetzung **Halle 5**

