

Passivhaus-Konzept für Hallenbäder: Datenauswertung und Empfehlungen



Auftraggeber:
Deutsche Bundesstiftung Umwelt



Mit Unterstützung durch:



Juni 2018

Passivhaus-Konzept für Hallenbäder: Datenauswertung und Empfehlungen

<p>Autoren: Dipl.-Ing. Esther Gollwitzer MPhys. (Hons) Jessica Grove-Smith Dipl.-Ing. (FH) Søren Peper</p> <p>Unter Mitarbeit von: Tim Huyeng Olaf Ahrens (Eneratio; Hamburg) Jörn Kaluza (Inco; Aachen)</p> <p>Herausgeber:</p>  <p>Rheinstraße 44/46 D-64283 Darmstadt Tel: 06151-82699-0 E-Mail: mail@passiv.de www.passiv.de</p> <p>Darmstadt, Juni 2018</p>	<p>Dieser Bericht entstand im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Förderkennzeichen: 33217/01-24/2</p> <p>Titel des Forschungsprojektes: Wissenschaftliche Auswertung des Betriebsverhaltens des ersten Passivhaus-Hallenbades zur Generierung weiterer Planungssicherheit.</p> <p>Wir danken der Bädergesellschaft Lünen, den Stadtwerken Bamberg sowie der Bädergesellschaft Düsseldorf für die diversen Unterstützungen und die Möglichkeit, Untersuchungen an ihren Bädern durchführen zu können und die Daten für die Untersuchung verwenden zu dürfen. Vielen Dank auch an die Firma FlaktGroup Deutschland GmbH.</p> <p>Alle Abbildungen und Grafiken dieses Berichtes sind Eigentum des Passivhaus Instituts. Abweichend sind jeweils die Quellen angegeben.</p>
--	--

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Lippe-Bad: Kurzbeschreibung.....	3
3	Lippe-Bad: Langzeitauswertung Energieverbrauch.....	1
3.1	Langzeit Wärmeverbrauch	1
3.2	Langzeit Stromverbrauch	9
4	Lippe-Bad: Gebäudehülle	16
4.1	Luftdichtheit	16
4.2	Thermographische Untersuchung	17
5	Lüftung: Leitfaden	24
5.1	Leitfaden Lüftung in der Schwimmhalle.....	24
5.2	Leitfaden Lüftung Nebenzonen	30
6	Lüftung: Ausgewählte Fragestellungen	32
6.1	Auslegung der Schwimmhallen-Lüftungsgeräte	32
6.2	Lippe-Bad: Versuche zur Hallenlüftung.....	40
6.2.1	Versuche mit geänderter Hallenfeuchte	40
6.2.2	Versuch zur Reduzierung des Umluftvolumenstroms.....	48
6.2.3	Stromeinsparung durch reduzierte Umluft	50
6.3	Lippe-Bad: Versuch Duschbereich ohne Luftnacherhitzung	51
6.4	Luftführung in der Schwimmhalle (CFD Simulationen).....	52
6.5	Schadstoffmessungen (THM).....	57
6.5.1	Messablauf.....	58
6.5.2	THM-Messungen Bambados.....	59
6.5.3	THM-Messungen Lippe-Bad	65
6.5.4	THM-Messungen Familienbad Niederheid.....	70
6.6	Programmierung Lüftungsgerät Schwimmhalle	73
7	Schwimmbadtechnik: Leitfaden	79
7.1	Beckenwasserumwälzung	79
7.2	Wasserattraktionen	81
7.3	Heizwärmebedarf Beckenwasser.....	82
7.4	Weitere Einsparpotentiale Schwimmbadtechnik	83

8	Schwimmbadtechnik und Sanitär: Ausgewählte Fragestellungen	84
8.1	Stromverbrauch Umwälzpumpen.....	84
8.2	Frischwasserverbrauch Beckenwasser.....	90
8.3	Lippe-Bad: Spülwasseraufbereitung	93
8.4	Verdunstung	98
8.5	Energieverbrauch Erwärmung Beckenwasser	102
8.6	Lippe-Bad: Duschnutzung.....	110
9	Kosten-Nutzen-Analyse	112
9.1	Spülabwasseraufbereitung.....	114
9.2	Abwärmenutzung BHKW.....	116
9.3	Temperatursenkung der Warmwasserzirkulation.....	117
9.4	Reduktion der Druckverluste im Beckenkreislauf.....	118
9.5	Bedarfsgeregelte Beckenumwälzung.....	121
9.6	Wassersparende Duschköpfe	122
9.7	Wärmerückgewinnung aus Beckenabwasser	124
10	Inbetriebnahme und Betriebsführung	127
10.1	Messtechnik und GLT	127
10.2	Inbetriebnahme	133
10.3	Betriebsführung und Betriebsoptimierung.....	137
11	Zusammenfassung	144
12	Literaturverzeichnis	151

1 Einleitung

Die Nutzung von Hallenbädern ist ein beliebtes, der Gesundheit dienendes Freizeit- und Sportangebot. Der Betrieb eines konventionellen Bades ist jedoch sehr energieintensiv und damit kostenaufwendig. Viele Kommunen stehen immer öfter vor der Frage, wie sie ihr Angebot weiterhin aufrechterhalten können. Die Verringerung der Betriebskosten von Hallenbädern ist daher ein dringendes Anliegen. Ein vielversprechender Ansatz hierfür ist die signifikante Steigerung der Energieeffizienz. Viele öffentliche und private Betreiber von Hallenbädern haben bereits ihr Interesse am Neubau höchst effizienter Hallenbäder oder an der Verbesserung der Energieeffizienz bestehender Bäder bekundet, einzelne sind realisiert oder in Bau.



Abb. 1: Die beiden ersten - 2011 fertig gestellten - Passivhaus-Hallenbäder Bambados in Bamberg (links) und Lippe-Bad in Lünen (rechts).

Die bisherigen Studien und Betriebserfahrungen aus den beiden ersten Passivhaus-Hallenbädern bestätigen, dass mit der Umsetzung des Passivhauskonzeptes für Hallenbäder erhebliche Einsparungen erzielt werden können. Es ist daher zielführend diesem Konzept weiter nachzugehen, es zu festigen und somit eine breite Anwendung zu ermöglichen. Aus den vorhergehenden Projekten konnten bereits wichtige wegweisende Erkenntnisse gewonnen werden. Jedoch ist auch klar, dass die Einsparpotentiale bei den zwei Pilotprojekten noch nicht vollends ausgeschöpft werden konnten. Mit diesem Bericht und dem zugehörigen Leitfaden wird das gewonnene Wissen aufgearbeitet, damit es in zukünftigen Projekten zielgerichtet angewendet werden kann, um weitere Energieeinsparpotentiale zu erschließen.

Das Lippe-Bad in Lünen und das Bambados in Bamberg wurden in Anlehnung an die Konzepte aus der „Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzeptes im öffentlichen Hallenbad“ des Passivhaus Instituts (PHI) aus dem Jahre 2009 errichtet [Schulz et al. 2009]. Diese Untersuchung entstand auf Anregung der Bädergesellschaft Lünen mit Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU). Der Bau selbst wurde dann mit dem Projekt „Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades im Konzepten der Passivhaustechnologie“ begleitet [BGL 2011]. Diese Planungsbegleitung im Auftrag der Bädergesellschaft Lünen wurde ebenfalls von der DBU gefördert. Das Hallenbad wurde im September 2011 eröffnet. Zur Überprüfung der Planungsdaten in der Realität

sowie der Betriebsoptimierung schloss sich ein wissenschaftliches Monitoring des Hallenbades im ersten Betriebsjahr an (Förderung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, BMU). Der zugehörige Endbericht vom Monitoring wurde im August 2013 vorgelegt [Peper/Grove-Smith 2013].

Es zeigt sich, dass Aufgrund der komplexen Technik eines Hallenbades die ersten eineinhalb Betriebsjahre zur Einregulierung benötigt wurden und diverse technische Fragen geklärt werden mussten. Trotz des sehr positiven Ausgangs des Monitorings konnten noch nicht alle geplanten Einsparmöglichkeiten in der Betriebsweise (z.B. höhere Feuchte der Hallenluft, Reduktion der Luftmengen) vollständig umgesetzt werden und es sind offene Fragestellungen verblieben. Aus diesem Grund wurde das Monitoring wieder aufgegriffen, insbesondere um die gewonnenen Erkenntnisse für die Anwendung in zukünftige Projekte und somit für die Verbreitung der Energieeffizienz im Bäderbereich aufzuarbeiten.

Parallel zu dem Bad in Lünen wurde das zweite Passivhaus Hallenbad „Bambados“ in Bamberg in der Planung vom PHI begleitet und während der ersten Betriebsjahre vom PHI untersucht. Der Bericht zum Monitoring des Freizeitbades wurde Anfang September 2015 fertiggestellt [Gollwitzer et al. 2015]. Zurzeit (2018) entsteht ein weiteres großes Passivhaus-Hallenbad in der Süd-Englischen Stadt Exeter, bei dem das PHI ebenfalls umfangreiche Beratungen durchführt.

Dieser Bericht beinhaltet Versuche und Messungen an bestehenden Bädern, eine Kosten-Nutzen-Analyse verschiedener Maßnahmen und Planungsempfehlungen (Leitfäden) für zukünftige Bäder. Als Zusammenfassung stehen außerdem ein Kurzleitfaden sowie ein ausführlicher Leitfaden für Passivhaus-Hallenbäder zur Verfügung. Alle genannten Berichte und Leitfäden stehen zum kostenlosen Download auf der Homepage des Passivhaus Instituts zur Verfügung:
http://passiv.de/de/05_service/03_fachliteratur/030306_hallenbad.htm

2 Lippe-Bad: Kurzbeschreibung

Da ein Großteil der Untersuchungen in diesem Bericht sich auf das Lippe-Bad bezieht, erfolgt hier eine Kurzvorstellung des Projekts. Details zum Planungsprozess sind in [BGL 2011] dokumentiert, sowie erste Monitoringdaten in [Peper/Grove-Smith 2015].

Das Lippe-Bad 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.

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, Becken 1+2), ein Lehrbecken (100 m², Becken 3) mit Hubboden sowie zwei Sportbecken (25 m) mit insgesamt 9 Bahnen (260 m², Becken 4 und 315 m², Becken 5). In Abb. 2 ist eine Außenansicht des Gebäudes abgebildet und Abb. 3 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses mit den verschiedenen Hallenbereichen, den nach Norden angrenzenden Duschen und Umkleiden, sowie dem nach Westen orientierten Foyer. Der südliche Gebäudeabschnitt, angrenzend an Halle 5, wurde direkt an einen Altbaubestand angebaut (früheres Heizwerk), in dem sich heute das Schalthaus mit der Elektroverteilung zur Versorgung für einen Teil der Stadt Lünen befindet. Die Gebäudehülle des Neubaus sowie des Altbaus wurde in Passivhausqualität ausgeführt (U-Werte der Wand ca. 0,11 W/(m²K).



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

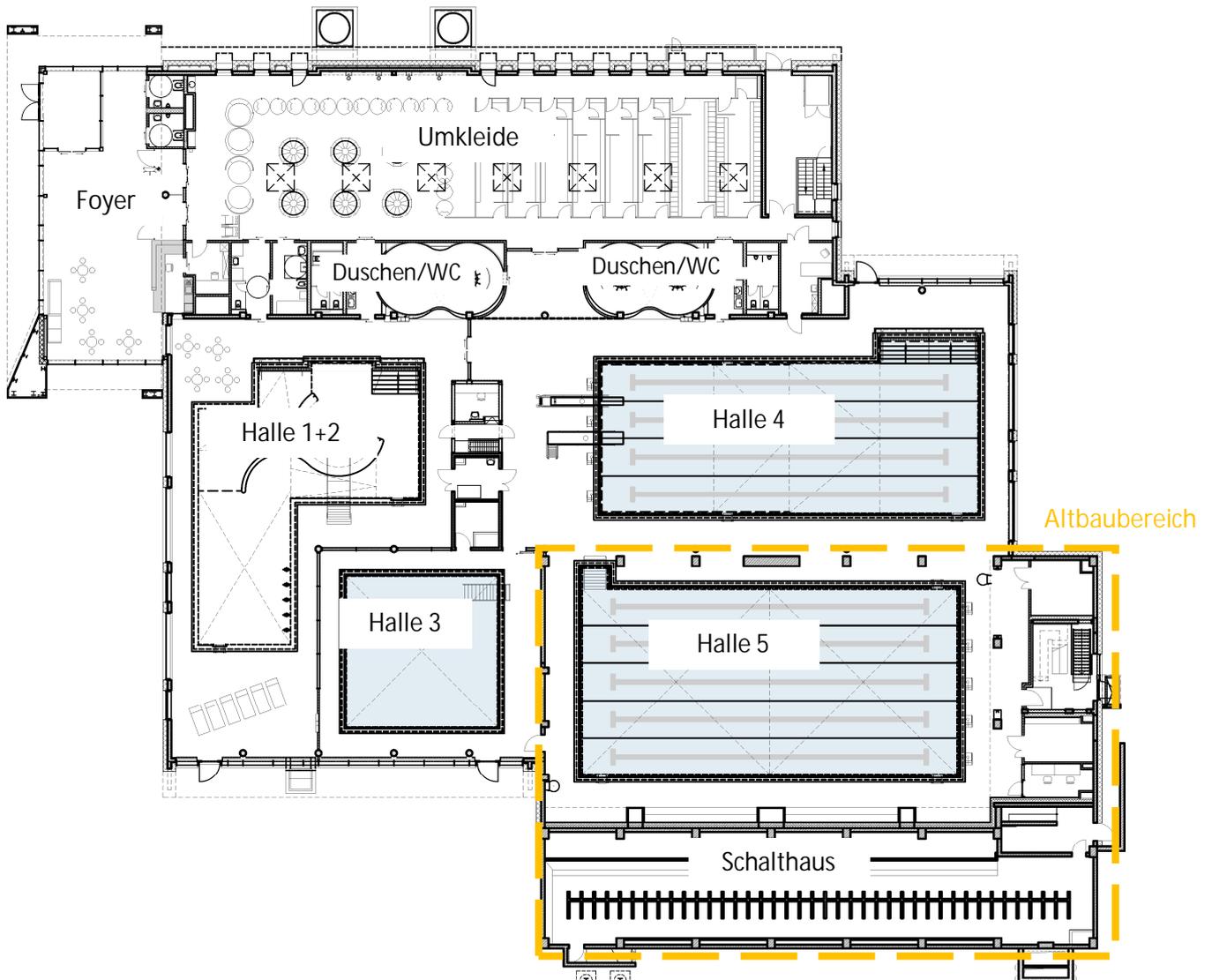


Abb. 3: EG Grundriss des Gebäudes mit den unterschiedlichen Nutzungsbereichen (Quelle: npstv)

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. Tab. 1 enthält eine Übersicht aller Lüftungsgeräte und Abb. 4 eine schematische Darstellung der Lüftungstechnik. Das Gerät für Halle 1+2 verfügt über eine Wärmepumpe mit Verdampfer (Wärmequelle) in der Fortluft nach dem Plattenwärmetauscher und dem Kondensator im Zuluftstrom vor dem Nachheizregister. Für den Bereich Umkleide/Duschen gibt es Stützventilatoren und zusätzliche Nachheizregister im Keller, welche den Lufttransport von den Umkleiden in die Duschen mit erhöhter Lufttemperatur sicherstellen. In den Bereichen Foyer und Umkleide bzw. Duschen sind CO₂- bzw. Feuchtesensoren mit einer entsprechenden Regelung realisiert worden. Damit werden geringere Volumenströme als im normalen Regelbetrieb möglich.

Tab. 1: Übersicht Lüftungsgeräte (Bereiche, Typen und Volumenströme)

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

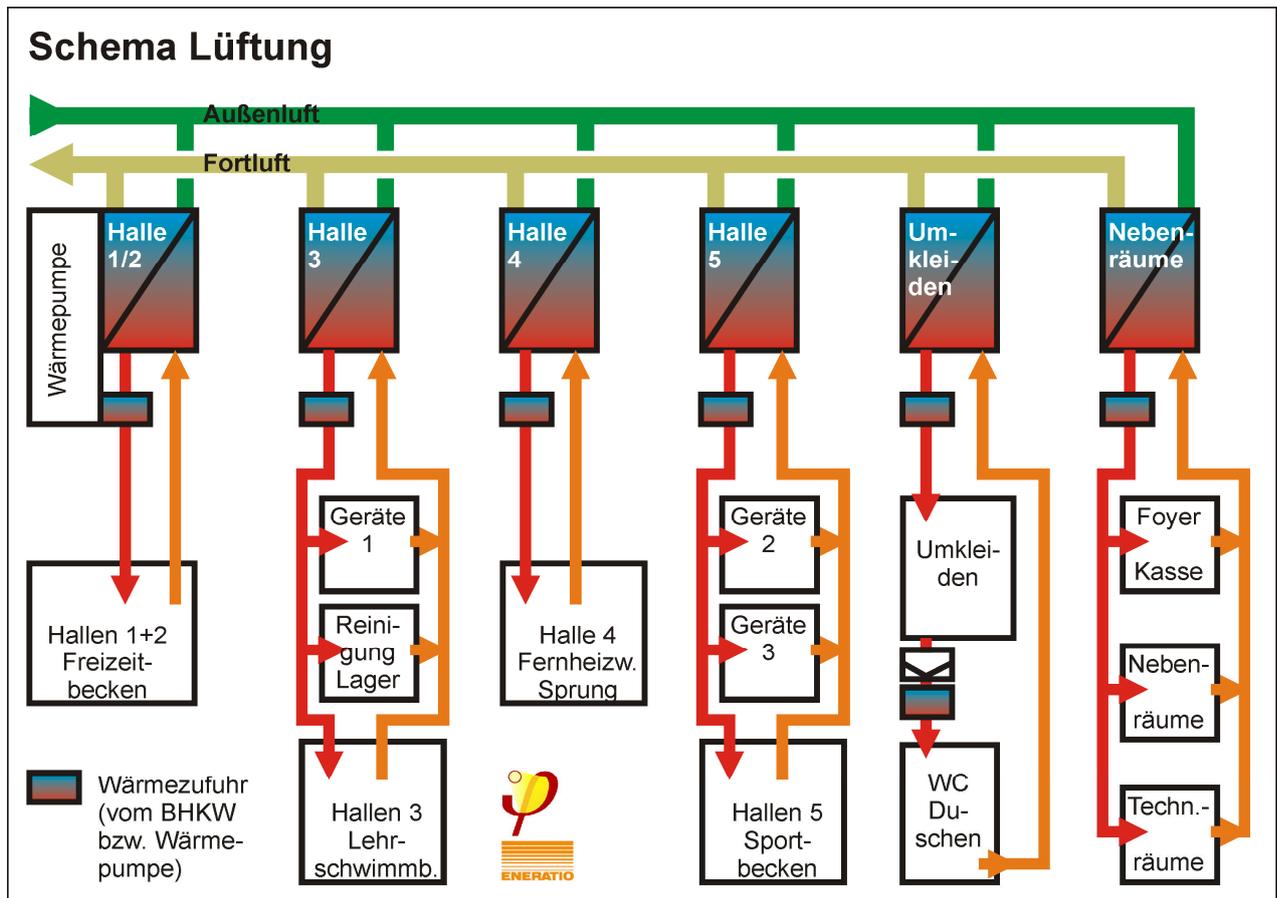


Abb. 4 Schematische Darstellung der Lüftungstechnik des Hallenbades. Aus [Peper/Grove-Smith 2015].

Die Beheizung findet in allen Bereichen ausschließlich über die Lüftung statt, statische Heizflächen sind nicht vorhanden. Die Heizkreise (Raumluft und Wasser) werden über Niedertemperaturwärme aus der Gehäusekühlung (Raumabwärme) sowie der Abgaskühlung (Brennwertnutzung) der beiden unmittelbar benachbarten Blockheizkraftwerke des Fernwärmenetzes Lünen gespeist. In Abb. 5 ist eine schematische Darstellung der Wärmeversorgung abgebildet.

Schema Wärmeversorgung

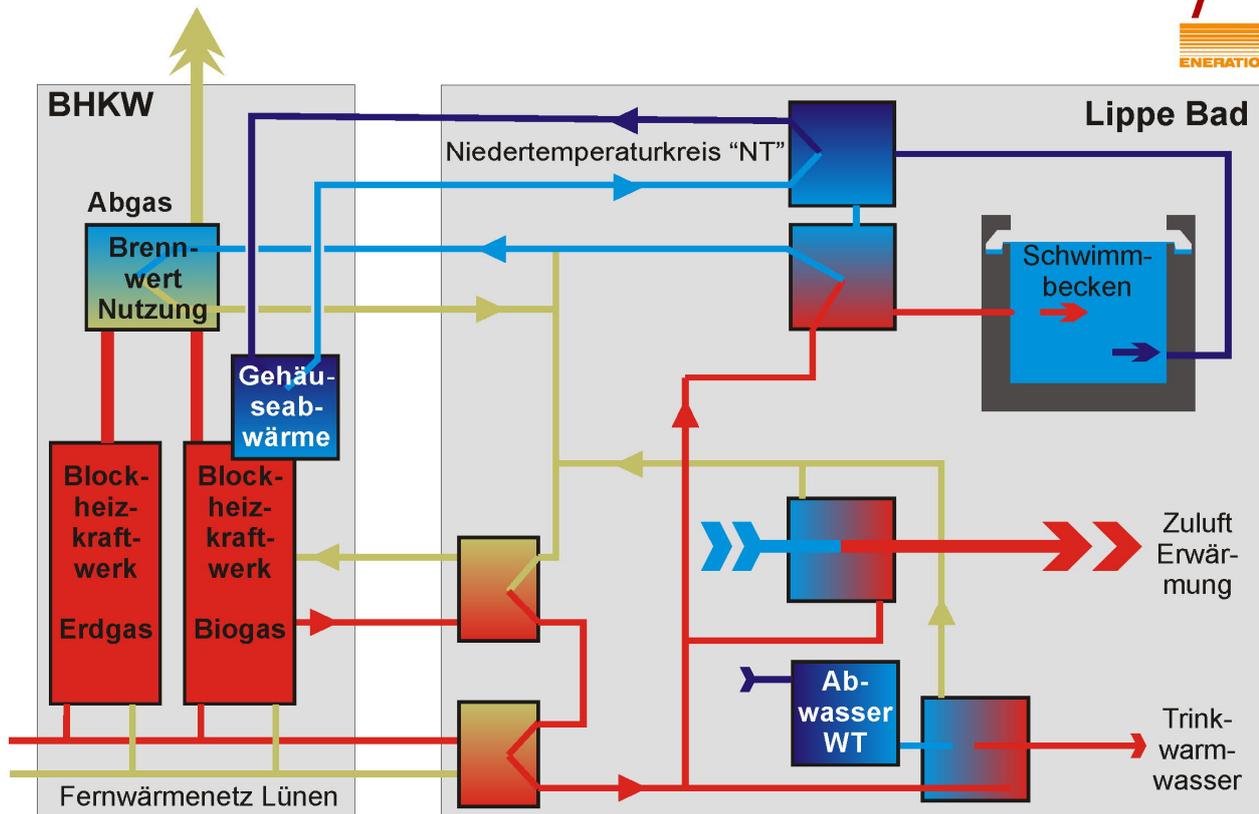


Abb. 5: Schema der Wärmeversorgung des Hallenbades aus dem Fernwärmenetz, durch das Biogas-BHKW (direkt), Abgas-Brennwertnutzung beider BHKW-Anlagen, sowie der Abwärme aus den beiden BHKW-Gehäusen. Aus [Peper/Grove-Smith 2015].

Der Betrieb der Becken erfolgt über drei getrennte Beckenwasserkreisläufe für Becken 1+2, Becken 3 und Becken 4+5. Es sind jeweils Schwallwasserbehälter, Pumpengruppe, Wasseraufbereitung sowie Nachheizung über Wärmetauscher installiert. Die Chlorung des Badewassers erfolgt im Lippe-Bad durch die Aufspaltung des zugesetzten Soleanteils mittels Elektrolysezellen. Zur Verbesserung der Beckenwasserqualität mussten die Beckenkreisläufe gegenüber der ursprünglichen Planung angepasst werden und es wurden Kornkohlefilter nachgerüstet. Eine Aufbereitungsanlage des Filterspülabwassers trägt zur Heizwärmeeinsparung bei (eine Analyse erfolgt als Teil der vorliegenden Studie).

3 Lippe-Bad: Langzeitauswertung Energieverbrauch

Das erste intensive Monitoring des Lippe-Bades in Lünen erfolgte nach der Inbetriebnahme im September 2011. Als Untersuchungszeitraum wurde der Zeitraum April 2012 bis einschließlich März 2013 näher analysiert [Peper/Grove-Smith 2013]. Neben der Verbrauchsuntersuchung und Optimierung während dieser intensiven Monitoring-Phase ist auch der spätere Verlauf der Energieverbrauchswerte von Interesse.

Nach der ersten intensiven Untersuchungsphase wurde das Bad ohne weitere größere Veränderungen der Betriebsbedingungen betrieben. Die Untersuchung des Langzeitbetriebs für die Bereiche Wärme und Strom wird hier durchgeführt. Insgesamt zeigen die folgenden Analysen, dass die Werte über die lange Zeit als überwiegend konstant beurteilt werden können. Der Gesamtverbrauch für Wärme beträgt gut 900 MWh/a und der Stromverbrauch liegt zwischen 700 und 800 MWh/a.

3.1 Langzeit Wärmeverbrauch

Das Hallenbad wird neben dem klassischen Fernwärmeanschluss auch über die Abwärme der beiden BHKW-Anlagen (Erd- und Biogas) versorgt. Dabei werden zwei zusätzlich installierte Abgaswärmetauscher im Brennwertbetrieb und zusätzlich die Gehäuseabwärme der beiden BHKWs genutzt. Damit wurden in dem Hallenbad sehr effiziente Wärmequellen erschlossen, welche in anderen Bädern häufig nicht vorhanden sind. Zusätzlich wird auch direkt Wärme aus dem Biogas-BHKW genutzt ohne den "Umweg" des Fernwärmenetzes. Diese damit insgesamt fünf Wärmequellen speisen in das Hochtemperatur (HT) und Niedertemperatur-Hydrauliknetz (NT) des Bades ein (vgl. [Peper/Grove-Smith 2013]).

Als weitere Besonderheit bei der Wärmeversorgung des Bades wird im Lüftungsgerät von Halle 1+2 eine Wärmepumpe betrieben, welche Energie aus der Fortluft gewinnt und damit die Zuluft erwärmt.

Bei der Auswertung der Langzeitdaten (April 2012 bis Dezember 2017) zeigte sich, dass (vermutlich durch Zählerwechsel) monatelange Datenausfälle einzelner Versorgungszähler vorliegen. Daher kann der Gesamtverbrauch nicht als Verlauf über die ganzen 5,5 Jahre ausgewertet werden. Für die Jahre 2013 und 2014 liegen die Verbrauchsdaten vollständig vor und sind in Abb. 6 und Tab. 2 unterteilt für die verschiedenen Wärmeerzeuger aufgeführt. Der Anteil der Abwärme-Nutzung (BHKW Gehäuseabwärme + Abgaswärmetauscher) liegt in beiden Jahren im Mittel bei 60% und trägt somit ganz erheblich zur Deckung des Heizwärmebedarfs bei.

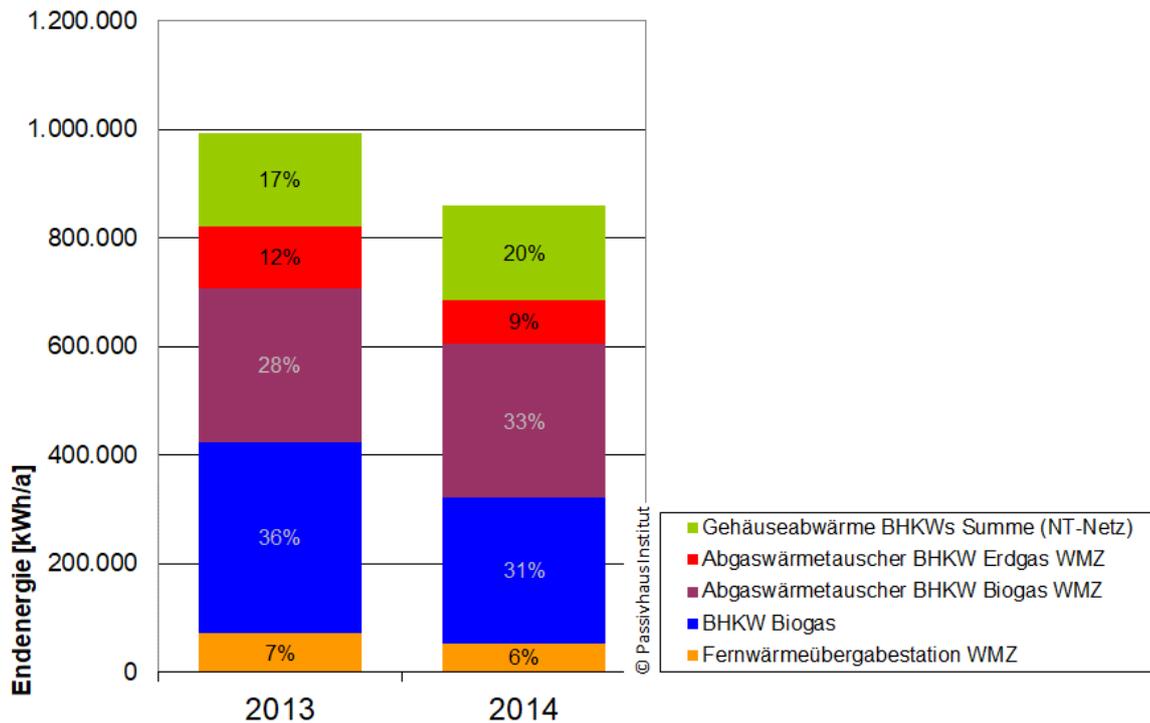


Abb. 6: Endenergieverbrauch und Anteile der Wärmelieferung nach den unterschiedlichen Wärmeerzeugern für die Jahre 2013 und 2014. NT-Netz: Hydraulikkreislauf zur Beckenwassererwärmung auf niedrigerem Temperaturniveau (Nutzung Gehäuseabwärme). Die Wärmelieferung der Wärmepumpe ist bei der Darstellung nicht berücksichtigt (der Stromverbrauch der WP ist beim Abschnitt Strom enthalten).

Tab. 2: Endenergieverbrauch und Anteile der Wärmelieferung nach den unterschiedlichen Wärmeerzeugern für die Jahre 2013 und 2014.

Verbrauchsdaten 2013 / 2014	Gehäuseabwärme BHKWs	Abgas-WT BHKW Erdgas	Abgas-WT BHKW Biogas	BHKW Biogas	Fernwärme	Gesamt
Endenergie [MWh/a]	171,8 / 174,8	114,3 / 79,8	282,0 / 285,0	353,3 / 266,8	80,0 / 53,3	992,5 / 859,8
Anteil	17% / 20%	12% / 9%	28% / 33%	36% / 31%	7% / 6%	100%
Summen	57% / 62%			43% / 37%		100%

Werden die monatlich summierten Wärmemengen sortiert nach den 12 Monaten des Jahres dargestellt (Abb. 7) fallen die unterschiedlichen monatlichen Verbrauchswerte ins Auge. Diese Darstellungsart eignet sich gut, um die laufenden Verbrauchswerte zu überwachen und zu beurteilen. So ist zu erkennen, dass die Verbrauchswerte im ersten Halbjahr 2014 deutlich niedriger waren als 2013. In dieser Darstellung lassen sich einfach Aussagen zu einzelnen Monaten machen, ohne die Details der unterschiedlichen Wärmequellen zu betrachten.

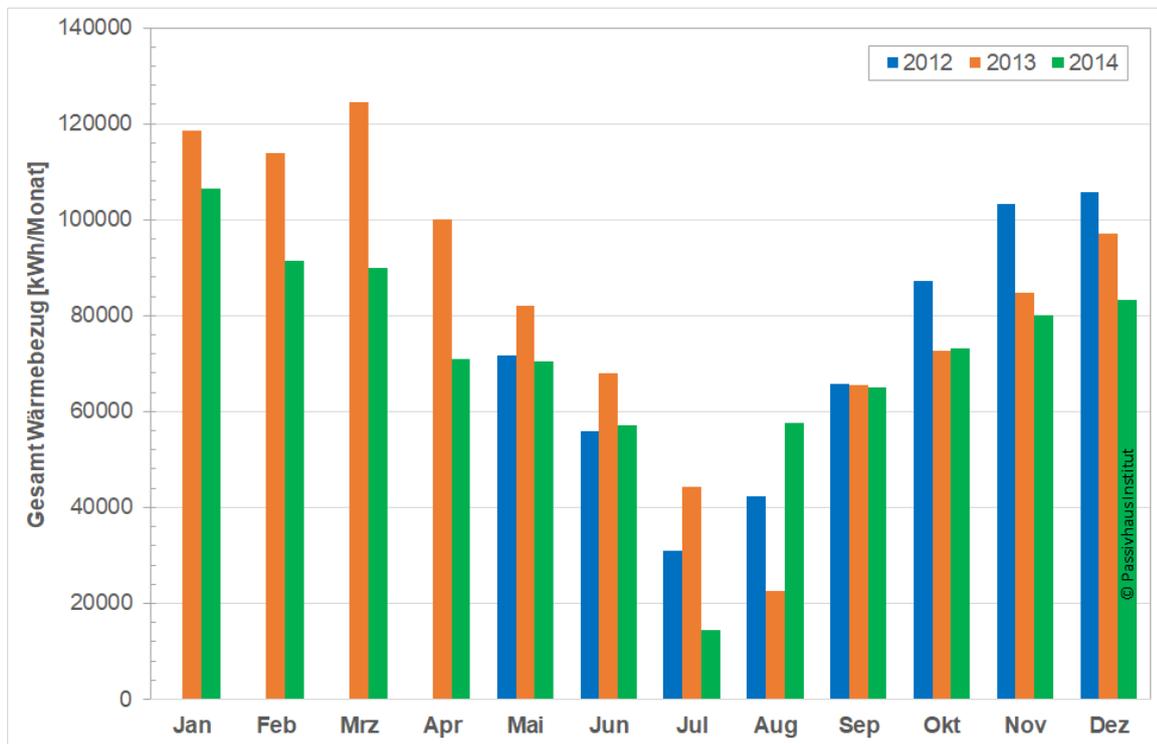


Abb. 7: Monatliche Verbrauchswerte der Wärmeversorgung des Lippe-Bades (Summe der unterschiedlichen Wärmelieferanten, ohne Wärmepumpe) vom Mai 2012 bis Dezember 2014.

Mit der detaillierteren Betrachtung des Zeitraums bis November 2014 in Abb. 8 soll eine weitere Darstellungsart als Möglichkeiten bei der Betriebsüberwachung gezeigt werden. Der Monatsverbrauch der 5 Einzelzähler "Wärmelieferung" ist dort als Stapelbalken dargestellt (ohne die Wärmelieferung der Stromversorgten WP). Zuerst fällt der deutliche Jahrgang der Verbrauchswerte ins Auge. Als zweites kann erkannt werden, dass die erste Winterperiode (2012/2013) höhere Verbrauchswerte ausweist als die zweite (2013/2014). Die letzten Monate des Jahres 2014 (Okt. bis Dez.) liegen nochmals niedriger.

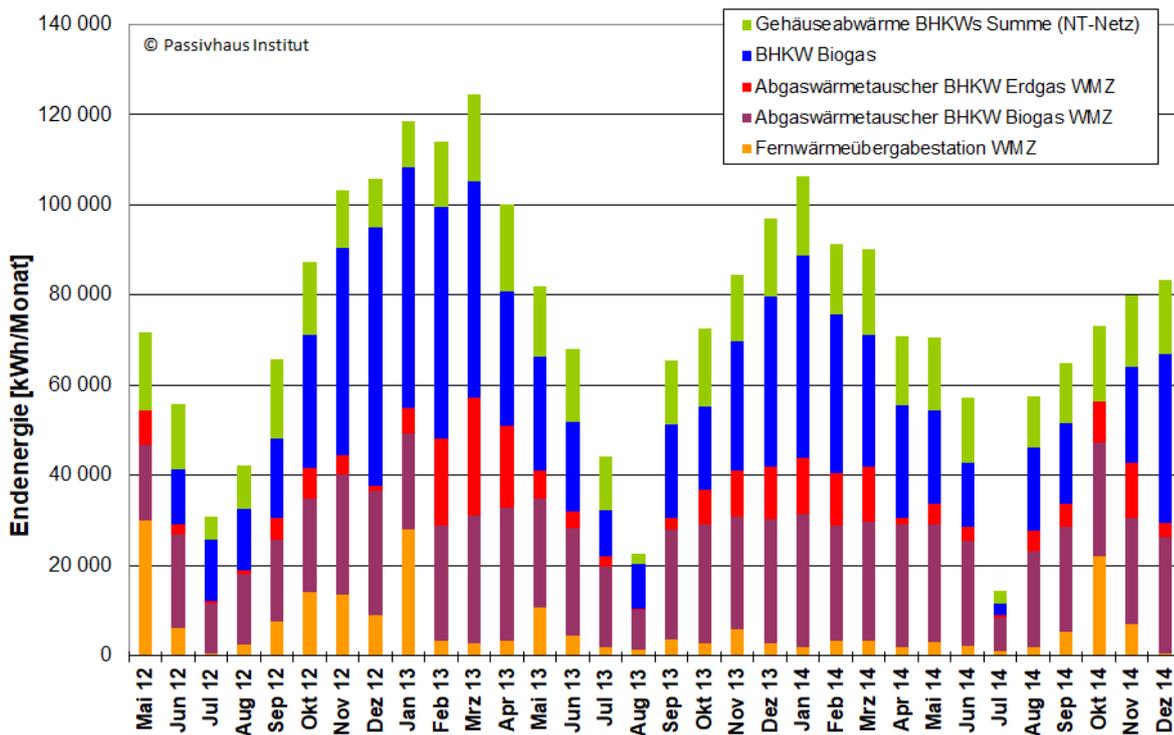


Abb. 8: Monatliche Verbrauchswerte der Wärmeversorgung des Lippe-Bades nach den unterschiedlichen Wärmelieferanten (ohne WP) vom Mai 2012 bis Dezember 2014. NT-Netz: Hydraulikkreislauf zur Beckenwasser-erwärmung auf niedrigerem Temperaturniveau (Nutzung Gehäuseabwärme).

Aufteilung des Wärmeverbrauchs

Neben der Betrachtung der Lieferung der Gesamtwärmemengen des Bades können aufgrund der Zählerausstattung Aussagen zu den Verbrauchsgrößen von verschiedenen Unterbereichen für die Gesamtlaufzeit erfolgen. Der Wärmeverbrauch erfolgt in den drei Teilbereichen (in Klammer ist jeweils der mittlere Anteil am gesamten Wärmeverbrauch im Zeitraum 2013 bis 2017 angegeben):

- Duschwarmwasser (19%),
- Beckenwassererwärmung (41%) sowie
- Nachheizung Lüftung ohne Berücksichtigung der Wärmepumpe (39%),

welche alle gesondert messtechnisch erfasst werden. Da hier keine Datenausfälle vorhanden sind, kann die Gesamtzeit (69 Monate) am Verlauf der Jahreswerte untersucht werden.

Da die Wärmepumpe im Lüftungsgerät von Halle 1+2 einen nennenswerten Beitrag zur Wärmeversorgung der Halle erzeugt, wird dieser hier ebenfalls dargestellt. Aus dem gesondert gemessenen Stromverbrauch der Wärmepumpe wird mit der Jahresarbeitszahl der gelieferte Wärmebeitrag abgeschätzt. Die Auswertung der Messdaten von einem Jahr hat eine Jahresarbeitszahl von ca. 4 ergeben. Damit ergibt sich ein mittlerer Jahresbeitrag von 18,6 kWh/(m²a) zusätzlicher Heizwärme für die Halle 1+2.

Für die Auswertung der Wärmeverbrauchsbereiche werden zunächst fünf vollständige Jahressummen der Unterbereiche dargestellt (Abb. 9); Monate des nicht vollständigen Jahres 2012 werden dabei nicht berücksichtigt. In Abb. 9 ist zu erkennen, dass bei der Duschwarmwasserbereitung (grün) ein Anstieg im Verbrauch (2015, 2016 und 2017) um 19, 41 bzw. 55 % gegenüber 2013 festzustellen ist. Die Ursache kann zum Teil mit der gestiegenen Besucherzahl begründet werden, es muss aber noch andere Einflüsse geben: Die Besucherzahl ist 2015 um 12 % und 2016 sowie 2017 um 16 % gegenüber 2013 angestiegen. Dagegen ist der Verbrauch 2014 nahezu unverändert gegenüber 2013 (+1 %) bei auch nahezu gleichbleibender Besucherzahl (+4 %) geblieben.

Die Beckenwassererwärmung (gelb) bewegt sich nach dem ersten Jahr (2013) drei Jahre lang konstant auf etwas niedrigerem Niveau (im Mittel -22 % gegenüber 2013). Im letzten Untersuchungsjahr steigt der Verbrauch für die Becken leicht an, bleibt aber deutlich unterhalb des Wertes von 2013 (-12 % gegenüber 2013). Die Nachheizung der Lüftung (blau, ohne WP) schwankt über die vier Jahre von -9 bis +4 % gering.

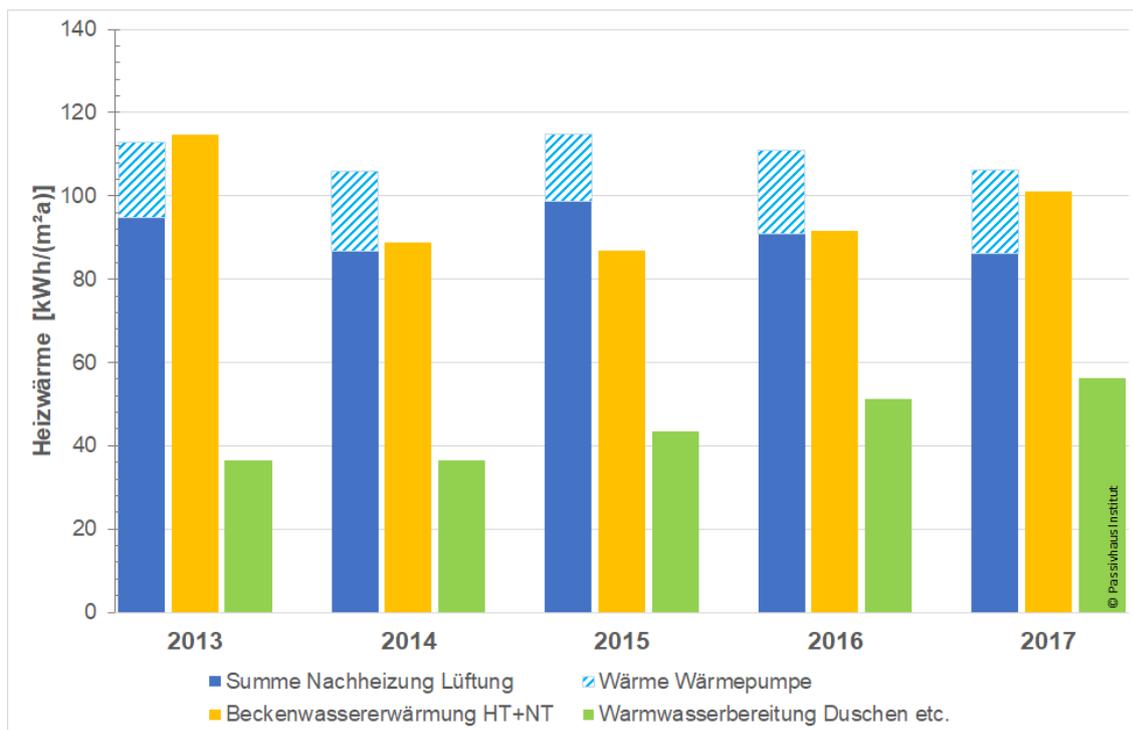


Abb. 9: Spezifische jährliche Energieverbrauchswerte des Lippe-Bades von den drei Teilbereichen der Wärmeabnahme von 2013 bis 2017. Bezugsfläche: 3.912 m². HT+NT = Summe des Hoch- und Niedertemperatur-Kreislaufs zur Beckenwassererwärmung.

Werden die Monatswerte als Stapelsäulen dargestellt (Abb. 10, ohne WP) wird deutlich der Jahresgang inkl. der sommerlichen Revisionszeiten sichtbar. Die Beheizung des Bades über die Luftherwärmung (blaue Säulen) erfolgt ganzjährig und zeigt dabei einen klaren Sommer-Winter Verbrauchsunterschied. Dieser Jahresgang ist in ähnlicher Form auch für die Duschwassererwärmung (grün) wie auch für die Beckenwassererwärmung (orange) festzustellen.

Damit kann der Bereich der Wärmeverbrauchssektoren über den langen Zeitraum als relativ konstant beurteilt werden. Es ist kein genereller Anstieg der Wärmeverbrauchswerte in der Langzeitbetrachtung nach dem Zeitraum des intensiven Monitoring (ab April 2013) abzuleiten.

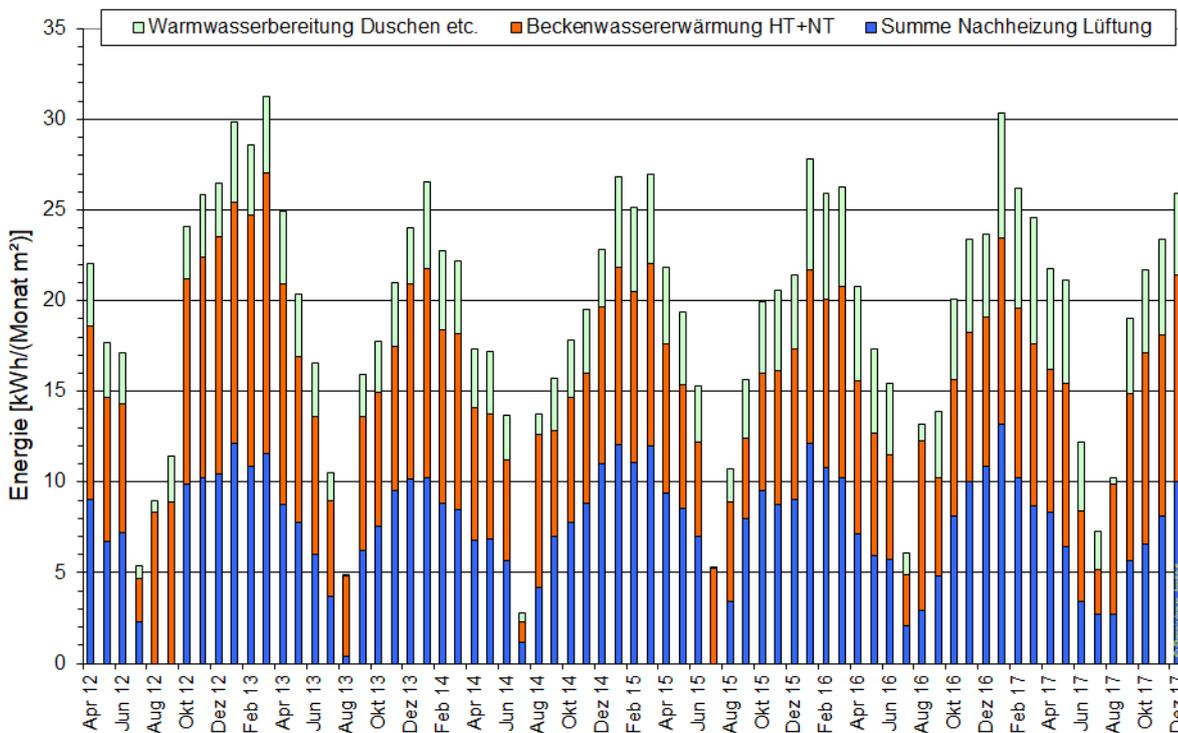


Abb. 10: Spezifische Energieverbrauchswerte des Lippe-Bades von den drei Teilbereichen der Wärmeabnahme (ohne WP) über einen Zeitraum von 5,5 Jahren (April 2012 bis Dezember 2017). Bezugsfläche: 3.912 m². HT+NT = Summe des Hoch- und Niedertemperatur-Kreislaufs zur Beckenwassererwärmung.

Beckenwassererwärmung

Der Wärmeverbrauch der Beckenwassererwärmung erfolgt in drei Beckenwasserkreisläufen, welche getrennt gemessen werden. Damit ist eine weitere Differenzierung der oben analysierten Verbrauchswerte möglich. In der Langzeitauswertung der Jahressummen in Abb. 11 zeigt das Jahr 2013 für alle drei Einzelkreise (Becken 1+2, Becken 3, Becken 4+5) ein etwas höheres Niveau. Danach folgen drei Jahre mit relativ stabilem Verbrauch. In 2017 ist eine Erhöhung des Wärmeverbrauchs für Becken 4+5 sowie ein geringer Anstieg für die Erwärmung von Becken 3 festzustellen, bei gleichzeitiger leichter Reduktion des Wärmebedarfes für Becken 1+2. Eine Tendenz zur generellen Steigerung der Verbrauchswerte kann hier nicht abgeleitet werden. Auch die Ursachen sind hier nicht feststellbar, da sich verschiedene Einflussgrößen geändert haben können (z.B. Änderungen der Beckenwassertemperaturen, Anzahl und Aktivitäten der Badegäste, Feuchte der Hallenluft) über welche keine lückenlose Dokumentation vorliegt.

In der Monatsdarstellung sind die deutlichen jahreszeitlichen Schwankungen inklusive der niedrigen Verbrauchswerte während der Revisionszeiten im Sommer abzulesen (Abb. 12).

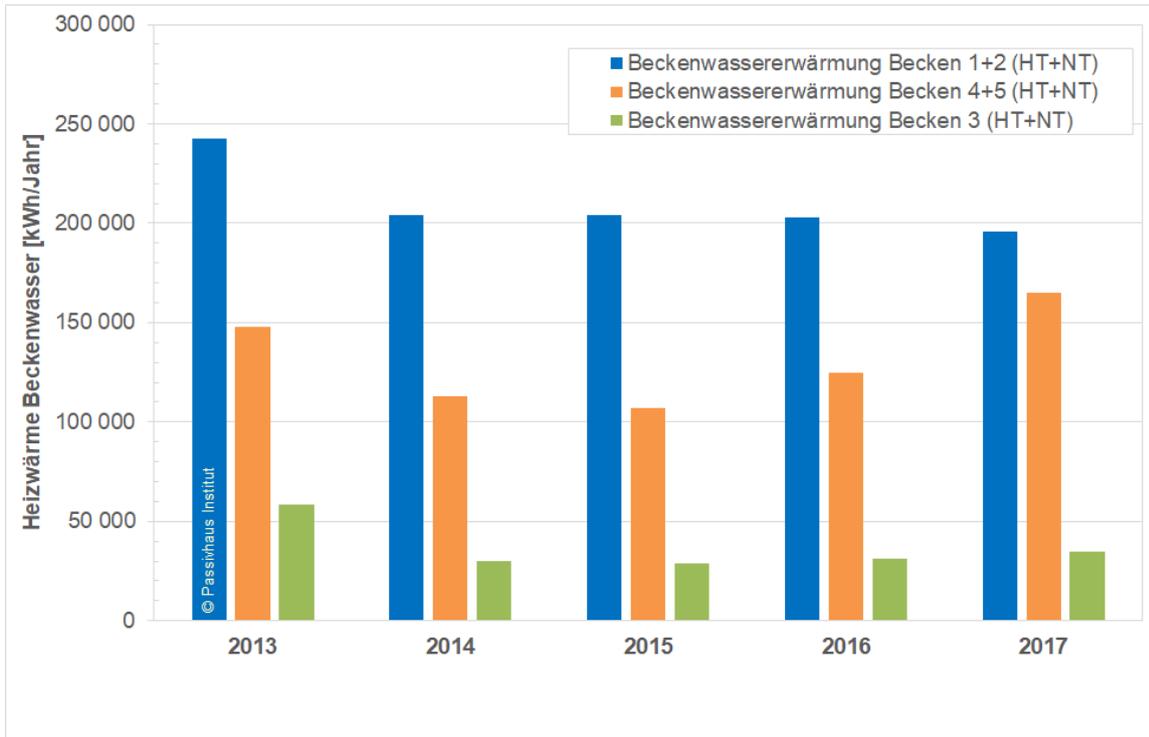


Abb. 11: Wärmeverbrauchswerte der Beckenwassererwärmung von den drei Kreisläufen im Lippe-Bad als Jahressummen 2013 bis 2017. HT+NT = Summe des Hoch- und Niedertemperatur-Kreislaufs.

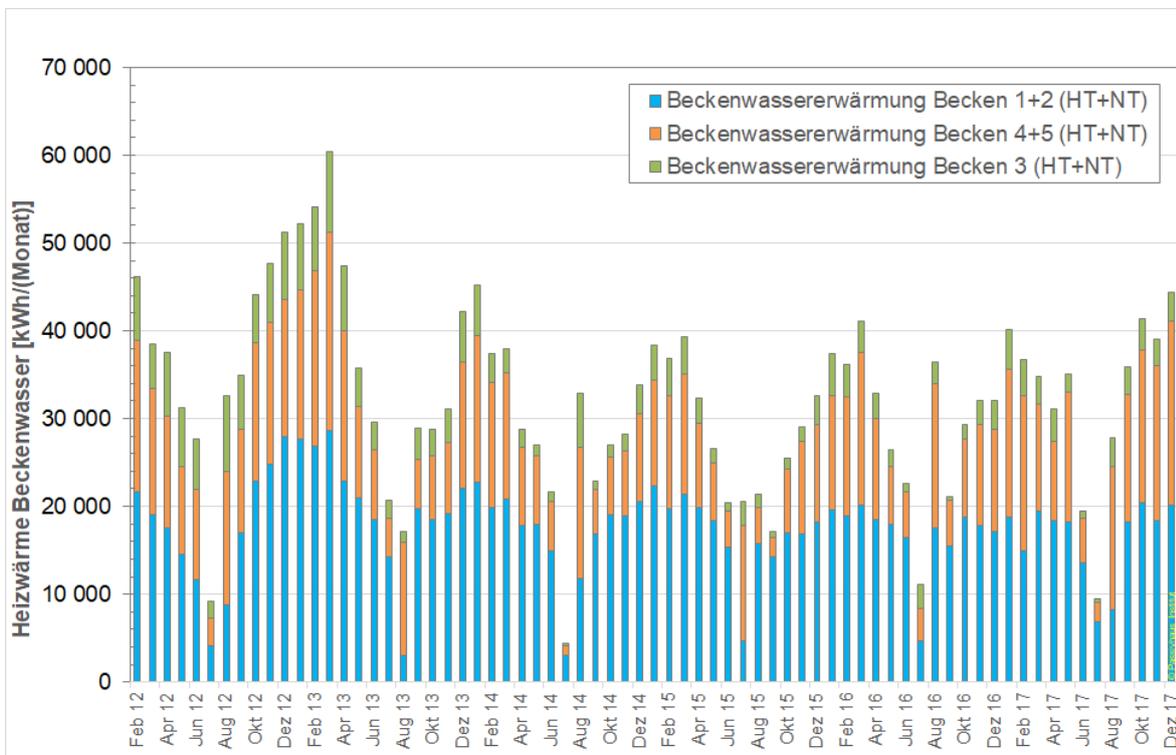


Abb. 12: Wärmeverbrauchswerte der Beckenwassererwärmung der drei Kreisläufe im Lippe-Bad für den Zeitraum Februar 2012 bis Dezember 2017 (71 Monate). HT+NT = Summe des Hoch- und Niedertemperatur-Kreislaufs.

Luftherwärmung

Der Wärmeverbrauch für die Luftherwärmung durch die Heizregister im Luftstrom kann für 5 vollständige Jahre (2013 - 2017) ausgewertet werden. Jedes der 6 Lüftungsgeräte (Hallen und Neben-zonen) verfügt über ein gesondertes Nachheizregister. Zusätzlich wird der Luftstrom für die Dusch-bereiche Damen und Herren getrennt nacherwärmt. Damit ergeben sich insgesamt 8 getrennt ge-messene Wärmemengen für die Luftherwärmung. Zusätzlich muss auch der berechnete Wärmeein-trag der Wärmepumpe in Lüftungsgerät 1+2 berücksichtigt werden. Ein guter Überblick über die Verbrauchswerte ergibt sich bei der Darstellung nach diesen 8+1 Teilbereichen in Abb. 13. Es fällt auf, dass sich für Halle 5 jedes Jahr der Verbrauch deutlich reduziert. Halle 4 und 5 stehen im direkten Luftverbund; der Verbrauch von Halle 4 ändert sich aber nur sehr wenig. Auffällig ist der Ausreißer in Halle 1+2 im Jahre 2015; die genaue Ursache dafür ist unbekannt. Deutlich wird, dass die WP den nennenswerten Beitrag von ca. 80 % (bis auf 2015) zur Hallenbeheizung beiträgt. In der Zone "Nebenräume" fällt die Verbrauchssenke im Jahr 2014 auf. Die Ursache für den Peak und die Senke können ganz unterschiedlich sein. Denkbar sind Teilausfälle von Geräten oder auch Veränderungen der Solltemperaturen. Bis auf die erwähnten Veränderungen sind die Verbrauchs-werte als relativ konstant zu bewerten. Die monatlichen Verläufe sind in der nachfolgenden Grafik (Abb. 14) im Detail dargestellt (dort ohne den Input der Wärmepumpe). Darin ist z.B. der erhöhte Verbrauch von Halle 1+2 im März bis Juni 2015 deutlich zu erkennen.

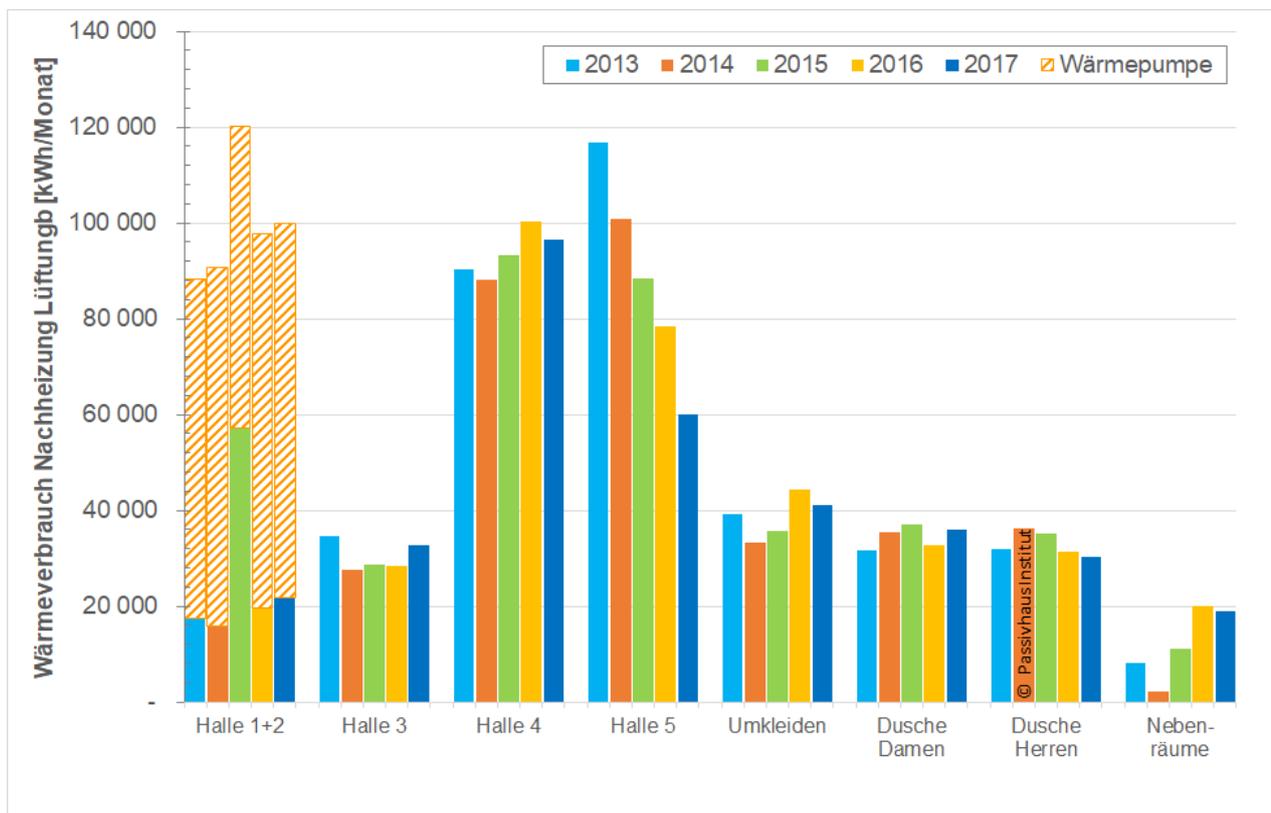


Abb. 13: Jahreswerte der Wärmeverbräuche zur Luftherwärmung der unterschiedlichen Bereiche (Hallen etc.) im Lippe-Bad von 2013 bis 2017 unter Berücksichtigung der berechneten Wärmemengen der Wärmepumpe.

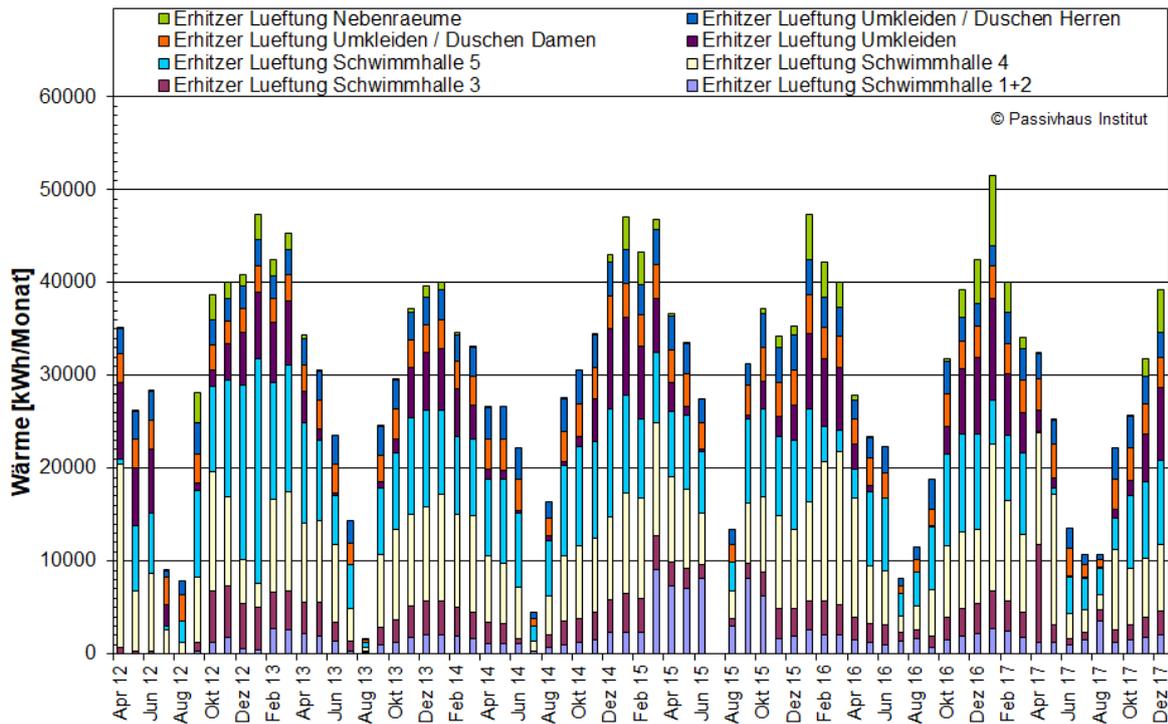


Abb. 14: Monatliche Wärmeverbrauchswerte für die Lufterwärmung der unterschiedlichen Bereiche (Hallen etc.) im Lippe-Bad von April 2012 bis Dezember 2017 (ohne WP).

3.2 Langzeit Stromverbrauch

Auch für den Bereich der Stromverbräuche kann die Entwicklung über einen längeren Zeitraum untersucht werden. Es wird wieder beim Gesamtenergiebezug begonnen: Das Lippe-Bad wird zum einen über das Stromnetz versorgt, zum anderen auch über PV-Zellen auf dem eigenen Gelände. Die Jahresdarstellung (Abb. 15) zeigt, dass 2012, 2013 sowie 2017 weniger Strom verbraucht wurde als 2014 bis 2016. Der jährliche Gesamtstromverbrauch pendelt etwa zwischen 710 und 820 MWh, wenn das erste Jahr (2012) nicht berücksichtigt wird. Der Anteil des direkt erzeugten und verbrauchten Solarstroms liegt - je nach Solarstrahlungsangebot - zwischen 4 und 13% des Strom-Gesamtverbrauchs; im Mittel über die 6 Jahre beträgt der Anteil 9%. An der Monatsdarstellung lassen sich insbesondere wieder die sommerlichen Revisionszeiten ablesen (Abb. 16).

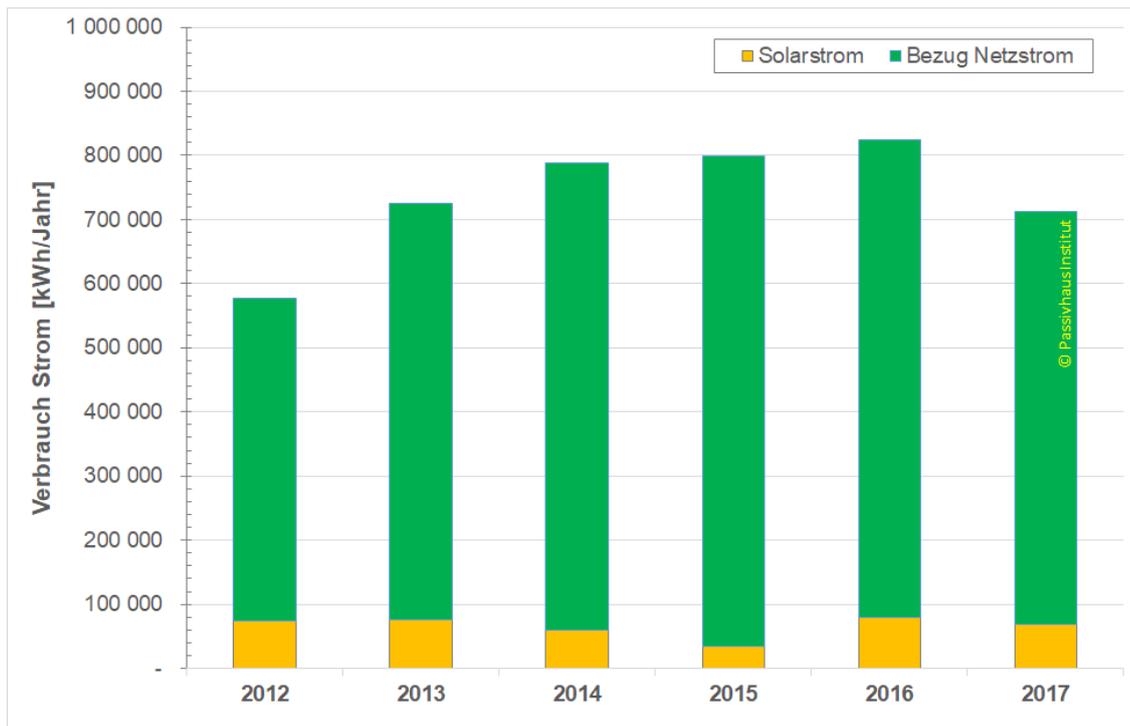


Abb. 15: Gesamter jährlicher Strombezug des Lippe-Bades 2012 bis 2017 aufgeteilt nach den Bezugsquellen (Netz und PV-Erzeugung).

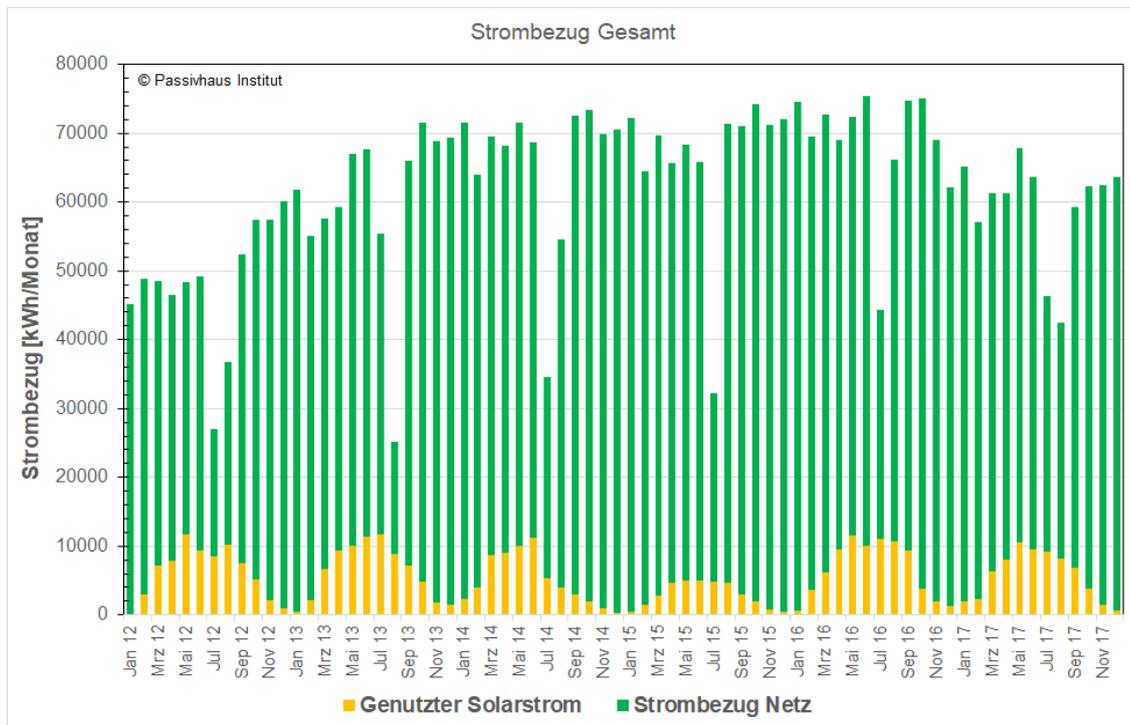


Abb. 16: Gesamter Strombezug des Lippe-Bades als Monatsverlauf von Januar 2012 bis Dezember 2017 aufgeteilt nach den Bezugsquellen (Netz und PV-Erzeugung).

Aufteilung des Stromverbrauchs

Für das Lippe-Bad wurden [Peper/Grove-Smith 2013] fünf Hauptgruppen des Stromverbrauchs benannt (in Klammer ist jeweils der mittlere Anteil am gesamten Stromverbrauch im Zeitraum 2013 bis 2017 angegeben):

- Lüftungstechnik inkl. Wärmepumpe (33%),
- Großpumpen der Schwimmbadtechnik (23%),
- Hilfsstrom für Heizung und Sanitär (3%),
- Strom für Beleuchtung und Steckdosen (10%) sowie
- "Diverses" (31%) als Restgröße, in der u.a. die gesamte restliche Schwimmbadtechnik ohne die Großpumpen enthalten ist wie auch der Technikstrom für alle MSR-Anwendungen.

Diese Aufteilung wird hier beibehalten, um einen Überblick über die Langzeitentwicklung der Verbrauchsgruppen zeigen zu können. In der Jahresübersicht in Abb. 17 können die fünf Teilbereiche unterschieden werden. Die Bereiche "Lüftung" und "Diverse" dominieren den Verbrauch mit Werten meist über 30 %. Im Jahr 2017 reduziert sich der Anteil "Diverse", wodurch sich die Anteile etwas verschieben: Die Lüftung steigt im Jahresanteil auf 37 %, "Diverse" sinkt auf nur noch 23%. Auf Platz drei der Stromverbrauchsgruppen befinden sich die Großpumpen der Beckenwassertechnik (um 23 %). In der Jahresdarstellung ergibt sich ein stabiles Verbrauchsbild mit leichter Reduktion im letzten Messjahr (2017) um insgesamt 11 % gegenüber dem Mittelwert der drei Vorjahre.

In der Monatsdarstellung mit Stapelsäulen für die 5 Bereiche (Abb. 18) lassen sich zusätzlich gut monatliche Ausreißer erkennen:

Mit geringen Verschiebungen und einzelnen Ausreißern sind die Verbrauchsgruppen stabil in der Langzeitentwicklung.

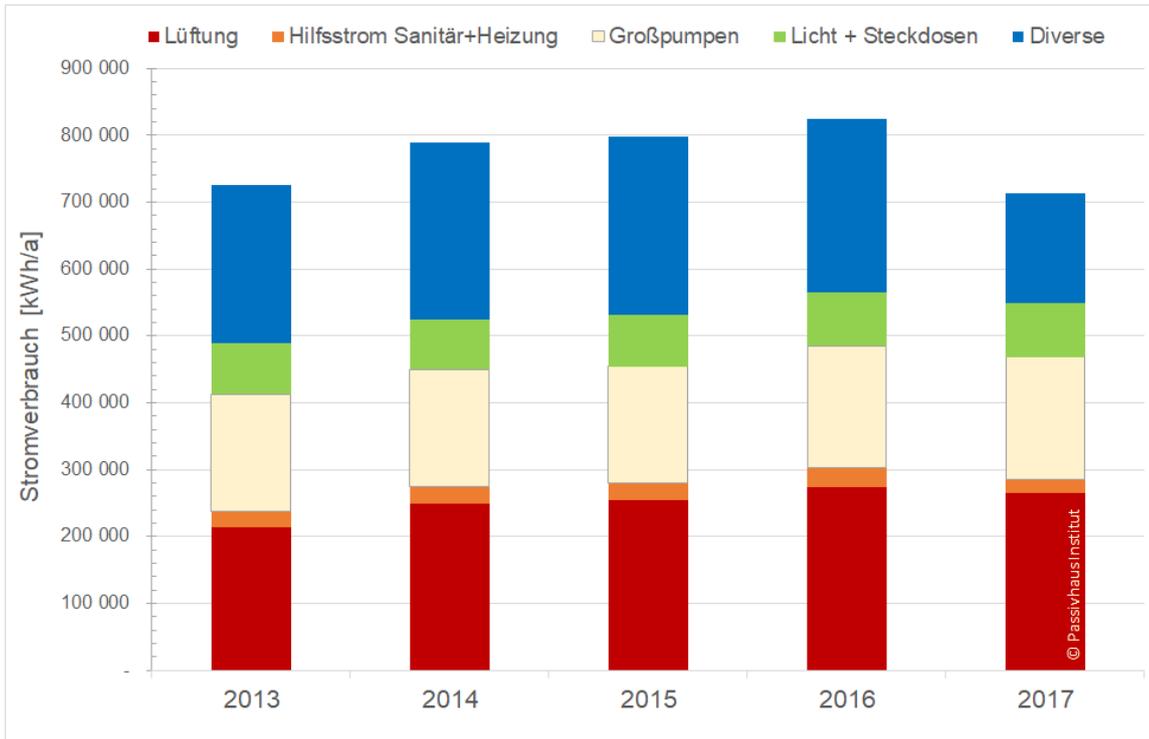


Abb. 17: Gesamter jährlicher Strombezug des Lippe-Bades von 2013 bis 2017 unterteilt nach den fünf Hauptverbrauchsbereichen.

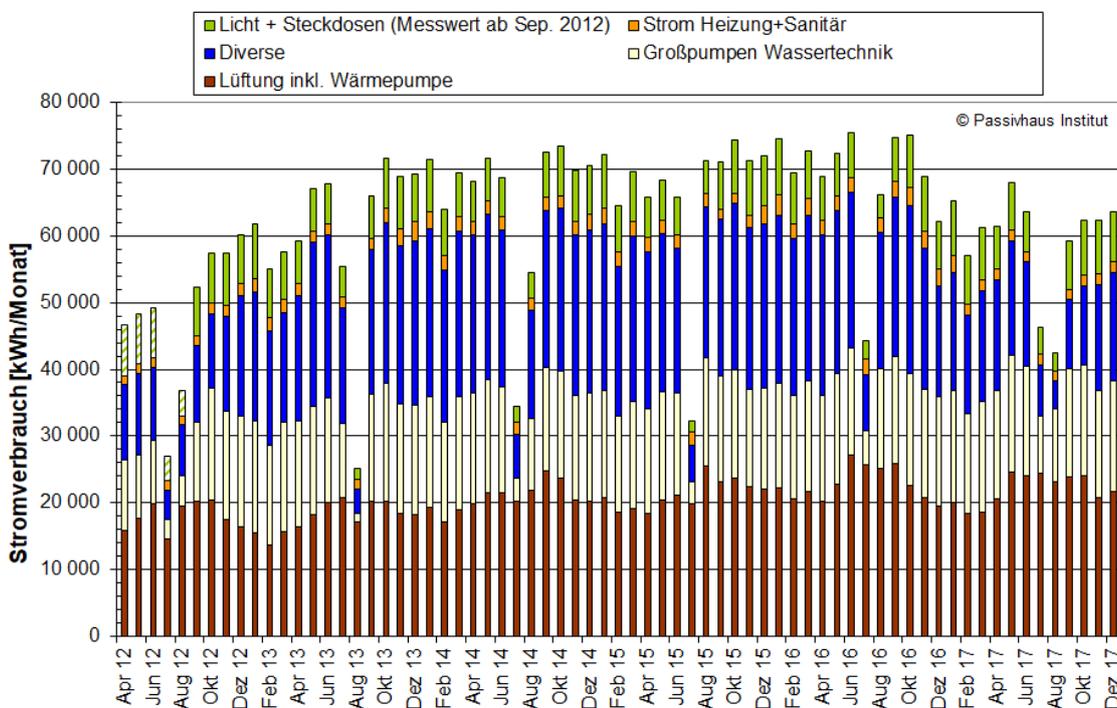


Abb. 18: Gesamter monatlicher Strombezug des Lippe-Bades von April 2012 bis Dezember 2017 unterteilt nach den fünf Hauptverbrauchsbereichen. Bei den schraffierten Balken bis August 2012 des Bereiches "Licht + Steckdosen" handelt es sich um Hochrechnungen.

Strom Lüftungsanlagen

Der Stromverbrauch für jede der sechs Lüftungsanlagen im Lippe-Bad wird separat gemessen. Für den gesamten Verbrauchsbereich Lüftung werden jährlich 250.000 bis 275.000 kWh Strom aufgewendet (ohne das erste Jahr 2012) (Abb. 19). Das entspricht - wie oben bereits erwähnt - 32 bis 37 % des Gesamtstromverbrauchs des Hallenbades. Auf diesem Niveau ist der Jahresverbrauch relativ stabil.

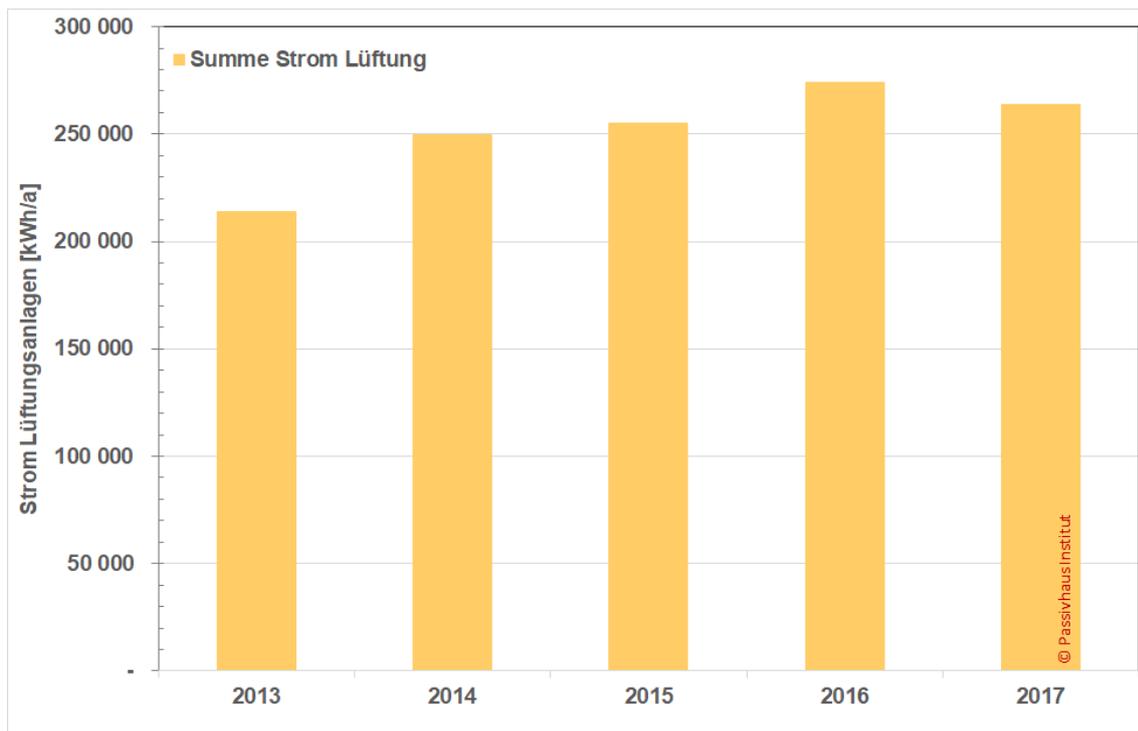


Abb. 19: Summen der Jahresstromverbräuche aller sechs Lüftungsanlagen des Lippe-Bades (inkl. WP).

Die Darstellung der Jahresverbräuche je Anlage (Abb. 20) zeigen die unterschiedlichen Größenordnungen der Anlagen. Diese Unterschiede der Hallenlüftungsgeräte sind in den ganz unterschiedlichen geförderten Luftvolumenströmen begründet. Auch hier zeigen sich die überwiegend etwa gleichbleibenden Jahresverbrauchswerte je Anlage; nur einige Ausreißer fallen ins Auge: Bei Anlage 5 fällt 2016 ein Peak auf. Des Weiteren ist auffällig, dass der Verbrauch für die Lüftungsanlage "Nebenträume" bis 2016 kontinuierlich ansteigt; 2017 ist er dann wieder geringfügig niedriger. Es handelt sich dabei allerdings um die Anlage mit den generell niedrigsten Verbrauchswerten. Es ist zu vermuten, dass hier die Sollwerte über die Zeit angepasst wurden. Bei Gerät 1+2 ist der Stromverbrauch der Wärmepumpe getrennt aufgeführt. Dieser beträgt im Mittel ca. 18.200 kWh/a.

Die Monatsverbrauchswerte in Abb. 21 zeigen, dass in den Wintermonaten generell weniger Energieverbrauch zum Betrieb der Lüftungsanlagen benötigt wird. Die Ursache liegt darin, dass bei winterlich trockener Außenluft kleinere Luftmengen zur Hallenentfeuchtung benötigt werden. Die höchsten Verbrauchswerte sind im Jahr 2016 erreicht worden.

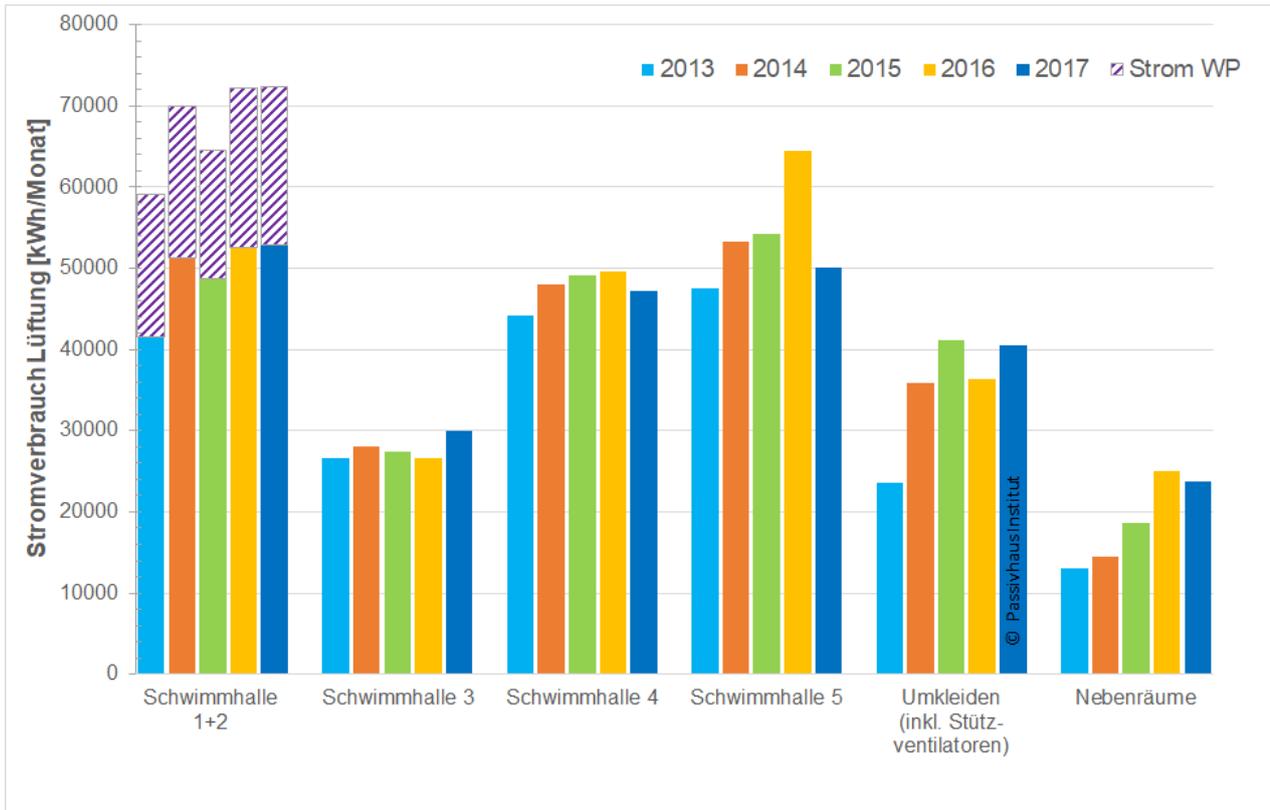


Abb. 20: Jahresstromverbrauch der sechs Lüftungsanlagen im Lippe-Bad von 2012 bis 2017. Beim Verbrauch der Anlage 1+2 ist der Stromverbrauch der Wärmepumpe gesondert markiert.

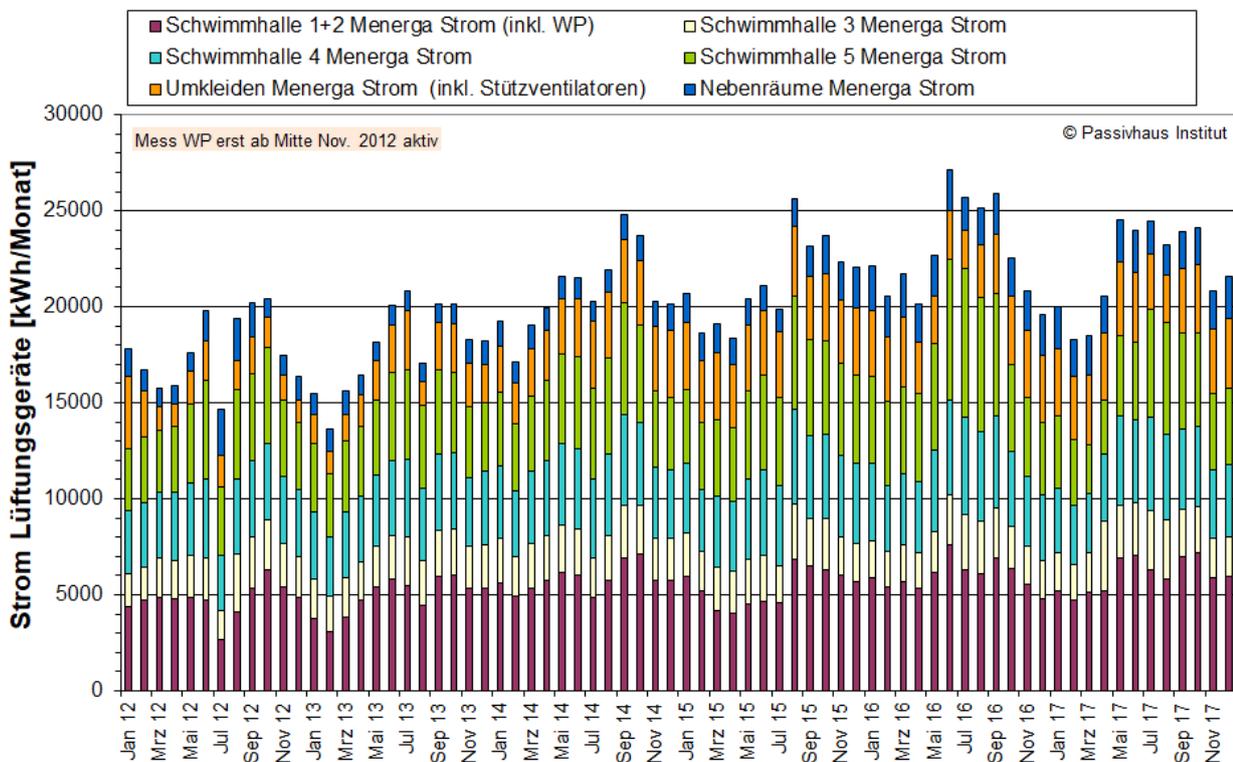


Abb. 21: Monatlicher Stromverbrauch der sechs Lüftungsanlagen im Lippe-Bad von Januar 2012 bis Dezember 2017 (72 Monate).

Bei der Untersuchung des Lüftungsstroms ist auch von Interesse wie groß der Aufwand für den durch die Anlage transportierten Kubikmeter Luft ist. Diese Größe enthält Aussagen zur Auslegung und Realisierung der Gesamtanlage in Bezug auf die Energieeffizienz der Luftförderung (Qualität Lüftungsanlage, Kanalquerschnitte, Formteile, Einbauten, Auslässe,...). Für Lüftungsanlagen wird bei der Zertifizierung seitens des PHI ein Grenzwert von 0,45 W pro transportiertem m³ Luft pro Stunde vorgegeben (Wh/m³).

Für das Bad in Lünen wurden stichprobenartig für Februar und Juni 2017 die Daten je Lüftungsgerät als Monatsmittelwerte ausgewertet. Aufgrund der feuchteren Außenluft in den Sommermonaten werden in den Hallen im Sommer generell höhere Volumenströme zur Sicherstellung der maximal gewünschten Hallenluft benötigt. Daher ist die Stromeffizienz bei gleichbleibender Anlagentechnik für die Hallenlüftung im Winter besser als im Sommer. Die Messdaten geben dies deutlich wieder. In Tab. 3 sind die Messdaten für die beiden Monate aufgeführt:

Tab. 3: Stromeffizienz für die 6 Lüftungsanlagen des Lippe-Bades in zwei Beispielmonaten

Strom-effizienz [Wh/m ³]	Strom Lüftung Halle 1+2 (ohne Strom Wärmep.)	Strom Lüftung Halle 3	Strom Lüftung Halle 4	Strom Lüftung Halle 5	Strom Lüftung Umkleiden (inkl. Stützventilatoren)	Strom Lüftung Nebenräume	Mittelwert (Volumenstrom gewichtet)
Feb. 2017	0,31	0,35	0,39	0,34	0,64	0,39	0,39
Juni 2017	0,53	0,48	0,52	0,43	0,62	0,37	0,49

Die Auswertung zeigt im Februar 2017 gute Ergebnisse in Bezug auf die Stromeffizienz der Hallenlüftung mit Werten zwischen 0,31 bis 0,39 Wh/m³. Die Luft aus den Umkleiden wird aktiv mit Hilfe von Stützventilatoren über ein zusätzliches Nachheizregister in die Duschen eingeblasen. Dafür ist hier ein zusätzlicher Stromeinsatz notwendig, welcher den spezifischen Wert verschlechtert (0,64 Wh/m³). Die Nebenräume zeigen wiederum gute Werte (0,39 Wh/m³). Insgesamt ergibt sich ein gutes Ergebnis mit einem Mittelwert (volumenstromgewichtet) von 0,39 Wh/m³, welches deutlich unter dem PHI Grenzwert liegt, und dies obwohl die zusätzlichen Stützventilatoren dabei berücksichtigt sind. Die Unterschreitung des Grenzwertes ist bei Geräten dieser Baugröße auch deutlich zu erwarten.

Im Sommer (Juni 2017) zeigt sich ein verändertes Bild bei den spezifischen Messdaten. Aufgrund der zur Entfeuchtung höheren Luftmengen verschlechtern sich die Werte erwartungsgemäß. Bei den Hallengeräten wird der Grenzwert zum Teil überschritten. Die Werte der Umkleide und Neben-zonen sind fast unverändert, da hier nicht die Abfuhr von verdunsteten Wasser im Mittelpunkt steht; die geförderten Luftmengen sind nahezu unverändert. Als Gesamtmittelwert (volumenstromgewichtet) ergibt sich für diesen Sommermonat 0,49 Wh/m³.

Insgesamt würden die Stromeffizienzwerte noch deutlich besser ausfallen, wenn die Umluft weiter reduziert oder auf diese vollständig verzichtet werden würde (vgl. auch Abschnitt 6.2.2).

4 Lippe-Bad: Gebäudehülle

Grundlegender Baustein des Passivhaus-Konzeptes ist eine hoch wärmegeämmte und luftdichte Gebäudehülle. Sie schützt die Baukonstruktion, senkt dabei die Wärmeverluste signifikant und ist außerdem Voraussetzung für weitere Effizienzmaßnahmen im Bereich der Gebäudetechnik. Weitere Informationen zu Passivhaus-Gebäudehüllen stehen in den bereits veröffentlichten Berichten über das Lippe-Bad und das Bambados zur Verfügung ([Schulz et al. 2009], [BGL 2011], [Peper/Grove-Smith 2013], [Gollwitzer et al. 2015]).

In diesem Bericht werden zwei Themen anhand von Untersuchungen am Lippe-Bad aufgegriffen, um die Qualität nach mehreren Betriebsjahren zu überprüfen: Luftdichtheit und Thermografieaufnahmen der Gebäudehülle.

4.1 Luftdichtheit

Die Luftdichtheit bei einem Hallenbad ist aufgrund der erhöhten Raumlufffeuchte von besonderer Wichtigkeit. Beim Lippe-Bad wurde mehrfach die Luftdichtheit überprüft. Das PHI führte bereits am 12. August 2011 vor der Inbetriebnahme eine erste Messung durch (vgl. [Peper/Grove-Smith 2013]). Danach wurden gefundene Leckagen nachgearbeitet. Insbesondere bei den Oberlichtern im Bereich der Umkleide wurden Verbesserungen herbeigeführt sowie beim Anschluss des Deckenbereichs zum Altbauteil in Halle 5. Eine Besonderheit des Bades ist die Verbindung eines Altbauteils (ehemaliges Heizwerk) mit dem Neubau. Angrenzend an den nun in das Bad integrierten Altbauteil folgen Räume, welche nicht zum Bad gehören und später als Büros genutzt werden sollen.

Am 04. Mai 2016 wurde vom PHI erneut eine Leckagesuche bei Unterdruck durchgeführt. Dabei wurden keine auffälligen Bereiche in der Gebäudehülle lokalisiert. Es wurde bei Unterdruck ein Leckagevolumenstrom von $10.511 \text{ m}^3/\text{h}$ gemessen, was einem n_{50} -Wert von $0,45 \text{ h}^{-1}$ entspricht. Bei einer durch die Firma Klimawerkstatt GmbH (Lünen) am 15. und 16. August 2016 durchgeführten Messung wurde im, an die Halle 5 angrenzenden, Altbaubereich zeitweise Schutzdruck erzeugt. Damit wird der Leckagestrom um die Leckagen aus dem nicht an die Außenluft angrenzenden Bereich reduziert. Diese sind im Falle der Beheizung des Altbaubereichs aus energetischer Sicht nur untergeordnet wichtig, da die Temperaturdifferenz im Winter geringer ist als zur Außenluft. Dabei ergaben sich ein n_{50} -Wert von $0,35 \text{ h}^{-1}$ mit Schutzdruck und ein Messwert von $0,39 \text{ h}^{-1}$ ohne Schutzdruck. Somit beträgt die Leckage zum Altbau auch nach der Verbesserung der Anschlüsse im Dachbereich rund $900 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Druckdifferenz von 50 Pa. Der Gesamtmesswert für das Gebäude liegt damit über dem angestrebten Wert von $n_{50} = 0,2 \text{ h}^{-1}$.



Abb. 22: Eingebaute Blower Door in der Außentür des Anlieferbereichs während der Unterdruckmessung zur Leckagesuche am 04. Mai 2016.

4.2 Thermographische Untersuchung

Zur Überprüfung der Gebäudehülle des Hallenbades wurde am 12. Januar 2017 die Innen- und Außenfassade mit einer Thermographiekamera betrachtet. Die Wetterbedingungen waren mit Außentemperaturen um $+4^{\circ}\text{C}$ gut geeignet. Aufgrund der Innentemperatur um bzw. über 30°C ergibt sich damit eine aussagekräftige Temperaturdifferenz von etwa 26 K für die dominierenden Hallenbereiche. Einen Überblick über die Außentemperatur vor und während der Untersuchung ist in Abb. 23 dargestellt.

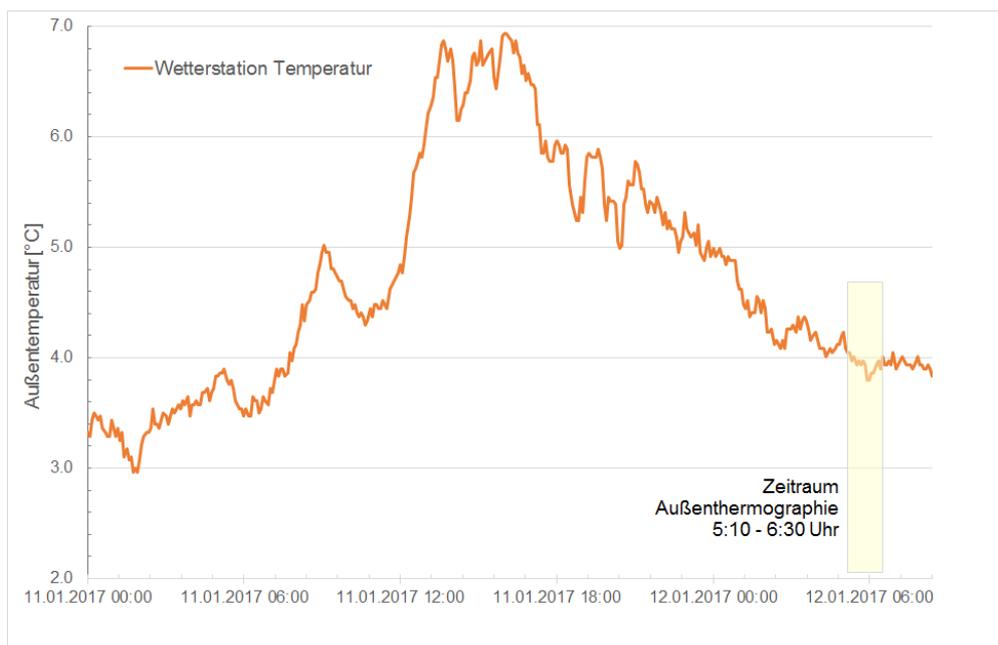


Abb. 23: Außentemperaturverlauf vor und während der Durchführung der thermographischen Untersuchung der Gebäudehülle des Lippe-Bades am 12. Januar 2017.

Außenthermographie

Bei der thermographischen Untersuchung der Gebäudehülle von außen zeigte sich insgesamt ein homogenes Bild der Dämmqualitäten. Typischerweise sind die Fensterrahmen im Vergleich zu den opaken Wandflächen von außen wärmer, also geringer gedämmt. Ein physikalischer Effekt ist, dass die Verglasungen am oberen Rand wärmer ist als am unteren. Ursache dafür ist die Warmluftwalze in den Scheibenzwischenräumen. Bei den Notausgangstüren der Hallen (z.B. Abb. 25 rechts) ist zu erkennen, dass die thermische Qualität bzw. die Luftdichtheit nicht optimal ist. Diese einzelnen, punktuellen Schwachpunkte sind seit der Bauzeit bekannt.

Dass die Oberflächentemperaturen in den z.T. ausgeprägten Fensterlaibungen und unter Dachüberständen höher sind, ist in der Verschattung gegenüber dem kalten Himmel begründet. Generell gilt, dass die Oberflächentemperaturen der Verglasungen aufgrund der von den bauüblichen Wandoberflächen unterschiedlichen Emissionsgrade, nicht direkt mit den Farb-Temperaturskalen der Bilder bewertet werden können. Dies gilt generell für Innen- und Außenthermographien.

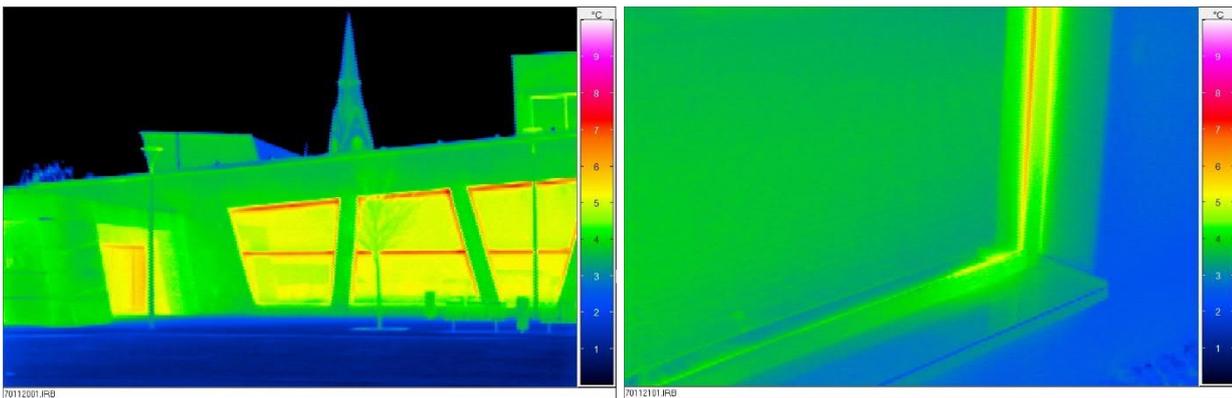


Abb. 24: Links: Westfassade von Halle 1+2 mit einem Teil des Eingangsbereichs.
Rechts: Detail des unteren Bereichs vom rechten Fenster aus dem linken Bild

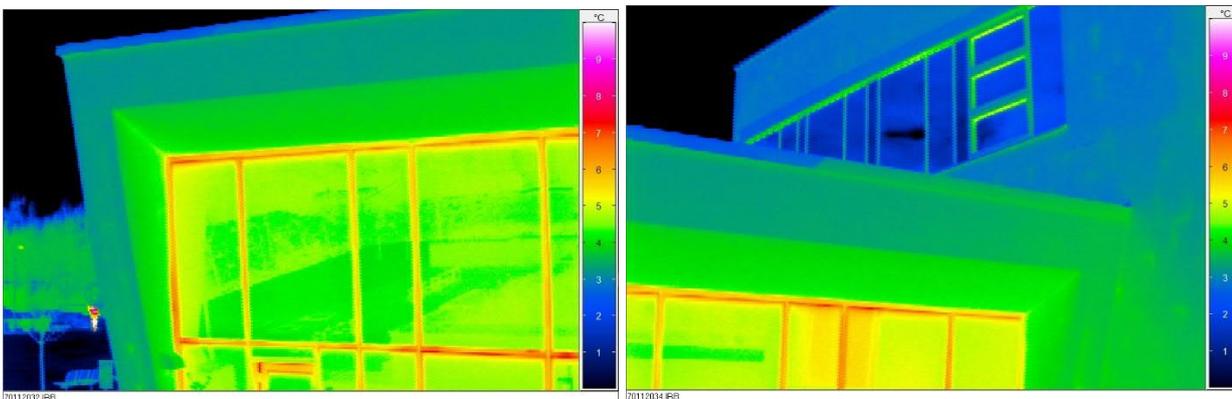


Abb. 25: Links: Südfassade von Halle 1+2 mit großflächiger Verglasung und dem oberen Teil der Außentür.
Rechts: Teil der Südfassade von Halle 3 und der darüber liegenden Westfassade von Halle 5

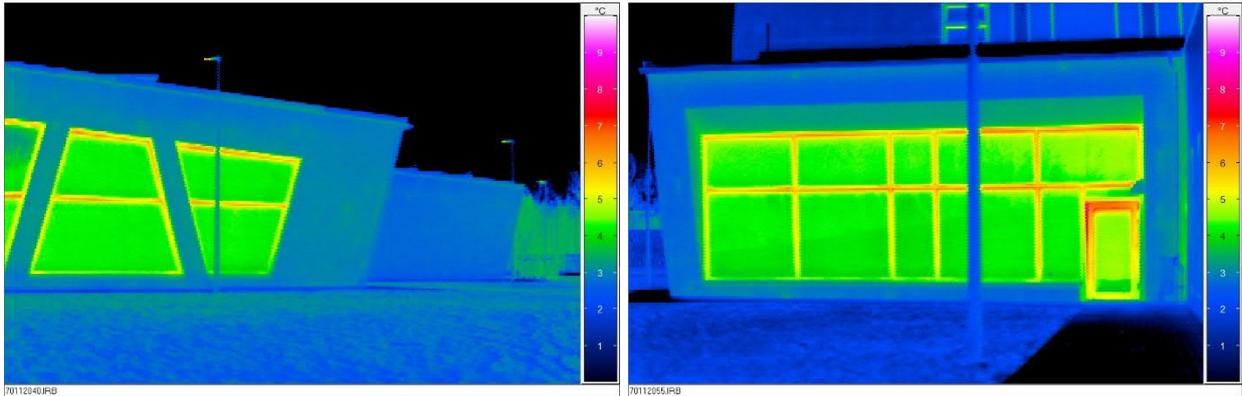


Abb. 26: Links: Ostfassade von Halle 4 mit Fenstern sowie dem Umkleidebereich (ohne Fenster).
Rechts: Nordfassade von Halle 4 mit einer Außentür.

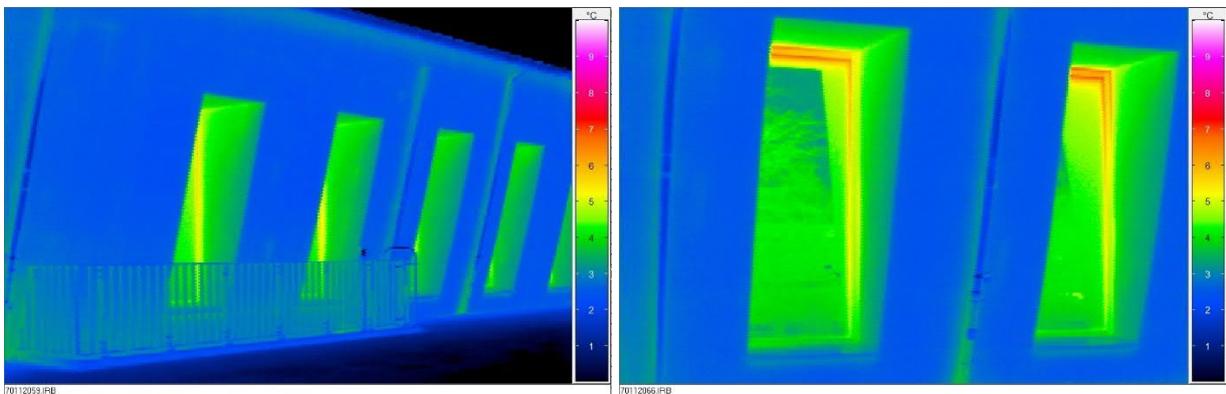


Abb. 27: Links: Schräge Nordfassade (Umkleide).
Rechts: Detail der schrägen Fensternischen auf der Nordfassade

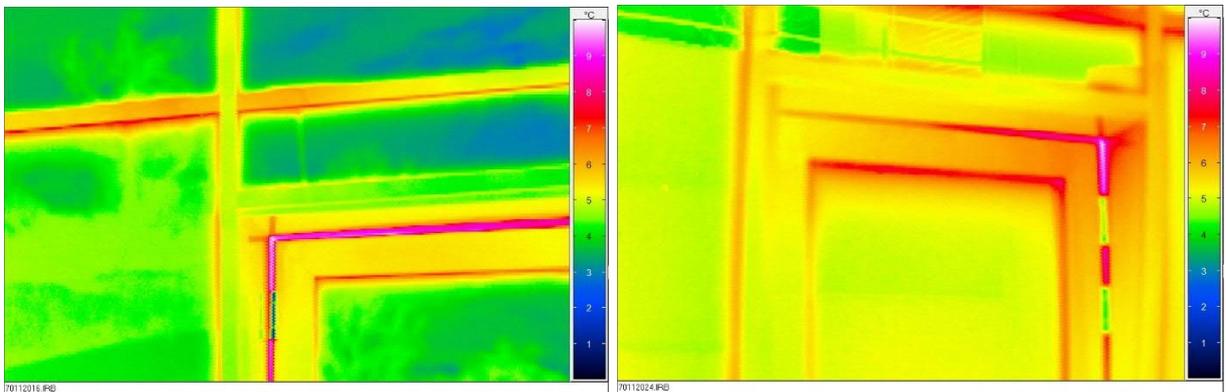


Abb. 28: Links: Oberes Detail der Außentür in der Südfassade von Halle 1+2.
Rechts: Oberes Detail der Außentür in der Südfassade von Halle 3.

Innenthermographie

Direkt im Anschluss an die Außenthmographie wurde das Gebäude von innen thermographisch untersucht. Insgesamt zeigt sich auch dabei eine hohe gleichmäßige Oberflächentemperatur der Außenwände. Dies zeigt die durchgehend hohe Dämmqualität der Außenbauteile. Insbesondere aufgrund der Integration des Altbauteils (Halle 5) an den Neubau und dem großflächigen Einsatz

von Innendämmung (Süd- und Ostwand von Halle 5) wurden diverse thermische Herausforderungen erfolgreich gemeistert. Gute Beispiele dazu zeigen die vier Thermographien in Abb. 29 und Abb. 30.

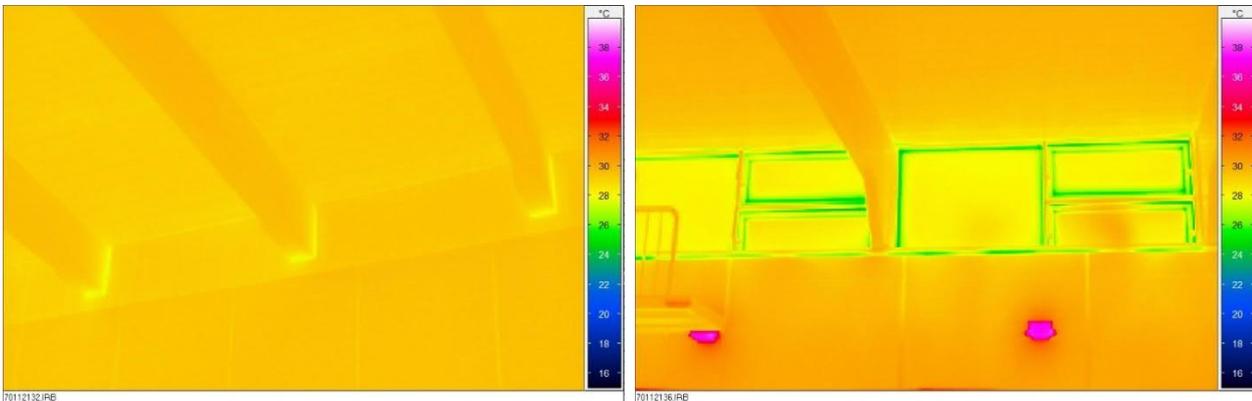


Abb. 29: Innenthermographien mit einheitlichen und hohen Oberflächentemperaturen.
 Links: Anschluss Dach-Wand in Halle 5 (Südwand mit Innendämmung).
 Rechts: Dach-Verglasungsband-Wand in Halle 4 (Nord). Bei den roten Spots handelt es sich um Lampen.

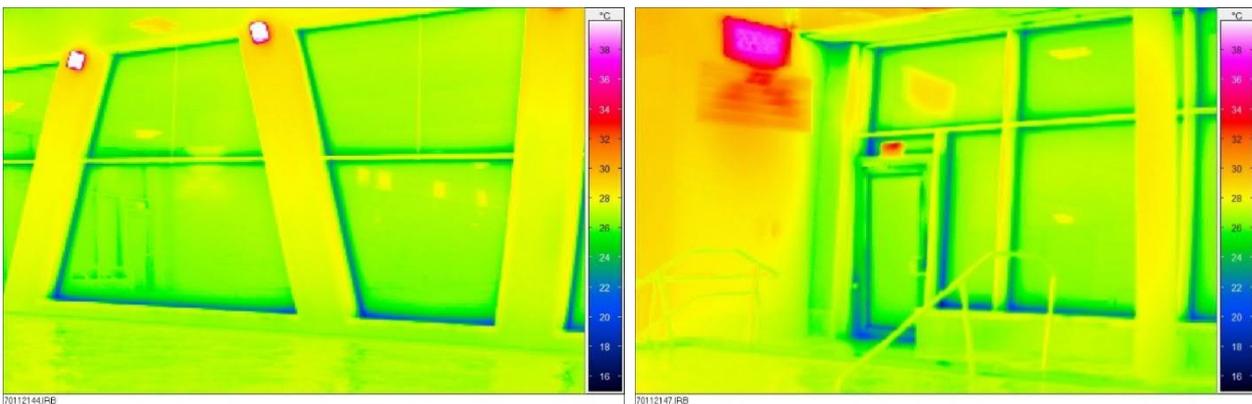


Abb. 30: Innenthermographien mit einheitlichen und hohen Oberflächentemperaturen. Auch bei hochwertigen Dreifachverglasungen mit thermisch optimierten Abstandhaltern stellt der Glasrand den thermisch schwächsten Bereich dar.
 Links: Wand und Verglasungsflächen der Ostfassade in Halle 4
 Rechts: Teil der Nordfassade von Halle 4 mit Außentür (mit beleuchtetem Notausgangsschild darüber) und an der Innenwand (links im Bild) die Zuluftdüsen (oben) und ein Abluftgitter (darunter).

Bei der Untersuchung wurden auch einige Auffälligkeiten bzw. Schwachpunkte gefunden. Die Außentüren in den Hallen (Notausgang) wurden bereits von außen beschrieben. Von innen zeigen sich Oberflächentemperaturen von unter 16 °C, was die Betrachtung von außen bestätigt. Als Beispiel ist die Außentür von Halle 1+2 in zwei Aufnahmen in Abb. 31 dargestellt:

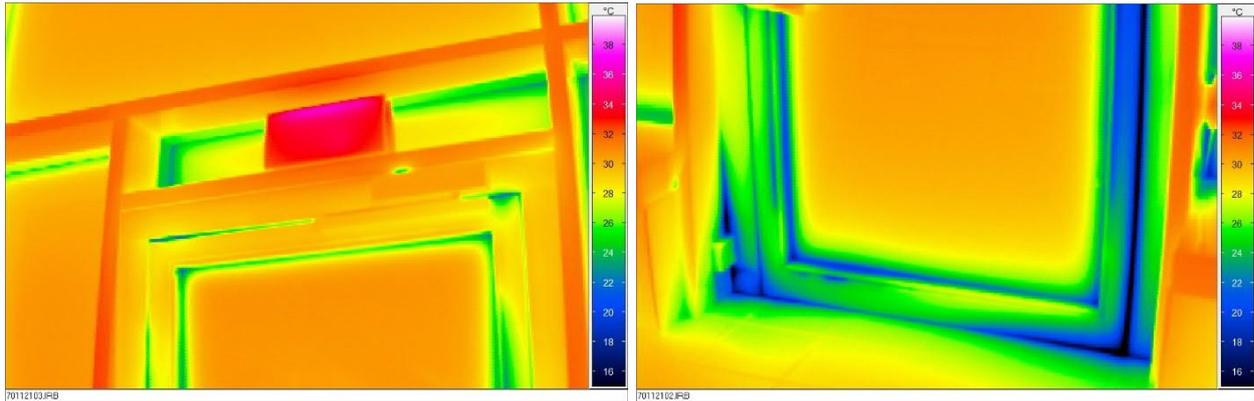


Abb. 31: Außentür oben (links) mit Notausgangsschild und unten (rechts) in Halle 1+2 (Südfassade).

In Halle 1+2 wurden an der Westfassade beim Übergang Dach-Wand stellenweise deutlich niedrigere Temperaturbereiche detektiert als beim Regelanschluss (Abb. 32). Da die Werte unterhalb der Taupunkttemperatur lagen (diese beträgt bei 31°C und 60 % rF etwa 22 °C) wurde der Bauherr und Betreiber des Bades darüber informiert. Dies betrifft auch den Bereich der Stütze in der Nord-Ost-Ecke von Halle 4 in Abb. 33. Nach Aussage des Betreibers wurden bei der im Sommer 2017 folgenden Revision diese beiden Bereiche genauer in Augenschein genommen. Es zeigten sich keinerlei Auffälligkeiten wie Materialschäden oder auch nur Tauwasserspuren auf der Oberfläche. Die Bereiche sollen in Zukunft bei den Revisionen weiter beobachtet werden. Da die Hallen mit geringem Unterdruck (Abluftüberschuss) betrieben werden, wird hier vermutlich im Winter durch Restleckagen trockene Außenluft von außen eingetragen. Dies führt zu einer lokalen Abkühlung aber zu keinen Feuchteschäden. Diese Vermutung könnte nur durch eine Blower Door Messung bei Unterdruck und Kontrolle dieser Bereiche geklärt werden.

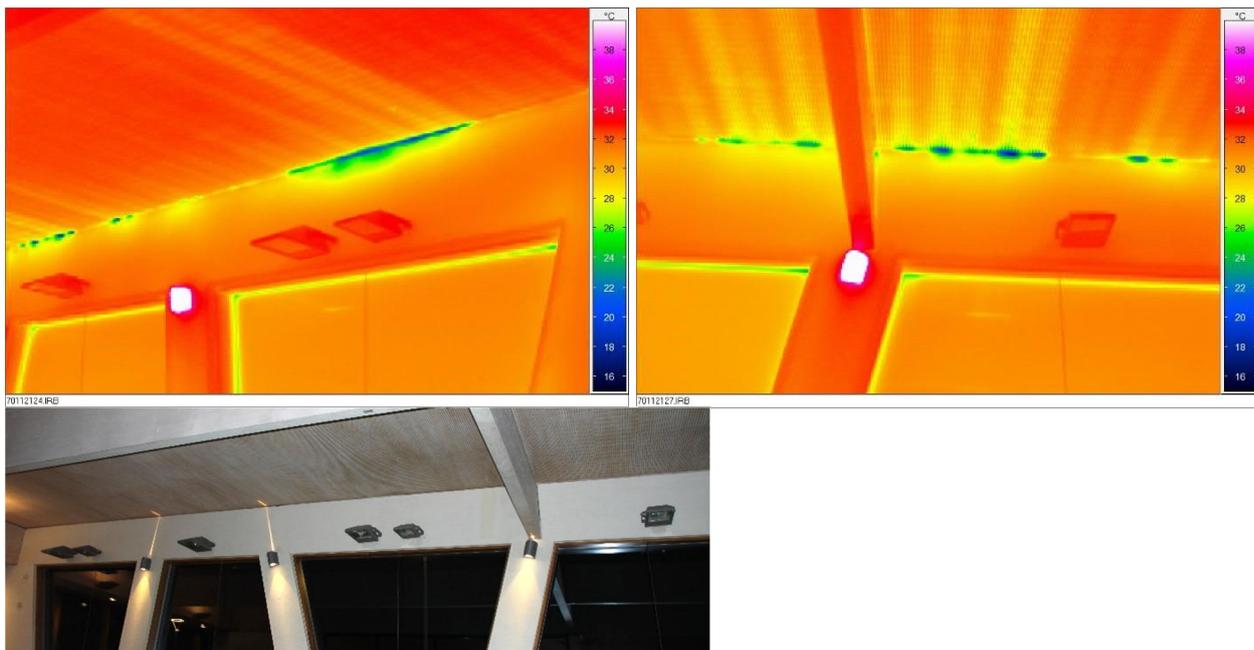


Abb. 32: Westfassade von Halle 1+2 am Dach-Wand Anschluss (Richtung Parkplatz) und darunter das Tageslichtfoto von dem Bereich.

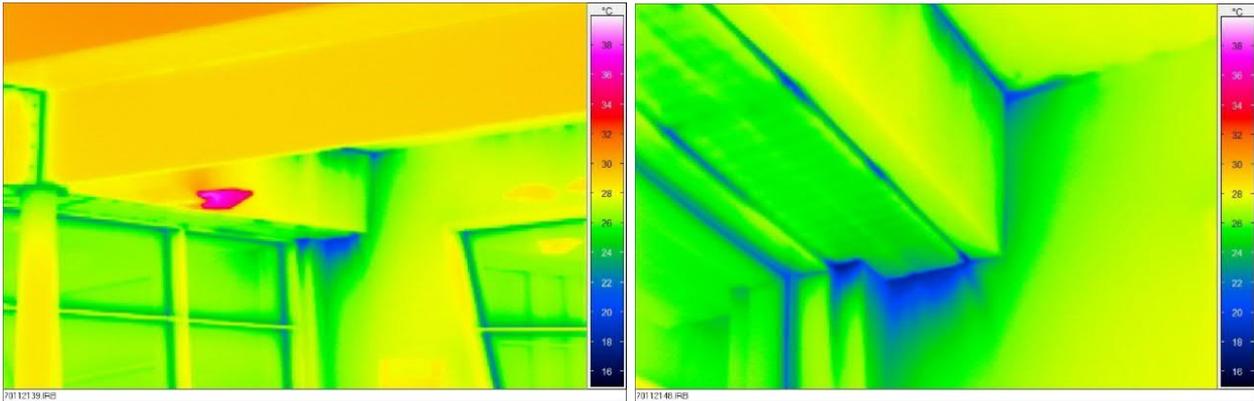


Abb. 33: Nord-Ost-Ecke von Halle 4 im Bereich des Dachanschlusses mit lokalen niedrigeren Oberflächentemperaturen (Detailansicht im rechten Bild).

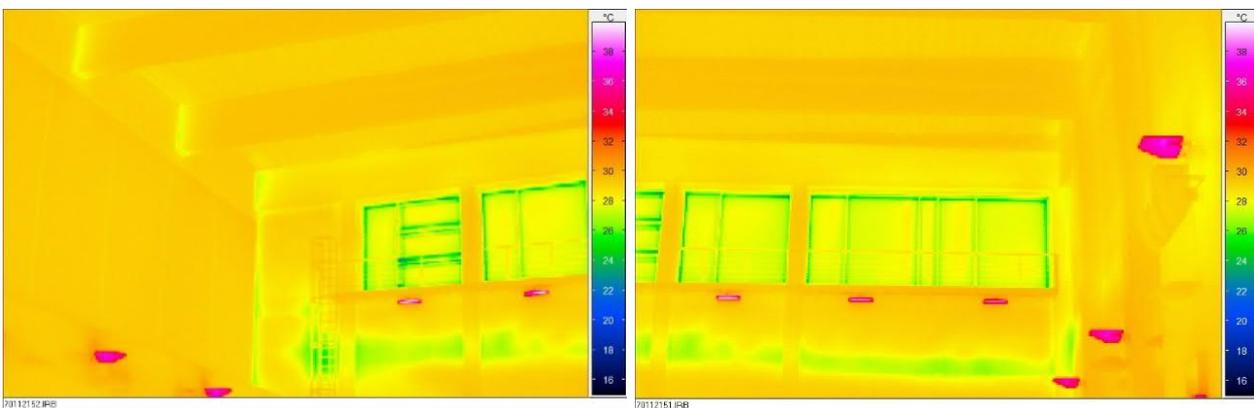


Abb. 34: Oberer Teil der Westfassade und einen Ausschnitt der Südfassade (links im linken Bild) von Halle 5. Bei den roten Spots handelt es sich um Lampen (siehe auch das Foto in der folgenden Abb.).

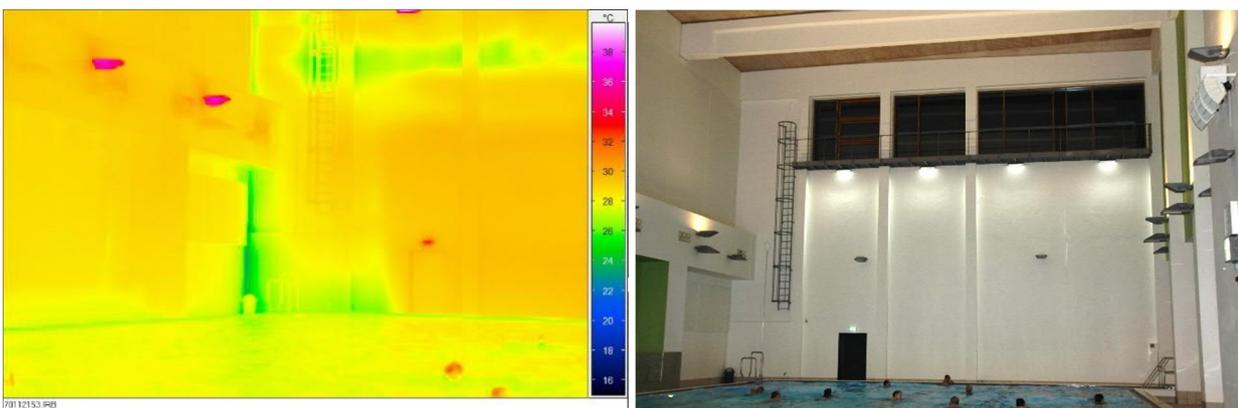


Abb. 35: Links: Thermogramm des unteren Teils der Süd-West-Fassade in Halle 5. Rechts: Fotografie der West-Fassade in Halle 5 mit einem kleinen Ausschnitt der Süd-Fassade.

Die Thermogramme in Abb. 34 und Abb. 35 zeigen Teile der West- und der Südfassade in Halle 5. Es ist zu erkennen, dass die einheitlich hohe Oberflächentemperatur in der West-Fassade in einem horizontalen Band unterhalb der Fenster stellenweise deutlich reduziert ist (bis zu 6 K). Dabei handelt es sich um eine Wärmebrücke durch den Dachanschluss der dahinterliegenden Halle 3. Der Anschluss scheint nicht optimal ausgeführt zu sein. Ein sehr ähnliches Bild zeigt der Bereich unter den Fenstern an der Nordwand von Halle 5, auch im Bereich vom Dachanschluss (ohne Abbildung). Ebenso ist die Verbindung zum Schaltraum (Altbaubereich hinter der Südfassade) in der Kante (Süd-West) im unteren Bereich auffällig kühler. Auch hier liegen Abweichungen von einer thermisch geschlossenen Dämmebene vor. Die anderen Bereiche in Halle 5 zeigen harmonisch hohe Oberflächentemperaturen.

5 Lüftung: Leitfaden

Die richtige Lüftung in Hallenbädern spielt aus gesundheitlichen, bauphysikalischen und energetischen Gründen eine große Rolle. Im folgenden Kapitel werden grundlegende Zusammenhänge erklärt, Versuche und Simulationen erörtert und Empfehlungen ausgesprochen.

5.1 Leitfaden Lüftung in der Schwimmhalle

Aufgabe

Die Lüftung von Schwimmhallen hat zwei Hauptaufgaben: Die Sicherstellung guter Luftqualität (Hygienische Lüftung zur Abfuhr v.a. von Desinfektionsnebenprodukten), sowie die Entfeuchtung der Hallenluft. Um die Hallenluft auf einer konstanten Luftfeuchtigkeit zu halten, muss das Wasser, das kontinuierlich verdunstet, ständig abgeführt werden. Um die Energieverluste durch das Lüften gering zu halten, eignen sich Lüftungsgeräte mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung. Der Zuluftvolumenstrom kann genutzt werden, um die benötigte Heizenergie in die Halle einzubringen. Die bisherige zusätzliche Aufgabe der Lüftung, die Fassade kondensatfrei zu halten, indem die Verglasung mit trockener Luft angeblasen wird, entfällt in der Regel im Passivhaus auf Grund der hohen thermischen Qualität von Fensterrahmen, Verglasung und Abstandhalter.

Dies ermöglicht es in einem Klima wie in Deutschland, die Lüftungsgeräte nur mit Außenluft zu betreiben. Der übliche Umluftanteil nach VDI 2089 kann entfallen oder zumindest deutlich reduziert werden, wodurch signifikante Stromeinsparungen erreicht werden. Der Außenluftvolumenstrom wird nach dem Entfeuchtungsbedarf geregelt, sollte aber einen Mindestvolumenstrom zur hygienischen Lüftung (abhängig von der Wasserqualität 15 % bzw. 30 % des Nennvolumenstroms nach [VDI 2089]) nicht unterschreiten. Die Verdunstung des Beckenwassers kann durch verschiedene Maßnahmen verringert werden, wodurch die benötigte Entfeuchtungsleistung der Lüftung sinkt. Effiziente Maßnahmen sind höhere Luftfeuchten und verdunstungsarme Überlaufwannen, das Abschalten von nichtgenutzten Attraktionen und das Ausschalten der Überlaufwanne im Ruhebetrieb. (siehe auch Kapitel 8.1)

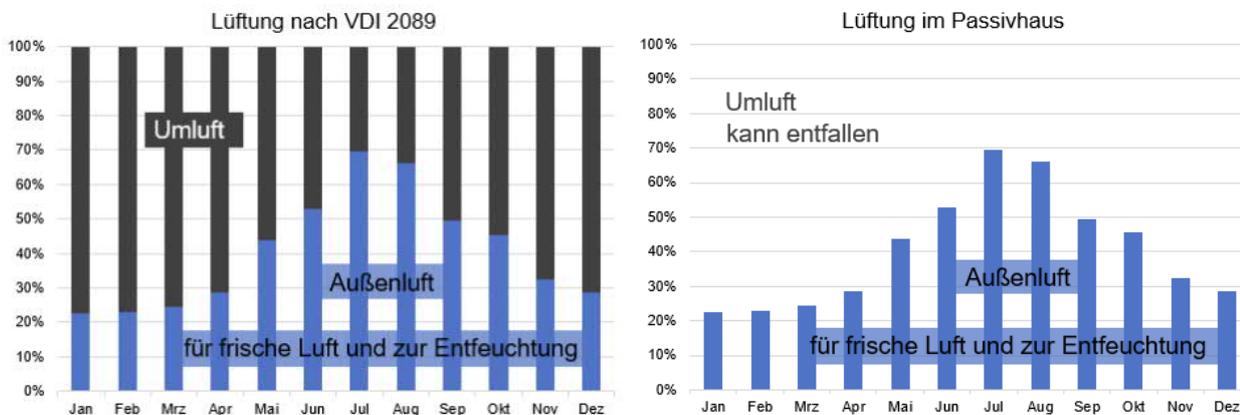


Abb. 36 Vergleich des Volumenstroms zwischen Lüftung nach VDI 2089 und nach Passivhaus-Konzept. (Dargestellt sind Monatsmittelwerte)

Hallenkonditionen

Da die Anforderungen an die Hallenkondition teilweise gegensätzlich sind (Anforderung für verschiedene Nutzer, für Bauschutz, für Energiebedarf), sollte die Festlegung der Solltemperaturen und -feuchten projektspezifisch erfolgen. Ein nasser Badegast bevorzugt möglichst hohe relative Luftfeuchten, während das Personal sich bei niedrigeren Feuchten wohler fühlt. Deswegen sollte schon beim Entwurf ein speziell temperierter Schwimmmeisterraum eingeplant werden. Aus Bauschutzgründen sollte die relative Feuchte 64 % nicht länger überschreiten [Schulz et al. 2009].

Auf Grund der verschiedenen Anforderungen ist eine Schichtlüftung zu empfehlen, die im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Als Richtwert für die Planung wird eine Feuchte von um die 55% im Beckenumgang (1,5 m Höhe) vorgeschlagen. Die tatsächliche Höhe der Feuchte sollte dann im Betrieb getestet und festgelegt werden. Je feuchter die Luftschicht, die unmittelbar über der Wasseroberfläche ist, realisiert werden kann, desto geringer ist die Beckenwasserverdunstung und umso geringer fallen die Energiekosten aus.

Bei der Messung von Feuchte muss beachtet werden, dass selbst bei hochwertigen Sensoren die Messungsgenauigkeit relativ groß ist und dass die Sensoren oft zusätzlich mit der Zeit driften. Da kann es leicht zu Abweichungen von insgesamt über 10 %-Punkten kommen. Aus diesem Grund ist beim Vergleich von Feuchten oder dem Festlegen von Sollwerten Vorsicht geboten.

Eine Passivhaus-Gebäudehülle hat den Vorteil höherer Innenoberflächentemperaturen an allen Bauteilen, was u.a. zu einer geringeren Temperaturschichtung im Raum führt. Das heißt die Luftkonditionen sind im Passivhaus homogener als bei geringeren Energiestandards. Dennoch werden sich z.B. auf Grund der Luftführung unterschiedliche Feuchten im Raum einstellen. Aufgrund der Messungsgenauigkeiten und der Feuchtedifferenzen im Raum sollte man sich für den Bauschutz nicht alleine auf Regelungen verlassen, sondern regelmäßige Bauschutzkontrollen statisch relevanter Bauteile durchführen lassen.

Hallendurchströmung

Um die Schadstoffe effizient abzuführen ist eine gute Luftführung und Durchströmung der Halle essentiell. Es hat sich herausgestellt, dass eine sogenannte Schichtlüftung viele Vorteile mit sich bringt. Dabei bildet sich eine feuchte Schicht direkt über dem Wasser, was eine geringere Verdunstung zur Folge hat. Die Luft in 50 cm über dem Wasserspiegel ist bereits wesentlich trockener (ca. 10 %-Punkte), was wiederum ein angenehmes Klima für die trockenen Personen im Umgang (Personal) bietet. Zusätzlich ist dadurch die Gebäudehülle geringeren Feuchten ausgesetzt.

Die Schichtlüftung wird erreicht, in dem die Abluft im unteren Bereich der Halle abgeführt wird. Das hat nicht nur energetische Vorteile sondern führt auch effektiv die am Wasser entstehenden Schadstoffe ab (siehe Kapitel 6.4 "Luftführung in der Schwimmhalle"). Die Zuluft kann dabei wahlweise an der Fassade, oberhalb des Aufenthaltsbereiches oder an der Decke eingebracht werden. Wichtig ist, dass die feuchte Schicht über dem Becken nicht durch impulshafte Luft-einbringung zerstört wird. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass keine kalte Luft aus Nebenräumen in die Halle strömen, da diese die feuchte, warme Schicht über dem Becken

anheben würden. In Abb. 37 ist eine grafische Darstellung der Schichtlüftung dargestellt. Im Kap. 6.5 "Schadstoffmessungen (THM)" wird beschrieben wie die Schichtlüftung im Familienbad Niederheid umgesetzt wurde.

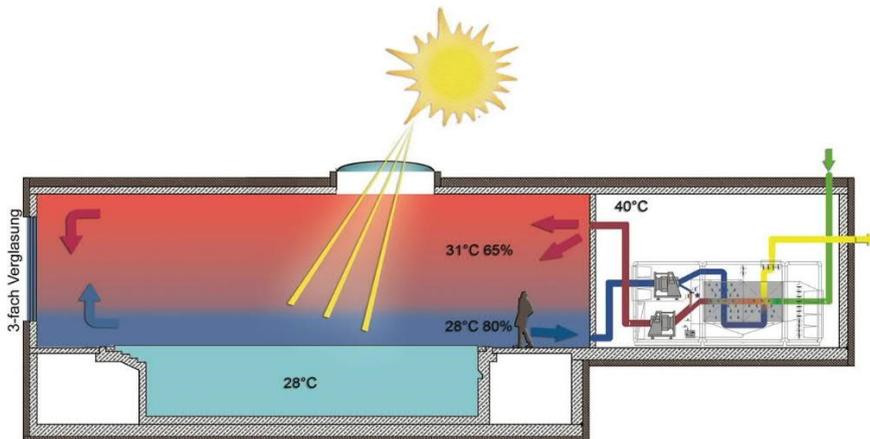


Abb. 37: Luftführung mit bodennaher Absaugung, die zu einer vorteilhaften Temperatur- und Feuchteschichtung führt. Quelle: [Kaluza 2016].

Kanalnetz

Die Investitionskosten, der Platzbedarf und die Stromkosten sind geringer, je kompakter das Kanalnetz ist. Das Kanalnetz sollte so ausgelegt werden, dass die Druckverluste möglichst gering sind. Luftgeschwindigkeiten von unter 3 m/s sind empfehlenswert. Noch entscheidender ist es, bei der Wahl der Komponenten auf druckverlustarme Einbauteile zu achten (z.B. den Kanalquerschnitt für das Außenluftgitter zu vergrößern).

Das Lüftungsgerät sollte möglichst nah an der thermischen Hülle aufgestellt werden, um eine kurze Kanalführung von Außen- und Fortluftkanal (zwischen Lüftungsgerät und thermischer Hülle) realisieren zu können. Diese Kanäle müssen in jedem Fall vollständig, dampfdiffusionsdicht und gut gedämmt werden (min. 10 cm), da hohe Wärmeverluste zwischen Innenraum und kalten Außen- und Fortluftkanälen den effektiven Wärmebereitstellungsgrad von Lüftungsgeräten deutlich senken. Falls sich eine längere Zu- und Abluftführung durch kältere Nebenzonen nicht vermeiden lässt, sollte diese ebenfalls gedämmt werden.

Die Abluft kann zentral über ein Abluftgitter abgesogen werden. Beispiel Familienbad Niederheid (siehe 6.5 Schadstoffmessungen (THM)): Bei 30.000 m³/h Maximalvolumenstrom ist ein Abluftgitter von 2 m x 2 m ausreichend. In einer Entfernung von 50 cm vor dem Gitter ist ein Zug spürbar, aber schon bei einem Meter Abstand wird keine Luftbewegung mehr wahrgenommen. Aus diesem Grund sollte das Abluftgitter nicht in unmittelbarer Nähe zu Sitzbänken o.ä. positioniert werden, es sei denn die Querschnittsflächen werden entsprechend vergrößert. Alternativ zu einer zentralen Abluft, kann die Abluft entlang einer Wand abgesogen werden. Entscheidend für die Schichtlüftung ist in beiden Fällen, dass die Abluftöffnungen unten im Raum installiert werden.

Für die Zuluftbringung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Wichtig ist darauf zu achten, dass die Durchströmung des Raumes auch bei niedrigem Zuluftvolumenstrom gegeben ist und dass die Feuchteschicht über der Wasseroberfläche nicht gestört wird. (verschiedene Varianten für Zu- und Abluftführung wurden in einer CFD-Simulation untersucht, siehe Kapitel 6.4.)

Soll ein intermittierender Lüftungsbetrieb (Abschaltung der Lüftungsgeräte während der Nacht) realisiert werden, empfehlen sich motorisch betriebene Klappen im Außen- und Fortluftkanal, am besten in der Ebene der thermischen Gebäudehülle. Damit wird verhindert, dass außerhalb der Nutzungszeiten kalte Außenluft in die Kanäle strömt. Es ist hilfreich, bei der Planung bereits das Vorgehen bei der Einregulierung zu berücksichtigen und festzulegen, an welchen Stellen in den Kanälen die Volumenströme gemessen werden sollen. Passend dazu sollte für die Einregulierung eine Aufstellung mit den Ventilen bzw. den Messstellen im Strang mit den jeweiligen Standardvolumenströmen (oder mittleren Volumenströmen) erstellt werden.

Lüftungsgerät

Der maximale Volumenstrom eines Hallenlüftungsgerätes wird ausgelegt, um die Raumluft auch im Sommer unter feuchten Außenluftbedingungen über die Frischluft entfeuchten zu können. Hierfür wird die Verdunstung nach VDI 2089 berechnet. Diese basiert auf einer Annahme für die Verdunstungsmenge je nach Beckentyp (der sogenannte Wasserübergangskoeffizient β). Es wird empfohlen, eine Auslegung mit geringerem Auslegungsvolumenstrom gegenüber Norm in Betracht zu ziehen, denn durch kleinere Auslegung ergeben sich Einsparpotentiale für Investitionskosten. Zudem erleichtert eine reduzierte Bandbreite der abzudeckenden Volumenströme die Komponentenauswahl (z.B. Ventilatoren) für eine insgesamt effiziente Betriebsweise der Lüftungsgeräte. Als Richtwert für eine typische Nutzung (ohne Attraktionen) eignet sich die Annahme eines Wasserübergangskoeffizienten von $\beta = 20$ m/h (Formel nach VDI 2089), unabhängig von der Beckentiefe (Herleitung siehe Kapitel 6.1 "Auslegung der Schwimmhallen-Lüftungsgeräte"). Dies ermöglicht die Auswahl kleinerer Lüftungsgeräte (50-70 % gegenüber konventioneller Auslegung). Selbstverständlich müssen hierbei die Randbedingungen des konkreten Projektes berücksichtigt werden, insbesondere die zu erwartende Nutzung.

Da die Hallenluft durch hohe Temperatur und Luftfeuchtigkeit viel Energie enthält, macht sich ein hoher Wärmerückgewinnungsgrad der Anlage doppelt bezahlt. Sowohl die sensible als auch die latente Energie können zum Teil zurückgewonnen und dadurch der Heizwärmebedarf reduziert werden. Dazu eignen sich Gegenstromwärmetauscher. Das Material des Wärmetauschers muss für die Schwimmhallenluft (hohe Feuchtigkeit, Chlor) geeignet sein. Für die Schwimmhallen wird ein Wärmebereitstellungsgrad (trocken) von ≥ 85 % empfohlen, und zwar bei mittleren zu erwartenden Außenluftvolumenströmen der Wintermonate. Die Effizienz sollte in der Planungsphase in Absprache mit dem Hersteller sowohl für den Voll- als auch für den Minimalbetrieb überprüft werden.

Da die Volumenströme sowohl im Tages- als auch im Jahresverlauf stark schwankend sind und das Gerät größtenteils im Teillastbetrieb betrieben wird, sollte bei der Auswahl der Ventilatoren unbedingt auf hohe Effizienz auch im Teillastbetrieb geachtet werden. Um die hohe Spanne an Volumenströmen effizient abdecken zu können, kann es ggf. sinnvoll sein zwei Ventilatoren parallel einzusetzen, anstatt einem. Als Richtwert gilt für Passivhäuser maximal $0,45$ Wh/m³ Strombedarf.

Eine weitere Anforderung an das Lüftungsgerät ist ein automatischer, interner Balanceabgleich für die Außen- und Fortluft, damit zum Schutz der Gebäudehülle ein Überdruck im Gebäude vermieden wird. Ein leichter Unterdruck ist in Ordnung. Zur Reduzierung der Druckverluste sollte eine einstufige Filterung statt einer zweistufigen Filterung geprüft werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass druckverlustarme Taschenfilter eventuell etwas mehr Platz erfordern. Deshalb ist es wichtig dies frühzeitig in der Planung zu prüfen und festzulegen.

Ob es vorteilhaft ist eine Fortluftwärmepumpe einzusetzen, muss projektspezifisch geprüft werden, da Wärmepumpen oft mit einem Blockheizkraftwerk oder Nahwärmenetz energetisch „konkurrieren“ müssen. Kommt eine Wärmepumpe zum Einsatz, sollte sie so ausgelegt werden, dass sie auch betrieben werden kann, wenn das Lüftungsgerät nur mit Mindestvolumenstrom betrieben wird (Teillast). Die zusätzlichen Druckverluste der Register müssen auf jeden Fall mit bilanziert werden.

Regelung

Die Regelung der Lüftung von Schwimmhallen sollte einen Mindestvolumenstrom für die Schadstoffabfuhr gewähren und darüber hinaus den Außenluftvolumenstrom in Abhängigkeit des Entfeuchtungsbedarfs erhöhen. Ein Umluftvolumenstrom kann und sollte vermieden werden. Die Messungen im Passivhushallenbad Bambados haben gezeigt, dass in der Praxis keine zusätzliche Umluft zur Beheizung der Hallen notwendig war. Falls dennoch die Zuluft einmal nicht ausreichend ist, um genügend Heizlast einzubringen, kann zeitweise Umluft (am Rekuperator vorbei) gefahren werden.

Während des Ruhebetriebes ist eine Abschaltung der Geräte mit Überwachung der Hallenfeuchte empfehlenswert. (siehe auch 6.6 Programmierung Lüftungsgerät Schwimmhalle)

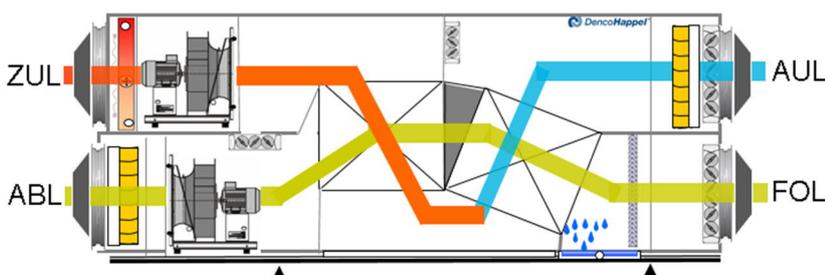


Abb. 38: Schwimmhallenlüftung in reinem Außenluftbetrieb, d.h. ohne Umluft (Grafik © FlaktGroup Deutschland GmbH)

Die Regelung der Gebäudetechnik erfolgt üblicherweise mittels einer Gebäudeleittechnik (GLT). Für die spätere Kontrolle des Betriebes ist es sinnvoll, wenn die verschiedenen programminternen Regler (z.B. für Heizen oder Entfeuchten) für den Betreiber sichtbar sind. Auf diese Weise kann der Betrieb leichter überprüft und optimiert werden. (Ein Regler ist eine programminterne Größe; Beispiel: Wenn die Formeln im Programm aus den Messwerten errechnen, dass ein Entfeuchtungsbedarf besteht, wird der Regler "Entfeuchten" aktiv, was wiederum zu weiteren Aktionen in der Regelung führt z.B. Steuerung des Ventilators)

Inbetriebnahme

Folgende Punkte sollten bei der Inbetriebnahme überprüft werden:

- Gerät in Balance (Außen- und Fortluft) oder leichter Unterdruck im Gebäude
- Bei Betrieb ohne Umluft: Ab-, Zu-, Fort- und Außenluftklappen ganz offen und Umluftklappen ganz geschlossen?
- Auch bei maximalem Volumenstrom keine Zuglufterscheinungen und Geräusche?
- Evtl. Nebelversuch zur Kontrolle der Luftdurchmischung?
- Die verschiedenen Regelungen können natürlich am besten überprüft werden, wenn die entsprechende Situation hervorgerufen wird (z.B. starke Verdunstung: Dann sollte das Lüftungsgerät den Volumenstrom zur Entfeuchtung erhöhen).

Die Lüftungsgeräte werden in der Regel an einem Tag in Betrieb genommen. Die Regelung der Geräte sollte dagegen über einen längeren Zeitraum durch eine Auswertung der Betriebsdaten kontrolliert werden. Auf diese Weise können unterschiedliche Betriebszustände überprüft werden. Ein Hallenbad ist ein technisch komplexes Gebäude. Eine Betriebsoptimierung im ersten Jahr sorgt dafür, dass keine Investitionen unnötig getätigt wurden, sondern die gewünschte Performance des Gebäudes erreicht wird. Die ausführenden Firmen (Lüftungsfirma, Lüftungshersteller) sollten dazu frühzeitig beauftragt werden.

Betriebsoptimierung und Betriebsführung

Grundlegend ist eine transparente und überprüfbare Betriebsführung, sowie geschulte Betriebsleiter. Werden die Regler der Lüftungsprogrammierung (Entfeuchten, Heizen, evtl. Kühlen) einfach angezeigt, bekommt man einen Überblick über Zeit und Dauer von z.B. Heizanforderung und Entfeuchtungsbedarf. Nur durch einen regelmäßigen Überblick werden Abweichungen im Betrieb leicht erkannt. Ebenso wichtig ist die Kontrolle des Außen-, Zu- und Abluftvolumenstrom als Zeitdiagramm. Werden dazu Wochengänge miteinander verglichen, fallen Änderungen sofort auf. Wird die Hallenlüftung ohne Umluft betrieben, sollten die drei Volumenströme in der Regel gleich hoch sein. Sinnvoll ist es von Zeit zu Zeit die Klappenstellungen zu überprüfen: Ab-, Zu-, Fort- und Außenluftklappen sollten während des Betriebs der Lüftungsgeräte ganz geöffnet sein, um die Druckverluste gering zu halten.

5.2 Leitfaden Lüftung Nebenzone

In Hallenbädern gibt es außer der Schwimmhalle immer verschiedene Nebenzone mit anderen Temperatur- und Feuchteverhältnissen: Duschen, Umkleiden und Technikräume/-keller. Darüber hinaus gibt es häufig Verwaltung, Foyer, Sauna, Gastronomie, Spa, Fitness, Schulungsräume, Serverräume, Trafo, sonstige Elektroräume. Es ist hilfreich schon im Entwurf, die Anforderungen der Räume abzuklären und entsprechend zu Zonen zusammenfassen. Zwischen Zonen, die große Differenz in der Lufttemperatur aufweisen, sollte eine thermische Trennung realisiert werden. Für die Wahl der Lüftungszonen sollten folgende Faktoren berücksichtigt werden: Solltemperatur, maximale Temperaturen, Entfeuchtungsbedarf, Nutzungszeiten und Nutzungsschwankungen. Es muss festgelegt werden, welche Räume zusammen von einem Lüftungsgerät versorgt werden und wie viele Lüftungsgeräte insgesamt geplant werden. Am einfachsten ist es, wenn sich die Temperatur- und Lüftungszonen decken. Werden viele kleine Lüftungsgeräte geplant, kann am besten nach dem tatsächlichen Bedarf geregelt werden. Allerdings sollte ein praktikabler Mittelweg gewählt werden und Bereiche zusammengefasst werden. Aus Energie- und Komfortgründen sollte nach Bedarf gelüftet werden, aber gleichzeitig sollen die Investitionskosten gering und die Regelung einfach gehalten werden. Bei einzelnen Räumen bzw. kleinen Zonen, die sich in der Nutzung sehr vom Rest unterscheiden, lohnt es sich zu überprüfen, ob ein kleines dezentrales Gerät einsetzbar ist. Grundlegende Aufgabe der Lüftung ist es, für einen hygienischen Luftwechsel zu sorgen. Gleichzeitig kann die Lüftung zur Beheizung der Nebenräume dienen und somit die Installation von Heizkörpern entfallen.

Bei der Umsetzung sollten folgende Ziele verfolgt werden: Druckverlustarmes Kanalnetz, effiziente Ventilatoren, guter Wärmebereitstellungsgrad, bedarfsgerechte Regelung des Volumenstroms.

Bedarfsgerechte Volumenströme

Für die Höhe der Volumenströme gibt es verschiedene Anforderungen in Normen und Regelwerken. Dabei wird immer der Volumenstrom für den ungünstigsten Fall angegeben. Grundlegendes und sehr wichtiges Instrument des Passivhaus-Konzeptes ist es, einen Volumenstrom zu realisieren, der dem Bedarf angepasst ist. Damit konnten im Passivhaus-Bad Bambados die Stromkosten für die Lüftung um 50 % gesenkt werden. Zusätzlich zur Stromeinsparung sinken die Lüftungswärmeverluste und damit der Heizwärmeverbrauch.

Schritt eins einer bedarfsgerechten Regelung ist, das Gerät nur zu Nutzungszeiten laufen zu lassen. Dabei sollte eventuell eine Nachspülzeit und auf jeden Fall eine Vorspülzeit vor Betriebsbeginn eingeplant werden. Während der Vorspülzeit wird die Luft ausgetauscht, so dass gleich zu Beginn der Raumnutzung gute Luftqualität gewährleistet werden kann. Geeignet erscheint ein einfacher Luftwechsel als Vorspülung. Schritt zwei einer bedarfsgerechten Regelung ist die Anpassung des Volumenstroms an die jeweils momentane, tatsächliche Nutzung der Zone. Je nach Art der Nutzung eignen sich z.B. Feuchtesensoren, CO₂ - Sensoren oder Präsenzmelder.

Duschen und Umkleiden

Empfehlenswert ist eine gerichtete Überströmung von den Umkleiden zu den Duschen. Dadurch kann die Luft "doppelt" genutzt werden, womit insgesamt geringere Gesamtvolumenströme und kleinere Lüftungsgeräte benötigt werden.

Duschen und Umkleiden können von einem Lüftungsgerät versorgt werden. Die Zuluft wird in die Umkleiden geführt und strömt von dort in die Duschen über. Zusätzlich zu einem Grundluftwechsel wird während der Nutzungszeit der Volumenstrom in Abhängigkeit der Feuchte geregelt: Bei größerem Entfeuchtungsbedarf in den Duschen, wird der Gesamtvolumenstrom des Gerätes erhöht. Nachts wird das Gerät ausgeschaltet und es gibt eine Sicherheitsschaltung, falls es in den Duschen zu feucht wird.

Technikkeller

Es ist wichtig, dass auch der Technikkeller mit Frischluft versorgt wird, da dort täglich gearbeitet wird. Außerdem dient die Lüftung dazu, eventuelle Feuchte abzutransportieren. Da auch bei effizienter Lüftungs- und Schwimmbadtechnik Wärme an den umgebenden Raum abgegeben wird, ist - wie im Rest des Hallenbades - eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung selbstverständlich. Dabei ist abzuwägen, ob der Technikraum durch ein eigenes Lüftungsgerät oder z.B. durch das Lüftungsgerät für die Umkleiden belüftet wird. Um die Lüftungswärmeverluste gering zu halten sollte zudem der Luftwechsel nicht unnötig hoch ausgelegt werden.

Lüftungsgeräte

Für die Lüftungsgeräte der Nebenzonen gelten ebenfalls die Grundprinzipien, die im Kapitel 5.1 Leitfaden Lüftung in der Schwimmhalle aufgeführt sind.

Kanalnetz

Für das Kanalnetz der Nebenzonen gelten ebenfalls die Grundprinzipien, die im Kapitel 5.1 Leitfaden Lüftung in der Schwimmhalle aufgeführt sind.

Während der Planungsphase sollte bereits festgelegt werden, welche Stränge für die Einregulierung an welchen Positionen gemessen werden können. Werden Volumenstromregler eingeplant, um einzelne Bereiche individuell regeln zu können, sollte die Einsparung durch die Regelung gegen den Mehrverbrauch durch zusätzliche Druckverluste abgewogen werden.

Regelung

Wichtiger Grundsatz: Die Regelung möglichst einfach halten! Auch wenn die Technik viele Möglichkeiten anbietet, müssen Regelungskonzepte erstellt, Programmierungen durchgeführt und kontrolliert werden. Am effektivsten ist die Planung, wenn der spätere Betreiber/Betriebsleiter miteinbezogen werden kann. Wenn er die geplanten Regelungen kennt, kann er diese im Betrieb besser überprüfen, handhaben und optimieren.

In manchen kühleren Bereichen kann eine Nachtlüftung zur Auskühlung notwendig sein. Dabei ist es wichtig, dass diese gezielt eingesetzt wird, da im Großteil des Gebäudes während des ganzen Jahres Heizwärmebedarf besteht. Die Nachtlüftung kann passiv durch Lüftung über Fenster oder über das Lüftungsgerät mit Sommerbypass erfolgen. Die passive Lüftungsstrategie hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Wärmelasten eingebracht werden, im Gegensatz zur Lüftung mit Ventilatoren. Ein außenliegender Sonnenschutz ist in diesen Bereichen empfehlenswert, da er die solaren Gewinne vermindert.

6 Lüftung: Ausgewählte Fragestellungen

6.1 Auslegung der Schwimmhallen-Lüftungsgeräte

Die Auslegung der Hallenlüftungsgeräte erfolgt nach VDI 2089 mit einer Referenz-Außenluftfeuchte von 9 g/kg und definierter Verdunstungsrate je nach Beckentyp. Der tatsächliche Außenluftvolumenstrom in der Nutzung wird dann nach dem Entfeuchtungsbedarf geregelt und es zeigt sich, dass die Lüftungsgeräte meistens mit deutlich niedrigeren Außenluftvolumenströmen betrieben werden. Die Spitzenwerte werden nur zeitweise im Sommer bei hoher Außenluftfeuchte und hohen Verdunstungsraten erreicht. Es stellt sich daher die Frage, ob es möglich ist, die Lüftungsgeräte etwas kleiner auszulegen und welche Auswirkung dies auf sommerliche Raumluftfeuchten hätte. Durch eine kleinere Auslegung ergeben sich Einsparpotentiale für die Investitionskosten. Zudem erleichtert eine reduzierte Bandbreite der abzudeckenden Volumenströme die Komponentenauswahl (z.B. Ventilatoren). Für eine insgesamt effiziente Betriebsweise der Lüftungsgeräte ist es wichtig, dass die Geräte sowohl bei Voll- als auch bei Teillast effizient arbeiten.

Datenauswertung Lippe-Bad

Laut Auswertung der gemessenen Wetterstationsdaten auf dem Lippe-Bad in Lünen von 2016 und 2017 übersteigt die stundenmittlere Außenluftfeuchte ca. 20% pro Jahr den von der VDI 2089 genannten Grenzwert von 9 g/kg (Abb. 39). Diese Überschreitungen fallen zum Teil in die Sommerpause bzw. in die Revisionszeit des Lippe-Bades im Juli/August. Bezogen auf die Zeit außerhalb der Revisionszeit beträgt die Überschreitung ca. 15% der Betriebsstunden des Bades. Spitzenwerte über 12 g/kg bis maximal 15 g/kg treten nur in den Monaten Mai-September auf.

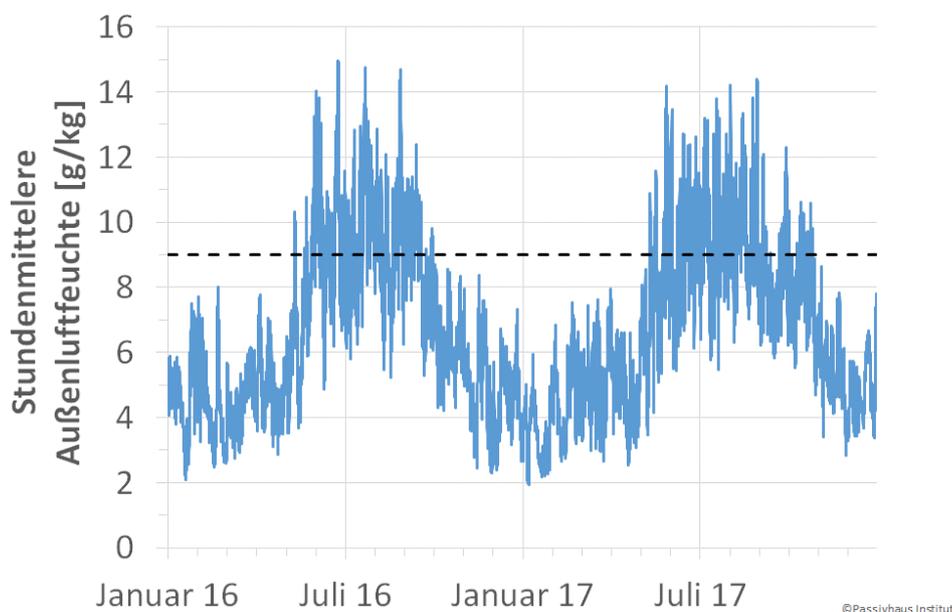


Abb. 39: Gemessene stundenmittlere Außenluftfeuchte in Lünen im Jahresverlauf 2016 und 2017. Der VDI-Feuchtegrenzwert von 9 g/kg wird 20% der Stunden im Jahr überschritten, jedoch hauptsächlich während der Sommerpause des Lippe-Bades.

In Abb. 40 sind die aufgezeichneten Volumenströme der Schwimmhalle 1+2 im Jahresverlauf für 2016 und 2017 dargestellt (Revisionszeiten ausgenommen). Gezeigt werden, je Monat, der Mittelwert, sowie verschiedene Quantile als Indikator für die Variationen. Nach VDI 2089 soll für die Auslegung bei jeglichen Becken mit einer Tiefe $\leq 1,35$ m, i.d.R. ein erhöhter Wasserübergangskoeffizient für die Verdunstung ($\beta_b = 40$ m/h) verwendet werden. Im Lippe-Bad wurde basierend auf Erfahrungswerten vom verantwortlichen TGA Planer jedoch der reguläre Übergangskoeffizient für Sportbecken ($\beta_b = 28$ m/h) angesetzt. Wie in Abb. 40 erkennbar, liegt der Außenluftvolumenstrom in den Wintermonaten - trotz der gegenüber VDI reduzierten Dimensionierung - im Mittel nur bei ca. 25% des Auslegungswertes und variiert hauptsächlich zwischen 22%-31%. Im Sommer liegt der Mittelwert mit ca. 60% des Auslegungsvolumenstroms wie zu erwarten deutlich höher und auch die Variation ist stärker (36-92% der Auslegung). Diese Tendenzen sind in ähnlicher Größenordnung auch bei den Lüftungsgeräten der Sportschwimmbecken zu beobachten (Halle 4 & Halle 5). Das Lüftungsgerät für das Lehrschwimmbecken (Halle 3) läuft ganzjährig mit sehr niedrigen Volumenströmen, im Monatsmittel ca. 10%-30% des Auslegungswertes. In diesem Fall wurden im Betrieb niedrigere Temperatur-Sollwerte eingestellt (Luft- und Wassertemperatur jeweils 2 K kälter als geplant), was zu einer niedrigeren Verdunstung führt als für die ursprüngliche Auslegung angenommen wurde. Die Daten konnten in diesem Fall allerdings nicht endgültig ausgewertet werden, aufgrund fehlerhafter Messung des Volumenstroms.

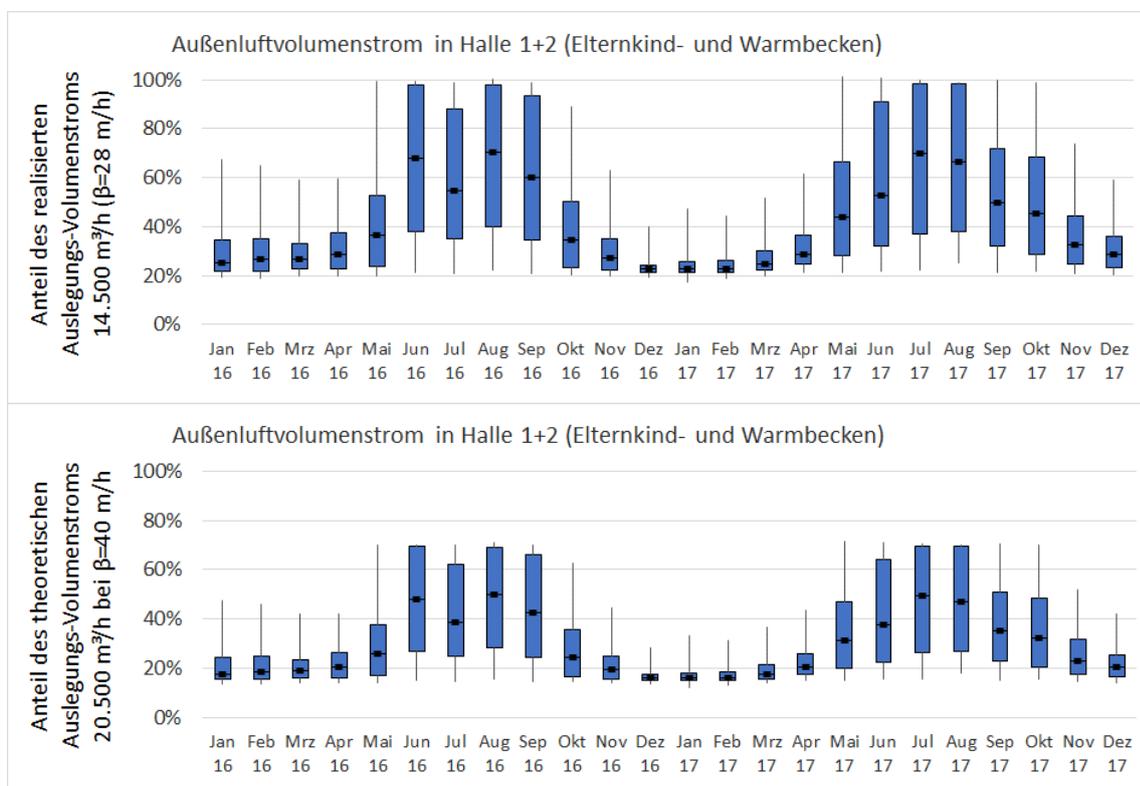


Abb. 40: Gemessene Außenluftvolumenströme in Halle 1+2 im Jahresverlauf 2016 & 2017 als prozentuale Angabe gegenüber des Maximalvolumenstroms. Oben: Bei realisierter Auslegung basierend auf $\beta = 28$ m/h. Unten: Bei Auslegung strikt nach VDI für flache Becken mit $\beta = 40$ m/h. Die Boxplots zeigen die monatlichen Mittelwerte, oberstes und unterstes Quartil und Extremwerte (2,5 und 97,5% Quantil). (d.h. jeweils 50% der Messdaten eines Monats liegen innerhalb des Rechtecks).

Die Datenauswertung bestätigt die zu erwartenden Korrelation zwischen Außenluftfeuchte und Außenluftvolumenstrom der Hallenlüftung, siehe Abb. 41 und Abb. 42. Eine Streuung ist auf Grund der unterschiedlichen Beckennutzungen und resultierenden Verdunstungsraten zu erwarten. Aus den Grafiken für alle Hallen ist zu erkennen, dass während den Öffnungszeiten die maximalen Außenluftvolumenströme ab ca. 7-11 g/kg Außenluftfeuchte erreicht werden. Ab 9-12 g/kg Außenluftfeuchte ist ein Anstieg der Raumluftfeuchte (Mittelwert der kalibrierten Sensoren im Raum) ersichtlich; ein Hinweis darauf, dass der Außenluftvolumenstrom zum gegebenen Zeitpunkt nicht zur Entfeuchtung auf den eingestellten Sollwert ausreicht. Diese Situation tritt nur im Sommer (bei hohen Außenluftfeuchten) auf, d.h. ein knapp ausgelegtes Lüftungsgerät kann zwar zu vorübergehenden Behaglichkeitseinschränkungen führen, stellt aber kein bauphysikalisches oder gesundheitliches Risiko dar. Temporäre Überschreitungen sind auch nach VDI 2089 zulässig. Selbst bei Spitzenfeuchten über 14 g/kg steigt die Referenzfeuchte in den Hallen auf akzeptable maximale 60% in Halle 1+2 bzw. 65% in den Hallen 4 und 5. Im Ruhebetrieb, nachts, ist im betrachteten Zeitraum in allen Hallen eine Anhebung der Sollwert-Raumluftfeuchte eingestellt. Die Geräte laufen alle mit sehr niedrigen Außenluftvolumenströmen und erst ab ca. 10 g/kg ist ein leichter Anstieg erkennbar, um den Nacht-Sollwert einhalten zu können.

Aus den spezifischen Volumenströmen pro m² Beckenfläche des jeweiligen Beckens ist direkt ersichtlich, dass die Feuchtelast (Verdunstung) in Halle 1+2 höher ist als in Halle 4 und 5. In Halle 1+2 liegt das Maximum des Volumenstroms zur Entfeuchtung bei knapp über 80 m³/h pro m², in Halle 4 und Halle 5 bei ca. 50 m³/(hm²). Auf Grund der unterschiedlichen Sollwerte der Wasser- und Hallentemperaturen sind unterschiedliche Verdunstungsraten physikalisch zu erwarten (siehe auch Kapitel 8.4 "Verdunstung"). Das Vorgehen nach VDI 2089 für die Auslegung der jeweiligen Lüftungsgeräte bildet dies adäquat ab.

Abb. 43 zeigt die Ergebnisse einer ähnlichen Auswertung für Daten ausgewählter Becken des Bambados Hallenbades. Die Daten bestätigen die Tendenzen, die auch im Lippe-Bad gemessen wurden: Auch hier werden die Sollwerte der Feuchte gut eingehalten, und ein Feuchteanstieg in den Hallen während der Öffnungszeiten (bei Erreichen des maximalen Volumenstroms) ist erst ab ca. 10 g/kg ersichtlich. Nachts sind höhere Sollwerte für die Feuchte eingestellt. Die Geräte sind in diesem Fall anders geregelt als im Lippe-Bad: Anstatt kontinuierlichen Betriebs mit niedrigem Volumenstrom, werden die Geräte zeitweise ganz abgeschaltet. Der Auslegungsvolumenstrom (Maximum) für das Sportbecken liegt, mit ca. 60 m³/(m²a), im Bambados in einer ähnlichen Größenordnung wie im Lippe-Bad, während die Lüftungsgeräte mit ca. 90 m³/(hm²) für die Lehrbecken größer ausgelegt sind. Im Falle des Freizeitbereichs im Bambados (Abb. 44) scheinen die Lüftungsgeräte für den regulären Betrieb zu groß dimensioniert: Mit dem Minimalvolumenstrom im Bereich von 20-30 m³/(m²h) wird auf sehr niedrige Raumluftfeuchten z.T. unter 40% entfeuchtet. Das Maximum liegt bei ca. 170 m³/(hm²). Die Auslegung erfolgte in diesem Fall auf Basis folgender Wasserübergangskoeffizienten: $\beta_b = 70$ m/h für das Freizeitbecken inkl. Attraktionen, zusätzlich $\beta_b = 50$ m/h für den Strömungskanal und $\beta_b = 40$ m/h für das Eltern-Kind-Becken.

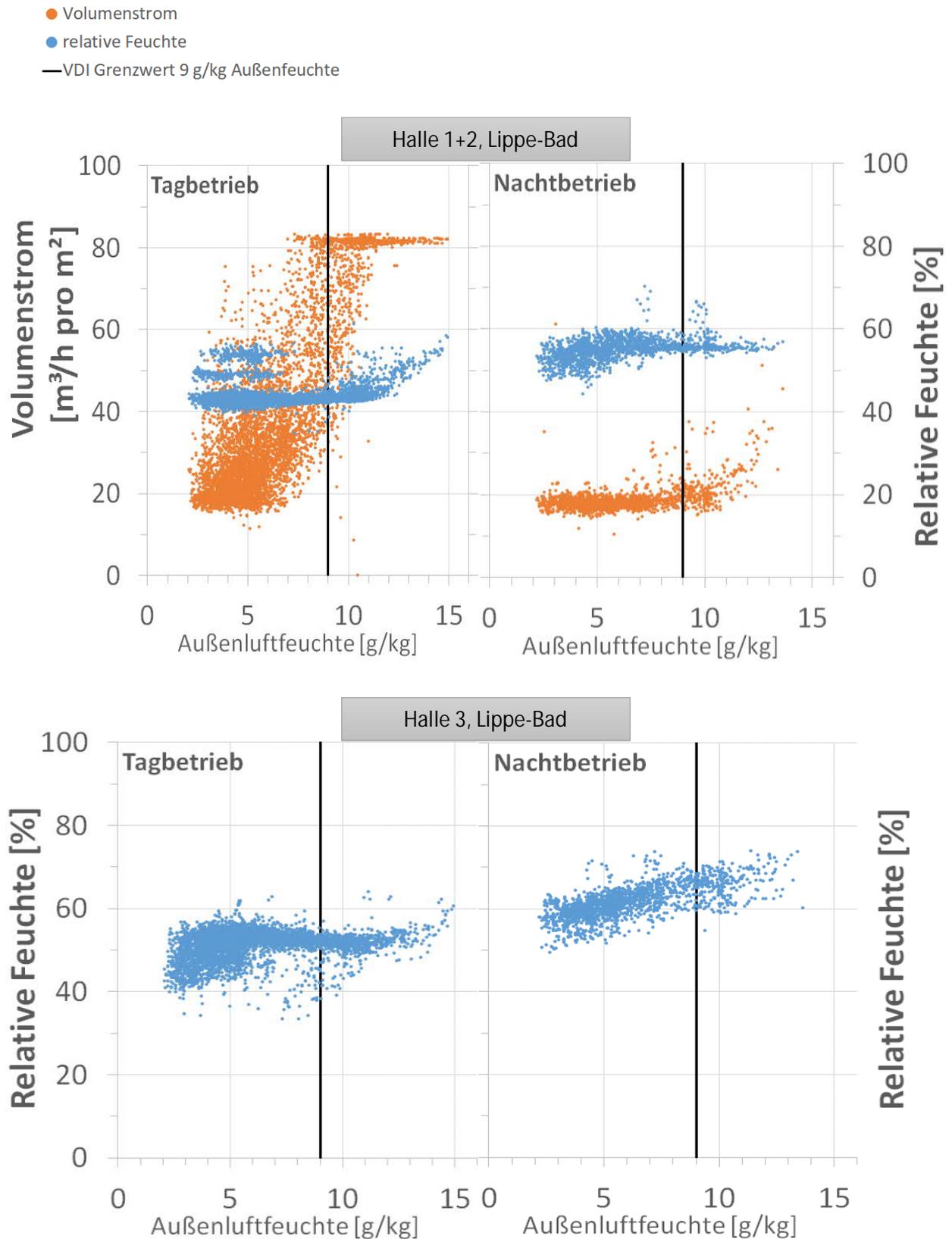


Abb. 41: Die gemessenen stundenmittleren Außenluftvolumenströme (orange) und relativen Raumlufffeuchten (blau) in Abhängigkeit der absoluten Außenluftfeuchte während den Öffnungszeiten (links) und nachts (rechts) für Halle 1+2 (oben) und 3 (unten, nur relative Feuchte). Daten von 2016, ohne die sommerliche Revisionszeit.

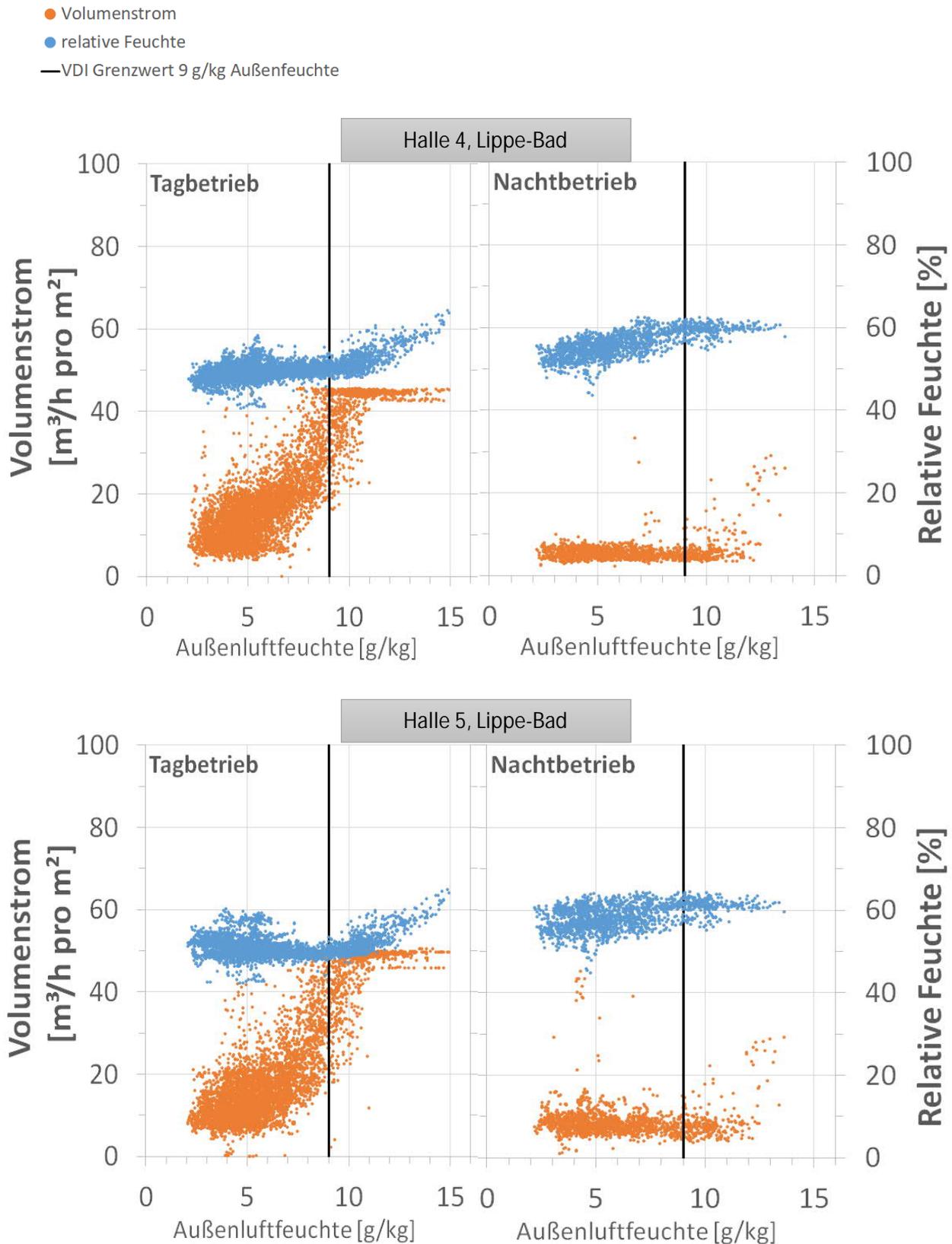


Abb. 42: Die gemessenen stundenmittleren Außenluftvolumenströme (orange) und relativen Raumlufffeuchten (blau) in Abhängigkeit der absoluten Außenluftfeuchte während den Öffnungszeiten (links) und nachts (rechts) für Halle 4 (oben) und 5 (unten). Daten von 2016, ohne die sommerliche Revisionszeit.

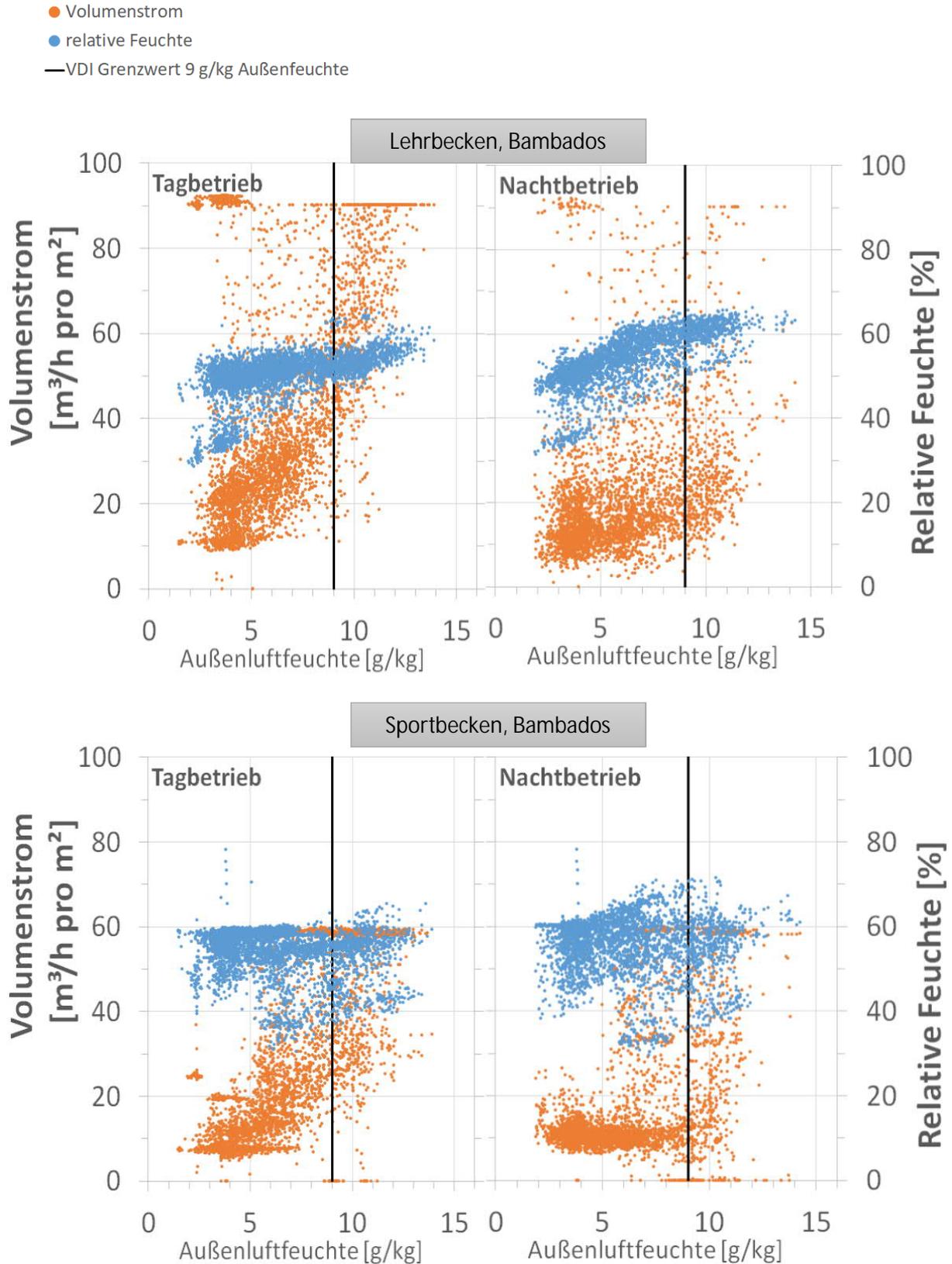


Abb. 43: Bambados in Bamberg: Die gemessenen stundenmittleren Außenluftvolumenströme (orange) und relativen Raumlufffeuchten (blau) in Abhängigkeit der absoluten Außenluftfeuchte während den Öffnungszeiten (links) und nachts (rechts) für die Lehrschwimmbecken (oben) und die Sportbecken (unten). Daten von Mai 2014-April2015, ohne die sommerliche Revisionszeit.

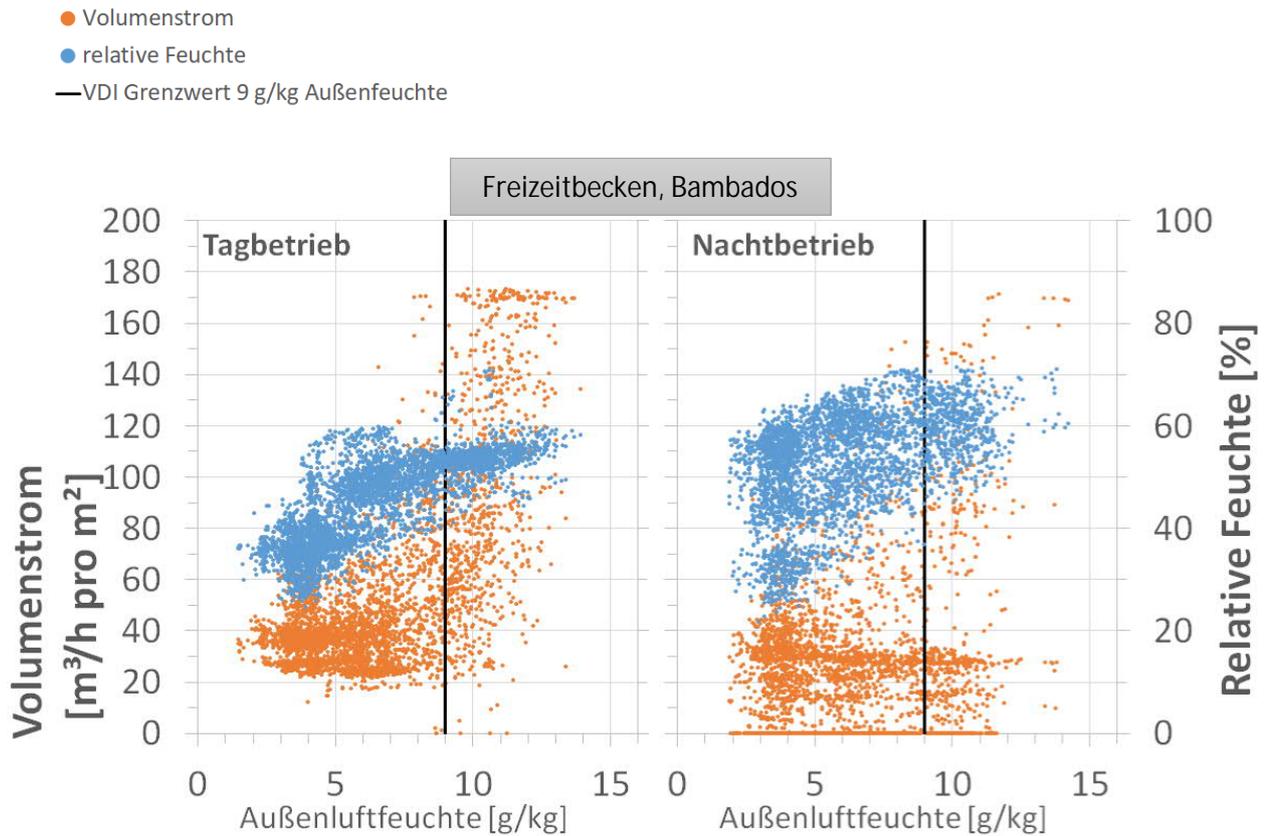


Abb. 44: Bambados in Bamberg: Die gemessenen stundenmittleren Außenluftvolumenströme (orange) und relativen Raumlufffeuchten (blau) in Abhängigkeit der absoluten Außenluftfeuchte während den Öffnungszeiten (links) und nachts (rechts) für den Freizeitbereich. Daten von Mai 2014-April 2015, ohne die sommerliche Revisionszeit. (Hinweis: Die Achse für den Volumenstrom ist in diesem Fall angepasst und doppelt so hoch wie in den vorherigen Grafiken)

Unter der vereinfachenden Annahme gleichbleibender Verdunstungsraten kann aus den Messdaten abgeschätzt werden, wie sich eine Reduktion des maximalen Außenluftvolumenstroms auf die Raumlufffeuchte auswirken würde. Im Lippe-Bad wäre eine kleinere Auslegung auf ca. 70% mit $\beta = 20$ m/h (gegenüber der realisierten Auslegung mit $\beta = 28$ m/h) durchaus möglich gewesen, ohne Risiko eines erheblichen Feuchteanstiegs. Beispiel-Ergebnisse dieser theoretischen Überlegungen sind für Halle 1+2 in Abb. 45 dargestellt, mit einer entsprechenden Reduktion des Volumenstroms auf eine Auslegung mit $\beta = 20$ m/h.

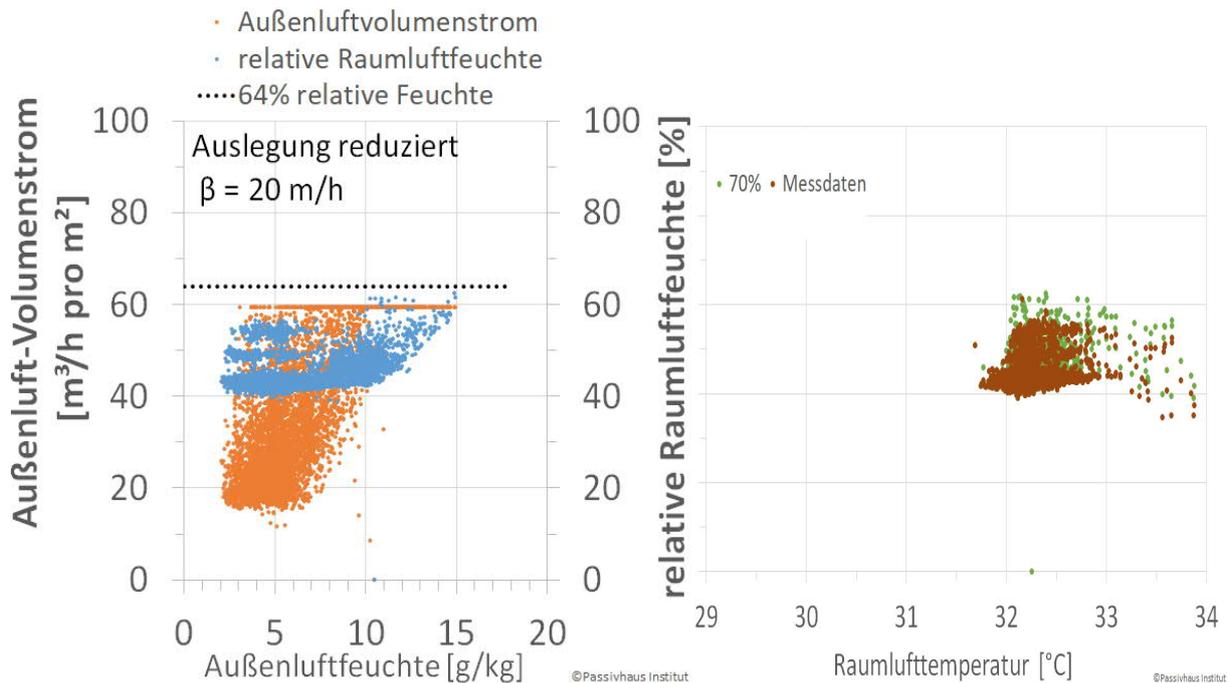


Abb. 45: Die gemessenen Werte des Volumenstroms und der Raumbedingungen in Halle 1+2, sowie eine Abschätzung des Einflusses auf die Raumbedingungen bei begrenztem maximalem Volumenstrom.

Empfehlungen

Abgeleitet aus der Datenauswertung des Lippe-Bades ist für die Auslegung von Lüftungsgeräten für Schwimmhallen die Annahme eines Wasserübergangskoeffizienten von $\beta = 20 \text{ m/h}$ als Richtwert für die Methodik nach VDI 2089 geeignet. Dies führt i.d.R. zu geringeren Größen gegenüber der konventioneller Auslegung nach VDI: ca. 70% bei einer Wassertiefe $> 1,35 \text{ m}$ ($\beta = 28 \text{ m/h}$ nach VDI) und ca. 50% für flachere Becken ($\beta = 40 \text{ m/h}$ nach VDI). Insbesondere für das flache Warmbecken (Halle 1+2) wurde im Lippe-Bad keine deutlich höhere Verdunstung festgestellt und es wird empfohlen, für diese Art Becken eine Auslegung mit geringerem Auslegungsvolumenstrom gegenüber den VDI 2089 Richtlinien in Betracht zu ziehen. Wie die Messdaten zeigen hat sich im Lippe-Bad die Wahl eines kleineren Gerätes (ausgelegt mit $\beta = 28 \text{ m/h}$ gegenüber $\beta = 40 \text{ m/h}$) im Betrieb bewährt.

Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Lippe-Bad auf andere Projekte sind die Randbedingungen im Einzelfall zu berücksichtigen, insbesondere die Luftführung und die Badnutzung. Im Lippe-Bad wurde die Zuluftbringung über Weitwurfdüsen und die Abluftansaugung an Innenwänden (mittlere Raumhöhe) realisiert (siehe auch [BGL 2011] S.59 ff. und [Peper/Grove-Smith 2013]). Die Lüftungsgeräte wurden mit einem regulären Umluftanteil betrieben (vgl. Kapitel 6.2.2). Im Bambados wurden dagegen die Lüftungsgeräte (während des hier analysierten Zeitraums) ohne Umluft betrieben. Je nach Höhe des Volumenstroms (mit oder ohne Umluft) und gewählter Luftführung (z.B. Schichtlüftung), fällt die Durchmischung der Luft unterschiedlich aus, was sich ggf. auch auf den Entfeuchtungsbedarf und damit auf die Dimensionierung der

Lüftungsgeräte auswirken kann. Ergänzende Untersuchungen in anderen Bädern wären an dieser Stelle interessant.

Ist ein durchgängiger Betrieb im Hallenbad auch während der Sommerzeit mit hohen Außenluftfeuchten zu erwarten, dann muss ein erhöhter Luftwechsel zur Entfeuchtung entweder über zusätzliche Fensteröffnungen oder eben über eine entsprechend große Auslegung des Lüftungsgerätes sichergestellt werden. Alternativ kann eine aktive Entfeuchtung in Betracht gezogen werden. Je höher die zu erwartenden Besucherzahlen bzw. maximale Beckenbelegungsdichte (z.B. großer Einzugskreis, viele Schulen/Vereine mit großen Schwimmteams), desto mehr Puffer sollte bei der Auslegung der Lüftungsgeräte eingeplant werden. Die zu erwartende Verdunstung durch Attraktionen muss im Einzelfall berechnet und bei der Auslegung der Lüftungsgeräte berücksichtigt werden. Hierbei sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Volumenströme genügend abgesenkt werden können wenn die Attraktionen nicht in Betrieb sind.

6.2 Lippe-Bad: Versuche zur Hallenlüftung

6.2.1 Versuche mit geänderter Hallenfeuchte

Die Sollwerte für Raumtemperatur, Raumlufffeuchte und Beckenwasser sind die maßgebenden Faktoren für die Höhe der Beckenwasserverdunstung. Bei erhöhter Hallenluftfeuchte sinkt die Dampfdruckdifferenz zwischen Wasser und Luft und somit auch die Verdunstungsmenge (siehe Abb. 46). Wie hoch die Verdunstung ist, hat einen erheblichen Einfluss auf verschiedene Bereiche: Energie, Komfort und nicht zuletzt die Luftqualität. Sie ist zum einen ausschlaggebend für die Auswahl der Lüftungsgeräte, da diese groß genug dimensioniert werden müssen, um bei Spitzenlasten ausreichend entfeuchten zu können (siehe Kapitel 6.1). Zum anderen ist eine Abschätzung der mittleren Verdunstungsrate ausschlaggebend für eine verlässliche Prognose der Betriebsweise und des Energiebedarfs (siehe auch 8.4).

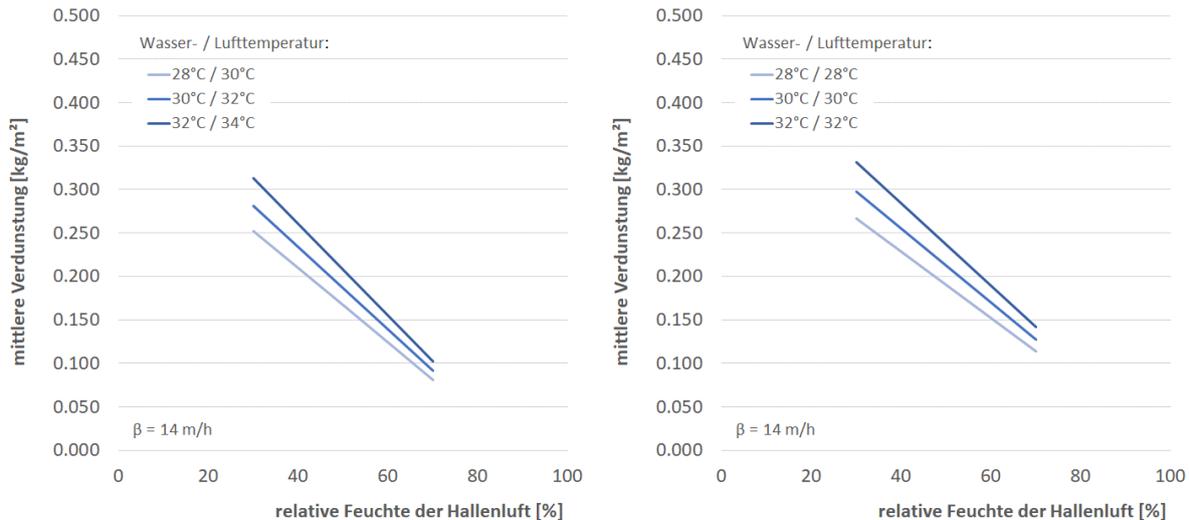


Abb. 46: Einfluss der Luftfeuchte auf die zu erwartenden mittlere Verdunstung pro m² Beckenfläche bei unterschiedlichen Kombinationen der Wasser- und Lufttemperaturen berechnet nach VDI 2089 ($\beta = 14 \text{ m/h}$).

Bereits im Rahmen der ersten Monitoring-Phase im Lippe-Bad (siehe [Peper/Grove-Smith 2013]) wurden Versuche durchgeführt, um den Einfluss der eingestellten Sollfeuchte auf die Verdunstungsmenge anhand von Messdaten zu überprüfen. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden, für ein besseres Verständnis der Korrelationen zwischen Hallenluftfeuchte, Verdunstung und Heizwärmeverbrauch, weitere Versuche durchgeführt.

Für die Datenauswertung wurde die gleiche Methodik verwendet, wie in [Peper/Grove-Smith 2013] beschrieben. Da eine direkte Messung der Verdunstung aus dem Beckenwasser nicht möglich ist, erfolgt eine Abschätzung über eine Auswertung der Messdaten der Hallenlüftungsgeräte: Aus Volumenstrom-, Temperatur- und Feuchtedaten kann die stündliche Entfeuchtungsleistung berechnet werden. Die Ergebnisse der Entfeuchtungsleistung sind nur als Orientierung der Größenordnung und Tendenzen für die Verdunstung an der Beckenwasser Oberfläche geeignet, denn sie beinhalten sekundäre Effekte wie z.B. Wasseraustrag der Badegäste und Verdunstung auf der Haut, Infiltration und Luftwechsel zu Nebenzonen etc. Zudem haben die unvermeidbaren Messungenauigkeiten der zahlreichen Sensoren (Volumenstrom, Temperatur und Feuchte) und deren Kalibrierung einen erheblichen Einfluss auf das quantitative Ergebnis.

Die Konditionen der Hallenluft sind nicht überall gleich. Je nach Luftführung/Durchströmung, sowie konvektiven und Strahlungseinflüssen kann es zu unterschiedlichen Temperatur- und Feuchteschichtungen kommen. Normalerweise werden die in der Abluft gemessenen Konditionen als Regelsensor verwendet. Wie in Tab. 4 erkennbar, weichen diese Bedingungen z.T. stark von den Referenzwerten ab, welche aus mehreren Raumsensoren ermittelt wurden, die für das Monitoring installiert und kalibriert wurden. Die Lüftungsanlagen waren im Langzeitbetrieb auf die empfohlenen Sollwerte von 55% tagsüber und 64% nachts eingestellt (Regelung über Abluftsensor), was in der Praxis jedoch zu real niedrigeren Werten in der Hallenluft geführt hat. Die Sollwerte wurden schrittweise angepasst, um den Zielwert von 55% im Raum (Messung durch mehrere Raumsensoren) zu erreichen (siehe Tab. 4).

Tab. 4: Übersicht der Versuchsreihen zur Erhöhung der Hallenluftfeuchte im Lippe-Bad.

Versuch Lüftung Halle: Erhöhung Feuchte		Halle 1+2	Halle 3	Halle 4	Halle 5	
Ausgangsbedingungen	Sollfeuchte (Abluftsensor Lüftungsgerät):					
	Tag	55%	55%	55%	55%	
	Nacht	64%	64%	64%	64%	
	Mittlere Raumlufftfeuchte bei obiger Sollwerteinstellung:					
	Tag	43%	49%	49%	54%	
Nacht	58%	58%	55%	63%		
Änderungen	Sollwerteinstellung:					
	Di 29.11.2016 14:00 Tagwert:	↑ 60%	↑ 58%	↑ 59%	↑ 57%	≈ tatsächl. rF 55%
	Mo 12.12.2016 Tagwert:	↑ 64%	↑ 60%	↑ 62%	↑ 59%	
	Fr 30.12.2016 Tagwert:	↓ 60%	=	=	=	
	Nachtwert:	↓ 60%	=	=	=	
	Mi 08.02.2017 Nachtwert:	↑ 64%	=	=	=	
<i>Legende: = (ohne Veränderung) ↓ 83% (Absenkung auf 83%) ↑ 83% (Anhebung auf 83%)</i>						

Die gemessenen Veränderungen sind in Halle 1+2 am stärksten (von 43% im Ausgangsfall vor den Versuchsreihen auf 55% mittlere Raumlufftfeuchte), daher sind an diesem Beispiel die Auswirkungen am deutlichsten. Die zu erwartende Tendenzen bestätigen sich: Bei erhöhter Raumlufftfeuchte sinkt der Entfeuchtungsbedarf und entsprechend auch der Außenluftvolumenstrom (Abb. 47). Dies spiegelt sich auch in reduziertem Energieverbrauch sowohl für den Lüftungsstrom als auch für die Beheizung des Beckenwassers und der Raumheizung wieder (Abb. 48).

Im konkreten Beispiel wird durch eine Anhebung der Raumlufftfeuchte tagsüber von 43% auf 49% (Sollwert nachts durchgehend 55%) 17 kWh/Tag Strom für die Lüftung (ohne Wärmepumpe) und 13 kWh/Tag Heizwärme für das Beckenwasser eingespart. Der Heizwärmeverbrauch für die Raumlufft (inkl. Wärmepumpe) sinkt um 43 kWh/Tag. Die weitere Anhebung der Raumfeuchte auf 54% führen zu weiteren 5 kWh/Tag Stromeinsparung, um 30 kWh/Tag reduzierten Wärmeverbrauch für die Beckenwasserbeheizung und 27 kWh/Tag Wärmeverbrauch für die Raumheizung. Beim Vergleich des Betriebs mit durchgängig erhöhter Feuchte (12. - 30. Dezember 2016) gegenüber dem Ausgangsfall (November 2016) werden folgende Einsparungen erzielt: Der Stromverbrauch der Lüftungsanlage (ohne WP) sinkt um 18%, der Heizwärmeverbrauch für das Beckenwasser um 7%, sowie für die Raumheizung um 20%. Allerdings lassen sich diese Einsparungen nicht ohne weiteres pauschalisieren oder hochrechnen, denn für den Energieverbrauch spielen weitere Randbedingungen eine wesentliche Rolle (Abb. 49). Eine höhere Beckenbelegung führt z.B. zu erhöhter Verdunstung (erkennbar ab Januar 2017) und gleichzeitig zu höheren Wärmequellen im Wasser, während durch kältere Außenluftbedingungen unweigerlich auch der Heizwärmeverbrauch höher ausfällt.

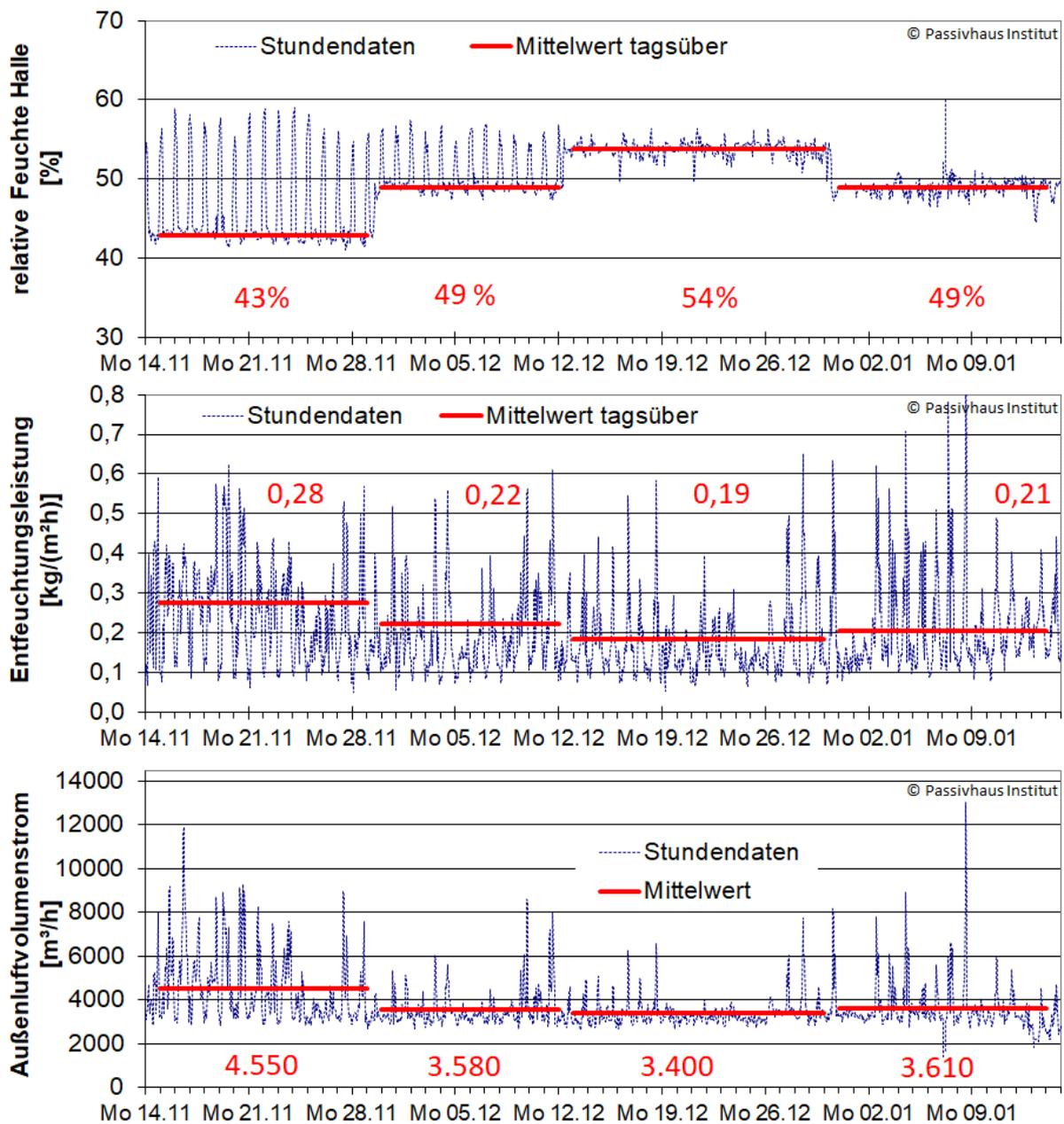


Abb. 47: Messdatenauswertung über zwei Monate im Winter 2016/17 bei Veränderung der Raumluftfeuchte (oben) in der Schwimmhalle 1+2. Bei höherer Feuchte sinkt wie zu erwarten aufgrund verringerter Verdunstung der Entfeuchtungsbedarf (mittig) und entsprechend auch der Außenluftvolumenstrom (unten).

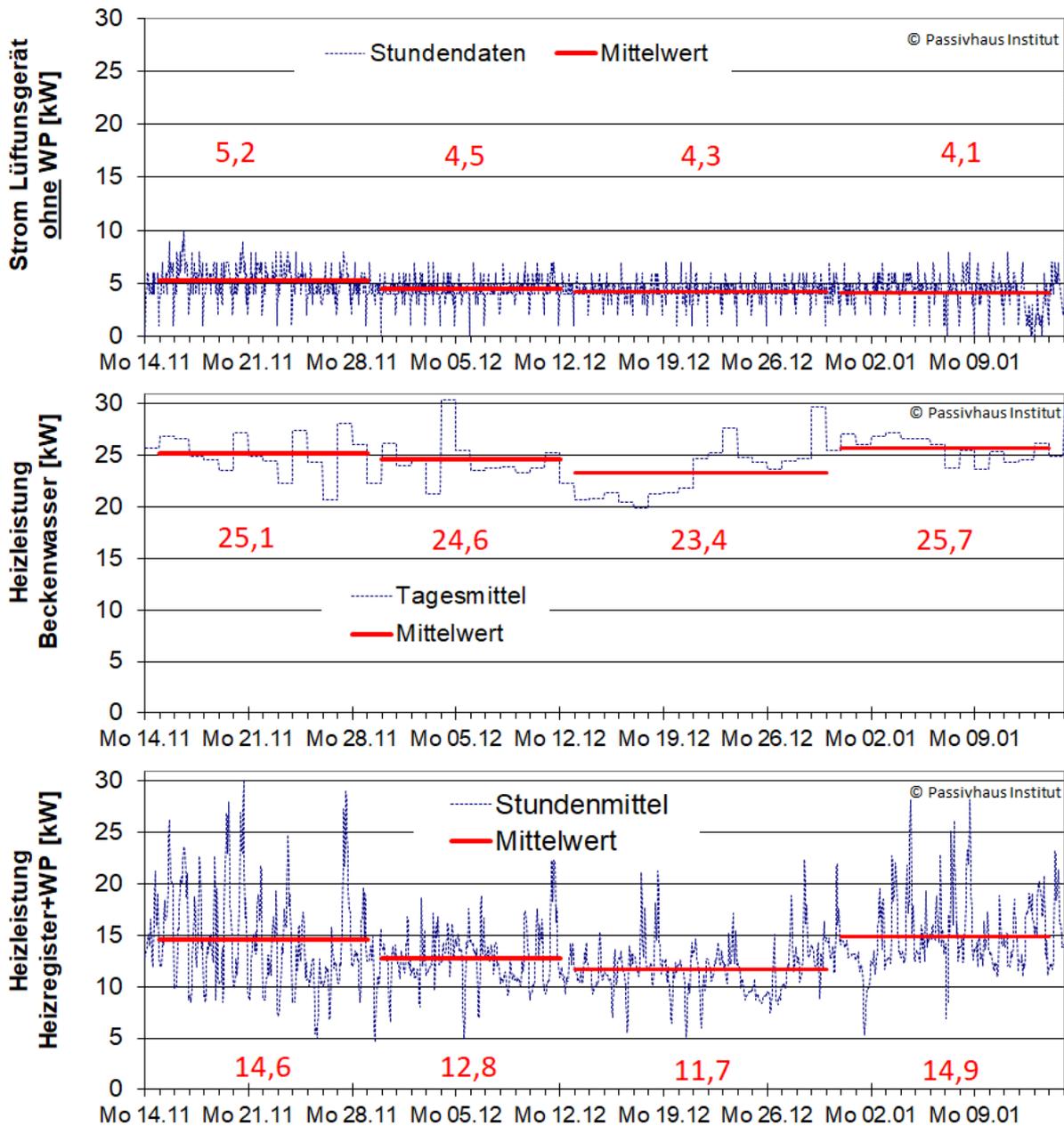


Abb. 48: Messdatenauswertung der energetischen Auswirkung bei Versuchsreihen mit veränderter Raumluftfeuchte über zwei Monate im Winter 2016/17 (siehe Abb. 47). Bei erhöhter Feuchte sinken sowohl der Stromverbrauch der Lüftung (oben), als auch die Heizleistung für das Beckenwasser (mittig) und die Raumheizung (unten).

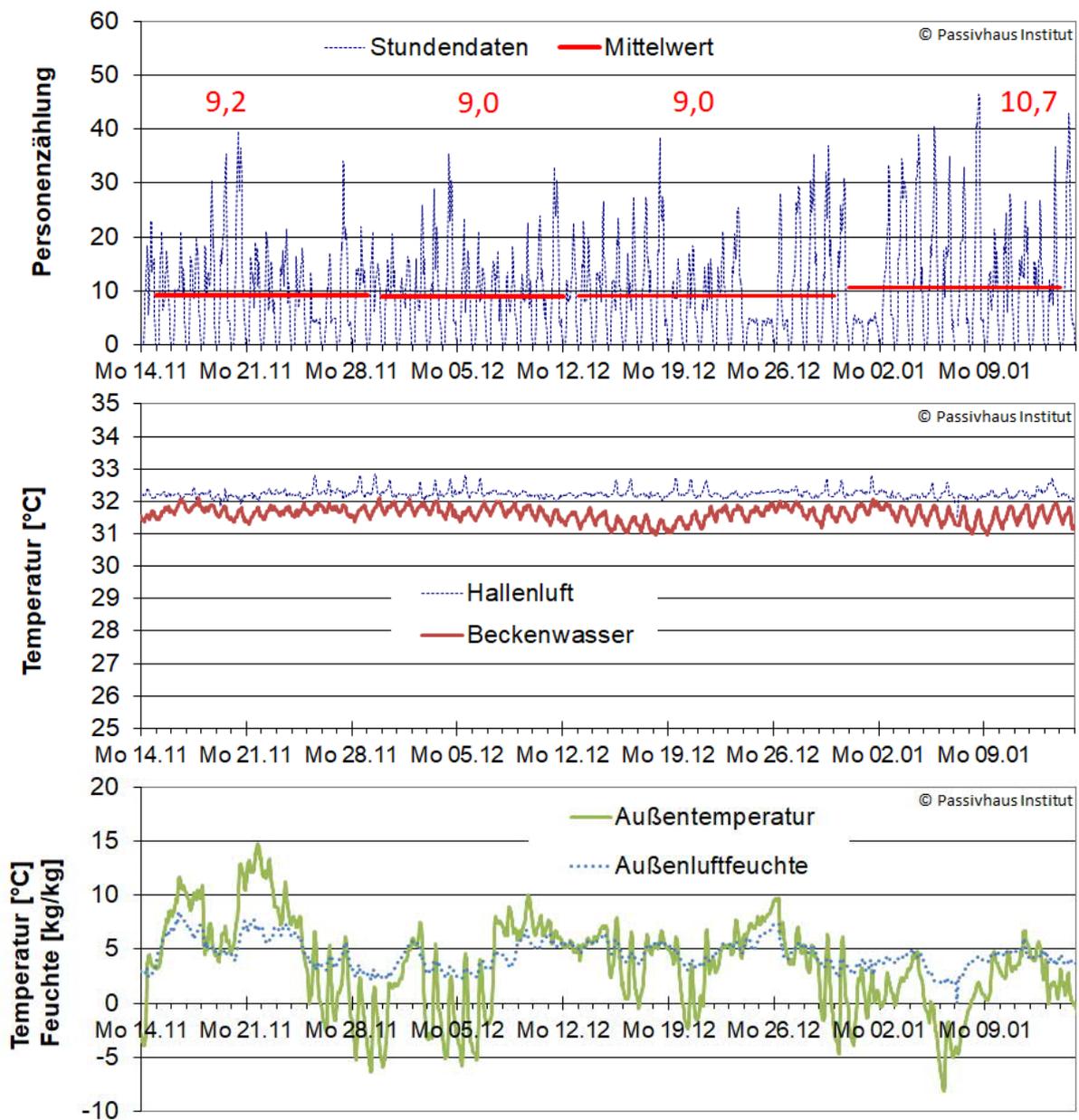


Abb. 49: Randbedingungen während der Versuchsreihe mit veränderter Raumluftfeuchte (vgl. Abb. 47 und Abb. 48): Beckenbelegung (oben), Temperaturen (mittig) und Außenluftbedingungen (unten).

Eine Darstellung der berechneten stundenmittleren Entfeuchtungsleistung in Abhängigkeit der relativen Raumluftfeuchte für den gesamten Zeitraum 2016 und 2017 (ohne Sommerpause) ist in Abb. 50 dargestellt. Hierbei werden nur die Zeiten berücksichtigt, in denen die Raumfeuchte gegenüber der vorherigen Stunde unverändert bleibt (keine Auffeuchtung oder Trocknung im Raum), da nur in diesem Fall die Entfeuchtungsleistung über die Lüftungsanlage als Indikator für die Verdunstung heran gezogen werden kann (siehe auch [Peper/Grove-Smith 2013], S.100).

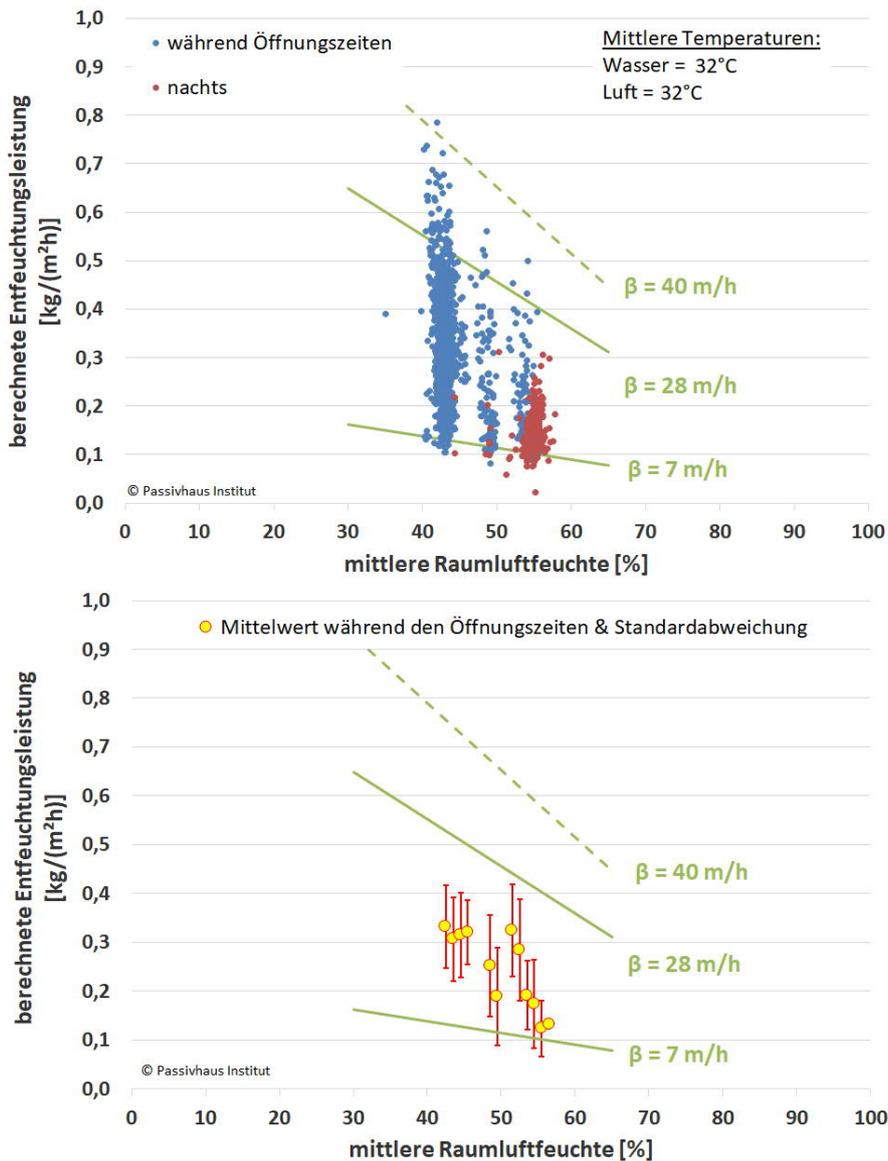


Abb. 50: Die berechnete stündliche Entfeuchtungsleistung über die Lüftungsanlage bei unterschiedlichen Raumluftfeuchten in Halle 1+2 auf Basis der Messdaten von 2016 & 2017. Die Spreizung ist insbesondere auf die unterschiedliche Nutzung/Belegung zurückzuführen.

Bei den anderen Hallen sind ähnliche Tendenzen erkennbar, jedoch sind die Einsparungen weniger eindeutig. Dies liegt zum Teil daran, dass die Lüftungsgeräte ohnehin schon auf dem Mindestvolumenstrom laufen und durch eine Anhebung des Sollwerts keine weitere Reduktion des Außenluftvolumenstroms möglich ist. Somit stellt sich keine dauerhafte Erhöhung der Raumluftfeuchte ein und der Strom- und Heizwärmeverbrauch bleiben relativ konstant. Die Einsparungen würden sich dann erst in den Sommermonaten bemerkbar machen, denn bei höherer Außenluftfeuchte wird ein höherer Luftwechsel für dieselbe Entfeuchtungsleistung benötigt.

In Abb. 51 ist erkennbar, dass die Lüftungsgeräte im Sommer deutlich mehr Strom verbrauchen als im Winter. Der Zuluftvolumenstrom ist relativ konstant, daher entsteht die Änderung allein über den erhöhten Außenluftanteil: Es wird ein größerer Volumenstrom transportiert, was zusätzlich die Druckverluste über Wärmetauscher, Filter, Außen- und Fortluftkanäle, Gitter etc. ansteigen lässt.

Durch eine Reduktion des Außenluftanteils bedingt durch reduzierte Verdunstung besteht damit auch Einsparpotential des Stromverbrauchs der Lüftungsgeräte.

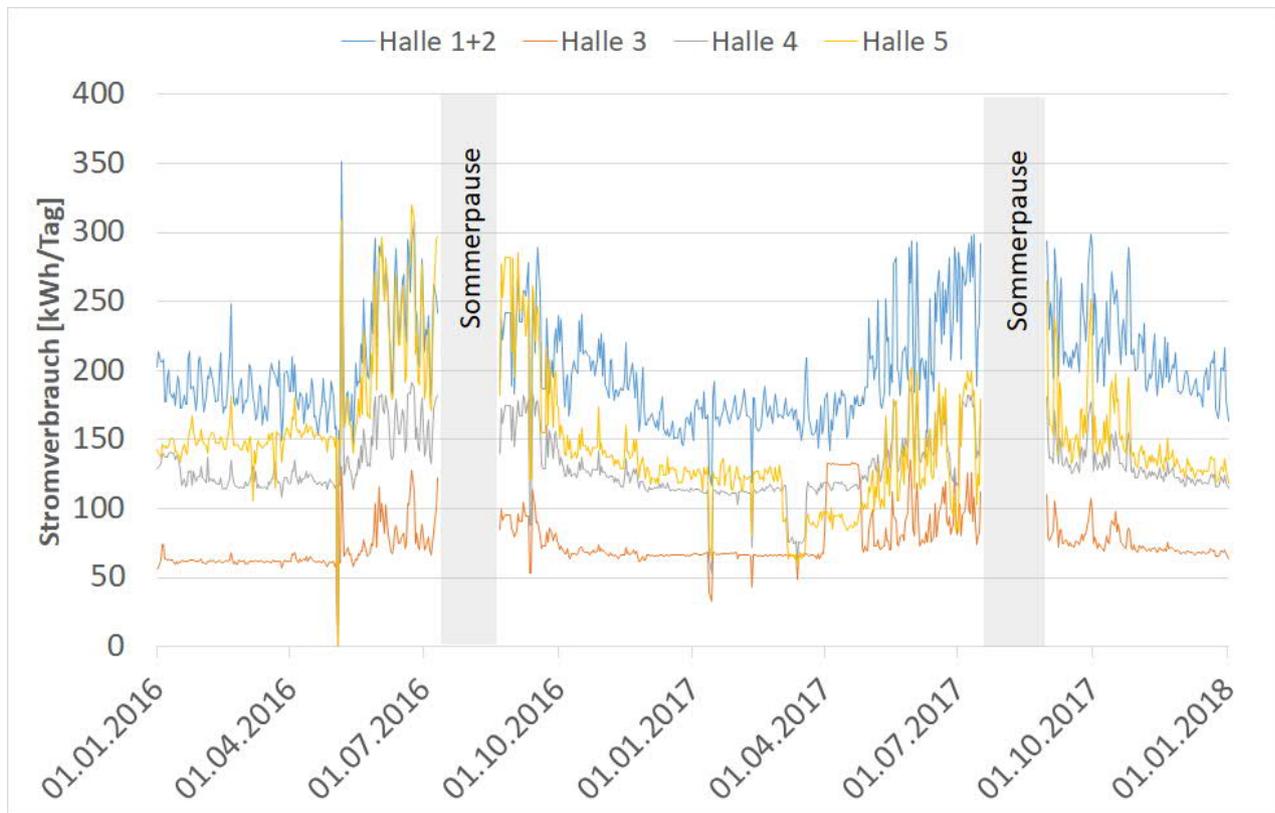


Abb. 51: Täglicher Stromverbrauch der Hallenlüftungsgeräte im Jahresverlauf 2016 & 2017. Durch den höheren Außenluftvolumenstrom steigt im Sommer die Stromaufnahme.

Fazit: Auswirkung erhöhter Hallenfeuchte

Die Sollwerte im Lippe-Bad sind nicht abschließend optimiert, da die schrittweise Erhöhung der Hallenfeuchten zum Teil wieder rückgängig gemacht wurde. Dies geschah zum Teil aus Behaglichkeitsgründen und zum Teil beim Austausch defekter Sensoren und Neustart der Systeme. Die plötzlichen Sollwertänderungen (Feuchteanstieg) der hier aufgeführten Versuchsreihen wurden zum Teil vom Personal und den Badegästen als unangenehm gemeldet. Es besteht jedoch kein Grund zur Annahme, dass die empfohlenen höheren Feuchte-Sollwerte (55-60%) generell zu unbehaglichem Raumempfinden führen. Das Lippe-Bad wurde bereits in der Anfangsphase über einen längeren Zeitraum problemlos mit erhöhter Feuchte betrieben und auch Feuchteanstiege bei Sensorfehlern wurden erst nach längerer Zeit bemerkt. Anscheinend spielen beim Empfinden der Feuchte viele verschiedene Faktoren und auch psychologische Faktoren eine Rolle. In Bambados werden höhere Feuchte-Sollwerte ohne Probleme realisiert. Es wird empfohlen, die Regelsensoren zu kalibrieren, damit die eingestellten Sollwerte möglichst den erreichten Werten in der Halle entsprechen und das Personal einen korrekten Eindruck der Raumbedingungen hat. Gegebenenfalls ist es sinnvoll, einen zusätzlichen (mobilen) Sensor im Raum zu platzieren für eine leichte Kontrolle der Bedingungen durch das Personal.

Eine allgemeingültige quantitative Ableitung der energetischen Einsparpotentiale durch Anpassung der Raumlufffeuchte ist wegen der zahlreichen Einflussfaktoren schwierig (z.B. Besucherzahlen und Art der Beckennutzung, Solltemperaturen, Luftführung in der Halle, Wetterbedingungen). Niedrigere Verdunstungsmengen sind energetisch auf jeden Fall vorteilhaft, wobei bei der Anhebung der Feuchte die Gewährleistung des Komforts und des Bauteilschutzes im Vordergrund stehen sollten. Insbesondere nachts, wenn kein Komfort gefordert wird, kann die Feuchte angehoben werden. Erstrebenswert ist eine hohe relative Feuchte nahe der Wasseroberfläche, was z.B. durch eine Schichtlüftung erreicht werden kann (siehe Kapitel 5.1).

6.2.2 Versuch zur Reduzierung des Umluftvolumenstroms

Wie in Kap. 5.1 beschrieben ist es energetisch vorteilhaft, wenn ein Hallenbad ohne oder zumindest mit reduziertem Umluftanteil betrieben wird. Im Lippe-Bad wurde eine hochwertige Passivhaus-Gebäudehülle realisiert, so dass keine Umluft zum Anblasen der Fassade benötigt wird. Unter diesen Voraussetzungen wurde die Umluft in Versuchen reduziert, um den Strombedarf der Lüftungsgeräte zu senken. Die verschiedenen Versuchsreihen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Die Reduzierung der Umluft hat unmittelbaren Einfluss auf den Stromverbrauch der Lüftungsgeräte. Dies wird dadurch bestätigt, dass die geänderten Betriebsweisen während des Versuchs eindeutig im Verlauf der Stromverbräuche (siehe Abb. 52) erkennbar sind.

Tab. 5: Versuche zur Umluftreduzierung; die Prozentangaben beziehen sich auf den Zuluftvolumenstrom gegenüber dem Normalbetrieb im Lippe-Bad. (Anmerkung: Versuch 2 war eine kurzzeitige Betriebsänderung zur THM-Messung.)

		Halle 1+2	Halle 3	Halle 4	Halle 5
Ausgangseinstellung		Zuluft-Volumenstrom:			
		100% ≈ 14.000 m³/h	100% ≈ 8.000 m³/h	100% ≈ 12.000 m³/h	100% ≈ 15.000 m³/h
Do 12.01.2017 10:00	1. Versuch	↓ 50%	↓ 50%	↓ 50%	↓ 50%
Fr 13.01.2017 17:00		↑ 100%	↑ 100%	↑ 100%	↑ 100%
Fr 10.02.2017 06:30 19:00	2. Versuch (THM)	↓ 50%	↓ 50%	↓ 50%	↓ 50%
		↑ 100%	↑ 100%	↑ 100%	↑ 100%
Do 02.03.2017	3. Versuch	=	=	=	↓ 88%
Mo 06.03.2017		=	=	↓ 83%	↓ 75%
Mo 13.03.2017 ~10:00 ~19:00		=	↓ 50%	↓ 67%	↓ 63%
		=	↑ 100%	↑ 83%	↑ 75%
So 19.03.2017		=	=	↑ 100%	↑ 88%

Legende: = (ohne Veränderung) ↓ 83% (Absenkung auf 83%) ↑ 83% (Anhebung auf 83%)

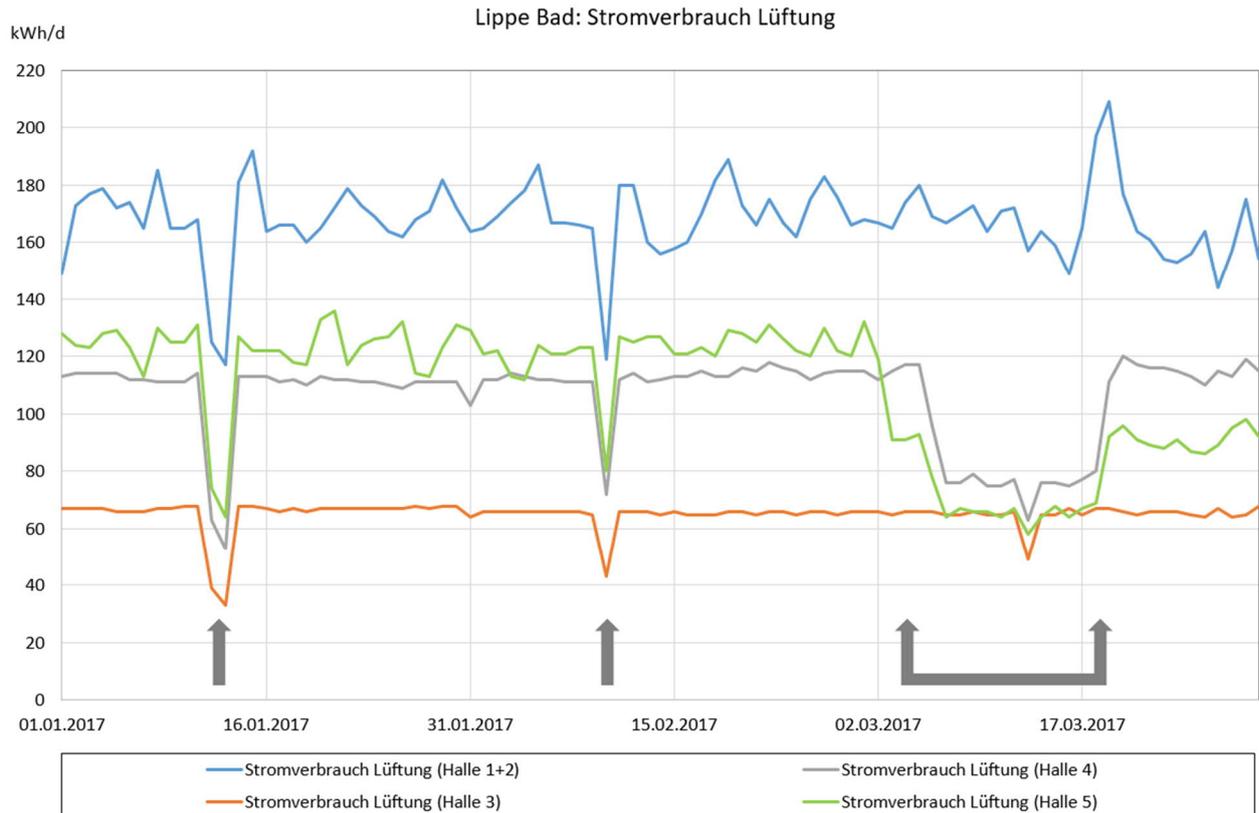


Abb. 52: Durch die Reduzierung der Umluft reduziert sich der Stromverbrauch der Lüftungsgeräte signifikant. Die Pfeile markieren die Zeiten der Versuche.

Für die Versuche wurde der Gesamtvolumenstrom gesenkt und gleichzeitig ein Teil der Zuluftventile geschlossen, um die Zuluft mit gleichem Impuls in den Raum einzubringen. Auf Grund von Beschwerden der Besucher über „abgestandene“ Luft wurden jedoch Versuch 1 und 3 beendet. Auch bei den THM - Messungen (Versuch 2) wurden unterschiedliche Luftqualitäten vermerkt (siehe Kap. 6.5), wobei selbst die höheren Werte noch als gute Luftqualität zu bewerten sind.

Grundsätzlich können verschiedene Faktoren bei der Veränderung der Hallenluft zusammen spielen:

- Höhe des Außenluftvolumenstroms
- Höhe der Emissionen aus dem Wasser (abhängig von Belastungswerten des Wassers und der Höhe der Verdunstung)
- Änderung der Durchströmung in der Halle

Der Außenluftvolumenstrom hat sich in drei Hallen nicht geändert, nur in Halle 1 + 2 sank er um ca. 30 %. Die THM - Werte im Wasser sind im Rahmen der Messungengenauigkeit etwa gleichgeblieben, mit Ausnahme von Halle 5. Dort ist der Wert um 28 % höher als zur Referenzzeit vor dem Versuch. Auch die Aktivität in den Becken, die sich auf die Verdunstung und damit den Schadstoffaustrag auswirken, blieb ähnlich oder sank sogar. Ausnahme hierzu ist in Halle 3 notiert worden, in der das Becken im Referenzzeitraum (vor dem Versuch) unbenutzt war. Die

Randbedingungen zu den verschiedenen Versuchszeiten sind also wie zu erwarten nicht statisch. Allerdings werden diese Einflüsse von den Autoren als eher gering eingeschätzt. Es wird vermutet, dass sich die Hallendurchströmung verändert hat. Aus diesem Grund ist es bei der Planung von zukünftigen Bädern wichtig, noch stärker auf die Durchspülung des Raumes selbst bei niedrigen Volumenströmen Wert zu legen, um eine Reduzierung der Umluft zu ermöglichen (Empfehlungen siehe Kap. 5.1).

Die potentiellen Einsparungen durch Umluftreduktion können nach aktuellem Stand im Lippe-Bad leider nicht dauerhaft umgesetzt werden. Eventuell spielt hier auch die Wasserqualität eine Rolle (höhere THM - Werte im Wasser im Vergleich zu den anderen zwei gemessenen Bädern, siehe Kap. 6.5).

Allerdings ist erwähnenswert, dass Halle 1 + 2 im Lippe-Bad bereits mehrere Monate in 2012/2013 mit reduziertem Umluftvolumenstrom betrieben werden konnte. Das Passivhaus-Hallenbad Bambados wird seit der Einregulierung erfolgreich ohne Umluft betrieben, d.h. dort kann in unterschiedlichen Hallen mit unterschiedlicher Hallendurchströmung nur mit Außenluft gelüftet werden. Außerdem sind weitere Bäder (z.B. Familienbad Niederheid, siehe Kap. 6.5) bekannt, in denen die Umluft dauerhaft reduziert ist. Deshalb wird eine Reduzierung der Umluft weiterhin als Maßnahme zur Stromeinsparung bei zukünftigen Bädern empfohlen.

6.2.3 Stromeinsparung durch reduzierte Umluft

Die Auswirkungen der Versuche wurden anhand der Messdaten analysiert. Der Betrieb mit reduzierter Umluft im März 2016 wurde detaillierter für Halle 4 ausgewertet und dargestellt (siehe Abb. 53). Der Zuluftvolumenstrom wurde von ca. 11.800 m³/h auf ca. 9.900 m³/h reduziert. Dazu wurde die Ventilatorleistung um 1.900 m³/h gesenkt und eine der 6 Weitwurfdüsen geschlossen. Es zeigt sich, dass diese kleine Reduzierung des Volumenstroms (nur 16 %) bereits eine Reduzierung des Strombedarfs um 34 % bewirkt, d.h. die Stromeinsparung beträgt 39 kWh pro Tag für das Lüftungsgerät 4.

Für das Lüftungsgerät 5 wurde der gleiche Versuch mit einer zusätzlichen Stufe durchgeführt:

- Die Reduzierung der Zuluft um 13 % bewirkt eine Stromreduzierung von 26 % bzw. 33 kWh pro Tag für das Lüftungsgerät 5.
- Die Reduzierung der Zuluft um 25 % bewirkt eine Stromreduzierung von 47 % bzw. 92 kWh pro Tag für das Lüftungsgerät 5.

Diese signifikanten Stromreduzierungen beruhen darauf, dass der Druckverlust (im Netz und Lüftungsgerät) etwa in dritter Potenz vom Volumenstrom abhängig ist.

Bei einem Versuch im Januar und bei der THM - Messung (siehe Tab. 5) wurde der Zuluftvolumenstrom von allen Geräten kurzzeitig um ca. 50% reduziert. Eine grobe Auswertung basierend auf Tageswerten der Stromzähler ergibt ein Einsparpotential von ca. 60 - 70 % des Stromverbrauchs. Ähnliche Werte zur Stromeinsparung konnten bereits bei einem Versuch zur Umluftreduktion in Halle 1+2 aus dem Jahr 2012/2013 ermittelt werden [Peper/Grove-Smith 2013].

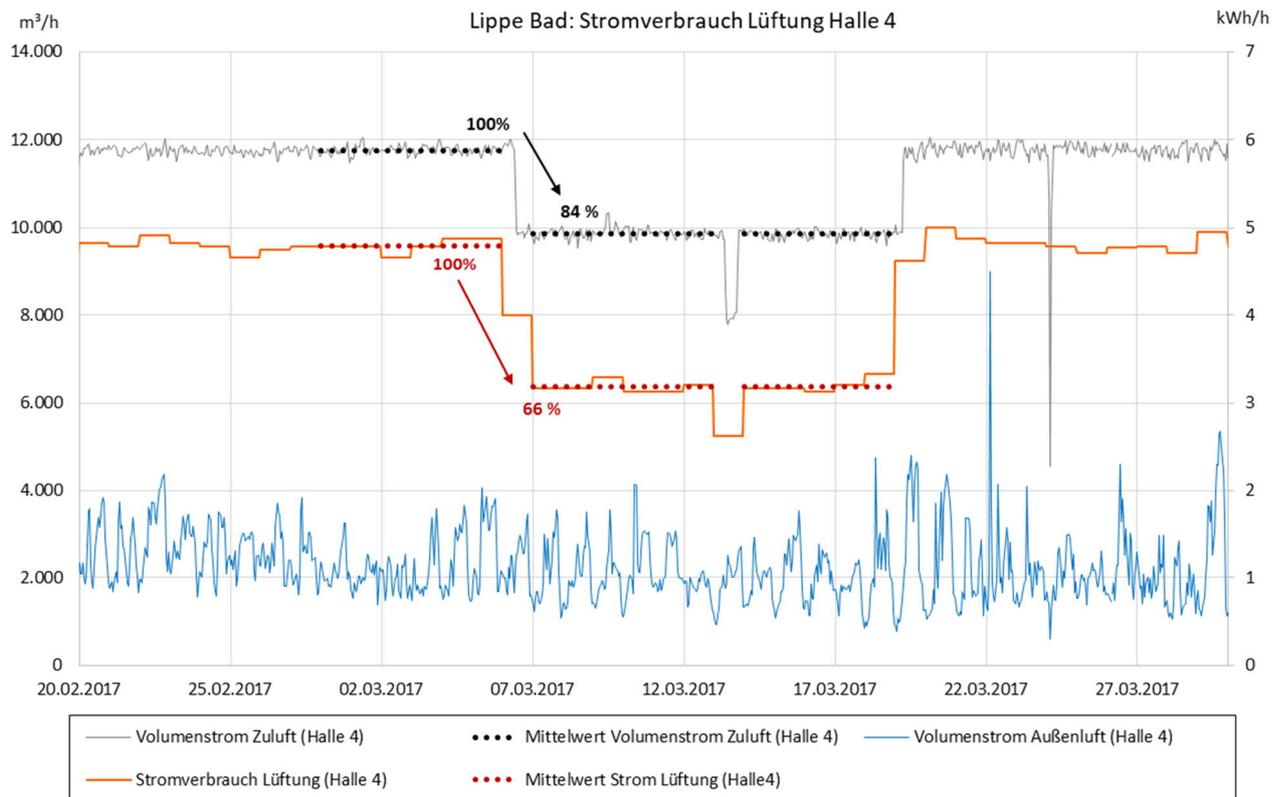


Abb. 53: Bei gleichbleibendem Außenluftvolumenstrom wurde der Zuluftvolumenstrom reduziert. Dadurch sinkt der Stromverbrauch des Lüftungsgerätes signifikant.

6.3 Lippe-Bad: Versuch Duschbereich ohne Luftnacherhitzung

Im Lippe-Bad wird die Luft aus dem Bereich der Umkleiden an zwei Punkten abgesogen, in zwei Kanalsystemen in den Keller geführt, dort über Heizregister nacherwärmt und erst dann in die Dusch/WC-Bereiche eingeblasen. Dafür müssen neben den Kanalbauten auch zwei Nachheizregister nebst Zuleitungen und Regelung sowie zwei Ventilatoren betrieben werden.

Um zu testen, ob der Betrieb auch ohne diese Nachheizung möglich ist, wurde im Lippe-Bad versuchsweise am 02.11.2016 gegen Mittag die Nachheizung in beiden Luftkreisläufen abgeschaltet. Gleichzeitig sollte im Umkleidebereich die Raumtemperatur leicht angehoben werden. Die Anhebung der Raumtemperatur in den Umkleiden erfolgte allerdings nicht wie geplant. Vereinzelt Klagen einiger Nutzer führten bereits am 4. Tag (06.11.2016) gegen Mittag dazu, den Versuch zu beenden und die Nacherwärmung wieder zu aktivieren.

Damit erfolgte an drei vollständigen Tagen keine Nacherwärmung der überströmenden Luft. In den vier Vollbetriebstagen vor und nach der Abschaltung wurden je Nachheizregister zwischen 110 bis 113 kWh/Tag für die Nachheizung aufgewendet (6,2 bis 6,4 kW Leistung je Heizregister, etwa 17 bis 18 h pro Tag). Während der Abschaltung ist die Beheizung der Umkleidebereiche unverändert betrieben worden (ca. 160 bis 260 kWh/Tag). Eine Auswertung möglicher Einsparungen, welche

sich nach einer moderaten Temperaturerhöhung im Umkleidebereich einstellen, konnte nicht wie geplant erfolgen. Eine Wiederholung des Versuchs war nicht möglich. Zusätzlich neben dem Wärmebereich (Nachheizung) müsste auch der Stromverbrauch für die Ventilatoren berücksichtigt werden. Der Aufwand, die Luft in den Keller zu transportieren, dort zu erwärmen und wieder nach oben zu transportieren, ist aufwendiger als einen Überströmventilator mit wenig Druckverlust zu betreiben oder sogar "passiv" überströmen zu lassen (Ansaugung durch die Abluft). Der Strom für die Ventilatoren wird im Lippe-Bad allerdings nicht gesondert erfasst.

Im Bambados wurde gute Erfahrung mit der passiven Überströmung aus dem Umkleidebereich in den Duschbereich ohne Nachheizung gemacht. Alternativ wären auch zusätzliche Heizkörper in den Duschen zur Nachheizung denkbar.

6.4 Luftführung in der Schwimmhalle (CFD Simulationen)

Durch die Positionierung von Zu- und Abluftventilen wird die Durchströmung der Schwimmhalle beeinflusst, und damit nicht nur die Temperatur- und Feuchteverteilung im Raum, sondern auch die Konzentration der Schadstoffe. Bei der Luftführung in Hallenbädern stand bisher nicht die Schadstoffabfuhr im Mittelpunkt der Optimierung, sondern das ausreichende Anblasen der Außenverglasungen, um diese frei von Kondensat zu halten. In Passivhaus-Hallenbädern ist dies aufgrund der höheren Fensterqualitäten nicht nötig. Daher kann eine optimierte Luftführung und Absaugung unter Berücksichtigung der Feuchte- und Schadstoffabfuhr sowie der Temperaturverteilung bzw. Luftbeheizbarkeit realisiert werden. Zudem erlaubt es die gute Qualität der Gebäudehülle im Passivhaus-Hallenbad die Zuluftvolumenströme im Vergleich zu konventionellen Bädern zu reduzieren (Außenluft und reduzierte oder gar keine Umluft - siehe Kapitel 5.1). Es ist aber deshalb umso wichtiger, die zugeführte Frischluft möglichst effizient für eine Abfuhr der Schadstoffe aus dem Becken (Chlorabbauprodukte/Trihalogenmethan) zu nutzen.

Im Rahmen dieses Projektes wurden an der Universität Innsbruck CFD Simulationen durchgeführt [Rojas 2017]. Diese basieren auf einem Modell einer Halle des Passivhaus-Bades Bambados in Bamberg mit Zuluft-Einbringung über Drallauslässe (siehe [Gollwitzer et al. 2015] für eine Dokumentation und für Monitoring-Auswertung dieses Projekts). Die Untersuchung verschiedener Varianten der Zu- und Abluft-Positionierung geben Aufschluss über eine effektive Schadstoffabfuhr und sollen als Hilfestellung für die Planung und Auslegung der Luftführung dienen.

Zusätzlich zu der im Bad realisierten Luftführung ("As-Is", mit Zu- und Abluftventilen an der Decke), wurden die in Tab. 6 aufgeführten Luftführungsvarianten per CFD Simulation betrachtet. Ausgehend von zwei als repräsentativ definierten Betriebszuständen - mit hoher Verdunstung und entsprechend hohem Volumenstrom (A) im Sommer, sowie niedriger Verdunstung und entsprechend niedrigem Volumenstrom (B) im Winter - wurden neun weitere Varianten modelliert und simuliert. Diese Varianten unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich der Zu- und Abluft-Positionierung.

Tab. 6: Betrachtete Luftführungsvarianten für die CFD Simulationen in [Rojas 2017].
AW = Außenwand, IW = Innenwand, ZL = Zuluft, AL = Abluft, DA = Drallauslass, β = Massenübergangskoeffizient zur Berechnung der Verdunstungsmenge.

		Temperatur ZL [°C]	Temperatur Raum [°C]	abs. Feuchte AL [kg/kg]	abs. Feuchte ZL [kg/kg]	Volumen- strom ZL [m ³ /h]	beta [m/h]	Verdunstung H ₂ O [kg/h]
As-Is Varianten								
A	Volumenstrom hoch, $\beta=28$	30,2	30	0,0146	0,009	45360	28	294
B	Volumenstrom min, $\beta=10$	40	30	0,0152	0,004	7560	10	98
Alternativ-Varianten								
B1	DA vertikal ausblasend	40	30	0,0152	0,004	7560	10	98
B2	Abluft unten an AW	40	30	0,0152	0,004	7560	10	98
B3	Abluft unten an AW, DA vertikal	40	30	0,0152	0,004	7560	10	98
B4	Abluft Beckenrand	40	30	0,0152	0,004	7560	10	98
B7	Abluft Beckenrand, DA vertikal	40	30	0,0152	0,004	7560	10	98
B5	ZL Boden AW, AL IW (linear)	40	30	0,0152	0,004	7560	10	98
B6	ZL Boden AW, AL IW (1x)	40	30	0,0152	0,004	7560	10	98
A5	ZL Boden AW, AL IW (linear)	30,3	30	0,0143	0,009	50400	28	306
A6	ZL Boden AW, AL IW (1x)	30,3	30	0,0143	0,009	50400	28	306

Für die Bewertung der Lüftungseffizienz wurden die folgenden zwei Kennzahlen herangezogen:

- **Luftaustauschwirkungsgrad / Air Exchange Efficiency (ACE):** Diese gibt an, wie gut die Zuluft genutzt wird, um das gesamte Raumvolumen zu spülen. Ein Wert von 1 (bestes Ergebnis) entspricht einer reinen Kolbenlüftung (die Luft durchströmt den gesamten Raum am direkten Weg zwischen Zu- und Abluftöffnung) und 0,5 einer vollständigen Durchmischung. ACE-Werte <0,5 zeigen eine Kurzschlussströmung an.
- **Schadstoffabfuhereffizienz / Contaminant Removal Efficiency (CRE):** Diese gibt an, wie gut ein Schadstoff aus dem Raum abgeführt wird. Je höher der Wert, desto besser und prinzipiell sind Werte von 0 bis "unendlich" möglich. Ein Wert von 1 ergibt sich bei perfekter Durchmischung. "Unendlich" ergäbe sich wenn der Schadstoff direkt an der Quelle abgesaugt würde. Die Werte sind stark von der Position der Schadstoffquelle und des betrachteten Raumvolumen abhängig. In [Rojas 2017] wurden verschiedene Bereiche betrachtet. Die Ergebnisübersicht in diesem Bericht enthält die CRE für das gesamte Raumvolumen, sowie für den für Schwimmer relevanten Bereich (10 cm über der Wasseroberfläche). In letzteren Fall entspricht der Auswertebereich dem der Schadstoffquelle, d.h. der beste zu erreichende Wert ist 1.

Die relevantesten Ergebnisse aller Varianten sind in Tab. 7 zusammengefasst. Der Bericht [Rojas 2017] enthält eine detaillierte Dokumentation der Berechnungsergebnisse inkl. Grafiken aller Varianten zur räumlichen Verteilung der Temperatur, Feuchte (dies gilt auch als äquivalent für die Schadstoffkonzentration), Luftgeschwindigkeit und Luftalter.

**Tab. 7: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse aus [Rojas 2017].
Farbskala: gelb (niedrig/schlechter) hin zu grün (hoch/besser).
AW = Außenwand, IW = Innenwand, ZL = Zuluft, AL = Abluft.**

		ACE Gesamt- volumen	CRE Gesamt- volumen	CRE Wasser- Oberfläche	Mittl. Geschwindig- keit Wasser- [m/s]
As-Is Varianten					
A	Volumenstrom hoch, $\beta=28$	0,37	0,75	0,58	0,21
B	Volumenstrom min, $\beta=10$	0,39	0,79	0,69	0,13
Alternativ-Varianten					
B1	DA vertikal ausblasend	0,45	0,92	0,75	0,09
B2	Abluft unten an AW	0,5	1	0,81	0,08
B3	Abluft unten an AW, DA vertikal	0,45	0,97	0,77	0,11
B4	Abluft Beckenrand	0,49	0,98	0,81	0,11
B7	Abluft Beckenrand, DA vertikal	0,48	0,96	0,78	0,1
B5	ZL Boden AW, AL IW (linear)	0,48	0,98	0,84	0,19
B6	ZL Boden AW, AL IW (1x)	0,47	0,98	0,84	0,2
A5	ZL Boden AW, AL IW (linear)	0,49	0,92	0,71	0,4
A6	ZL Boden AW, AL IW (1x)	0,49	0,92	0,71	0,4

Man erkennt, dass die As-Is Varianten (A & B) den niedrigsten ACE ausweist. Hier sind sowohl die Zuluft einbringung als auch die Abluftabsaugung an der Decke. Mit einem Wert von 0,37 bzw. 0,39 bestätigt dies die Befürchtung, dass ein Strömungskurzschluss vorliegt. Somit wird ein nennenswerter Anteil des geförderten Luftvolumenstroms ungenutzt wieder abgesaugt. Für die Gesundheit der Schwimmer ist es wichtig, die Schadstoffausgasung aus dem Wasser möglichst gut abzuführen. Dies gelingt bei der As-Is Variante nur schlecht. Die Schadstoffabfuhr-effizienz (CRE) bezogen auf die Wasseroberfläche liegt bei 0,69 bzw. 0,58.

Eine deutliche Verbesserung stellt sich bereits ein, wenn die Drallauslässe in den Simulationen als „vertikal ausblasend“ anstatt „horizontal ausblasend“ modelliert werden (Variante B1). Durch eine Verlegung der Abluft in den unteren Hallenbereich werden die Ergebnisse noch weiter verbessert. Hierbei wurden unterschiedliche Möglichkeiten der Abluftabsaugung betrachtet: An vereinzelt Stellen entlang der Außenwand (B2), direkt am Beckenrand z.B. am Beckenüberlauf (B4), in Bodennähe entlang der gesamten der Innenwandseite (B5) und als zwei einzelne Abluftöffnungen in Bodennähe an der Innenwand (B6).

Die untersuchten Varianten mit der höchsten Schadstoffabfuhr-effizienz bezogen auf die Wasseroberfläche sind jene mit der Zuluft einbringung entlang der Außenfassade und Abluftabsaugung in Bodennähe entlang der Innenwand (B5 & B6). Für diese Varianten ergeben sich ACE's von 0,48 bzw. 0,47 (also Werte entsprechend fast perfekter Durchmischung), und CRE's von 0,84.

In Abb. 54 & Abb. 55 sind jeweils die Feuchteverteilung, sowie das Alter der Raumluft für den Ausgangsfall B und die Alternativen B2, B4 und B5 im Querschnitt der Halle dargestellt. Hier ist unter anderem auch gut zu erkennen, dass sich bei der mit Abluftabsaugung in Bodennähe (B5) hohe Feuchte- bzw. Schadstoffkonzentrationen (äquivalent) auf eine dünne Schicht knapp über der Wasseroberfläche beschränken.

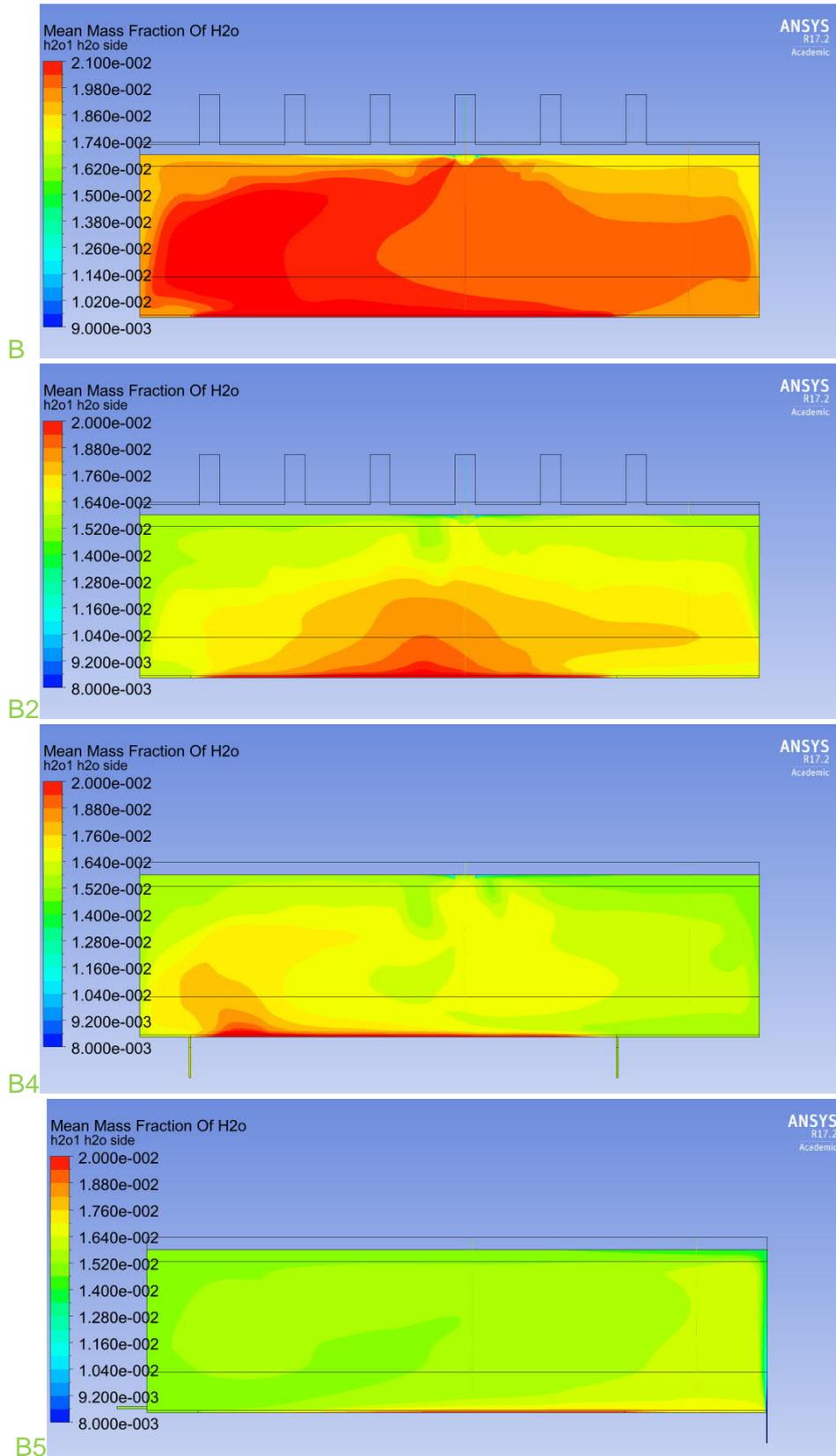


Abb. 54: Feuchteverteilung im Querschnitt der Halle für ausgewählte Varianten (von oben nach unten): Ausgangsvariante (B), Abluft an der Außenwand (B2), Abluft am Beckenrand (B4) und Zuluft entlang der Außenwand mit Abluft entlang der Innenwand (B5). Die Innenwand befindet sich in diesem Schnittbild auf der linken Seite.

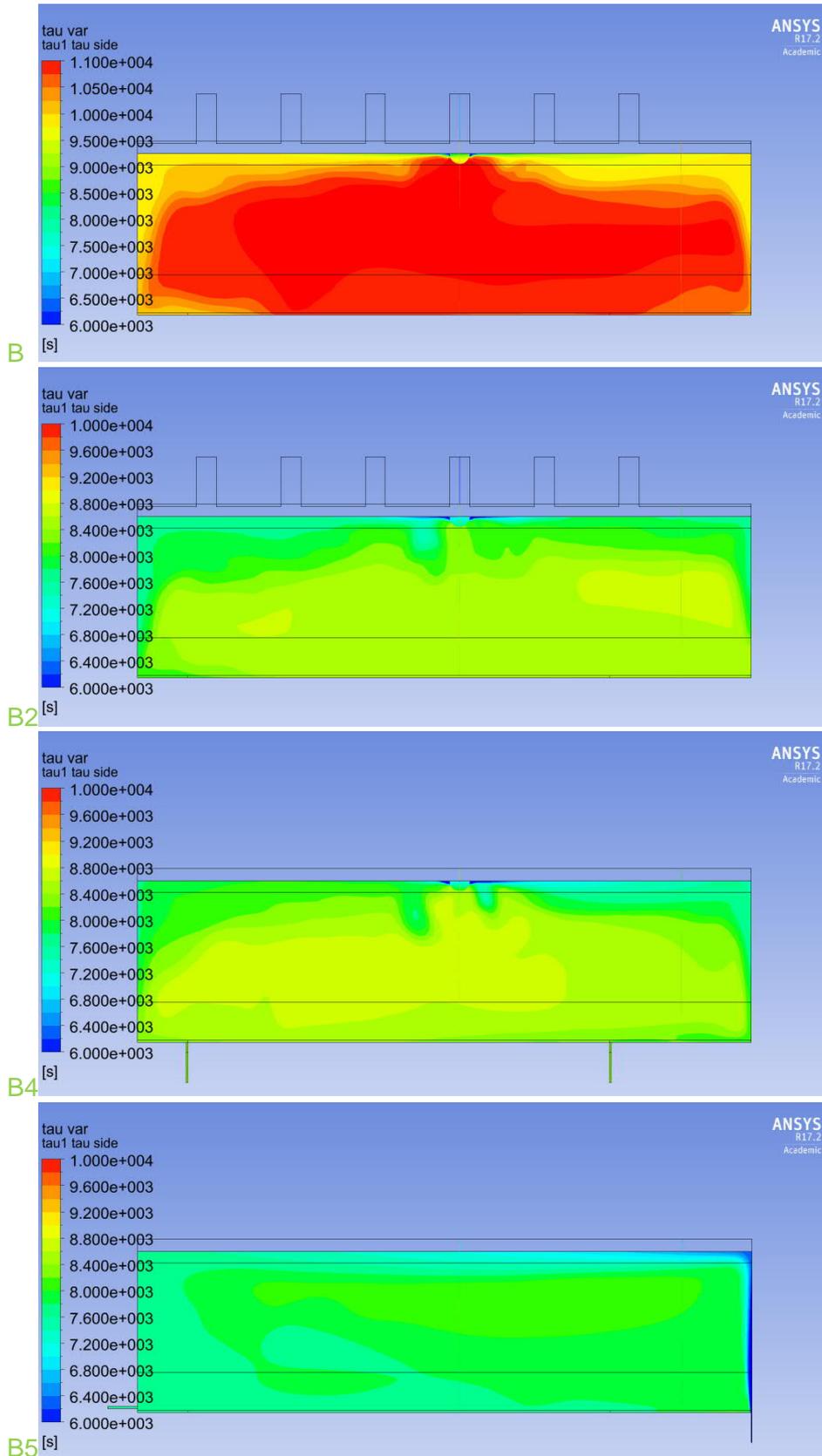


Abb. 55: Das berechnete Alter der Luft im Querschnitt der Halle für ausgewählte Varianten (von oben nach unten): Ausgangsvariante (B), Abluft an der Außenwand (B2), Abluft am Beckenrand (B4) und Zuluft entlang der Außenwand mit Abluft entlang der Innenwand (B5). Die Innenwand befindet sich in diesem Schnittbild auf der linken Seite.

Zusammenfassung

In der Gesamtanalyse zeigen die Simulationsergebnisse, dass bei Positionierung der Abluft in Bodennähe höhere Schadstoffabfuhr-Effizienzen erzielt werden. Dabei scheint die genaue Anordnung (linear aufgeteilt vs. punktuelle Absaugung vs. Beckenrand) keinen sehr großen Unterschied zu machen. Diese Ergebnisse sind im Einklang mit den energetischen Vorteilen einer Schichtlüftung (vgl. Kapitel 5.1), bei der sich durch die Abluftabsaugung in Bodennähe eine vorteilhafte Schichtung bildet mit hoher Feuchte direkt über der Wasseroberfläche. Auch in der Praxis wurden bereits positive Erfahrungen mit bodennaher Absaugung erzielt (siehe [Kaluza 2016]). Eine unten positionierte, nach oben gerichtete Zuluft einbringung entlang der Außenfassade (könnte auch eine Innenwand sein) kann eine zusätzliche leichte Verbesserung gegenüber einer Einbringung von oben (z.B. via Drallauslässe) ermöglichen; scheint aber nicht ausschlaggebend für die Lüftungseffizienz. Diese Ergebnisse gelten für die untersuchte Halle. Es können Tendenzen abgelesen werden aber die Randbedingungen (Geometrie, Nutzung, Betriebsweise etc.) müssen bei der Planung der Luftführung im Einzelfall berücksichtigt werden.

6.5 Schadstoffmessungen (THM)

Ein zentraler Punkt zur Realisierung eines Hallenbades nach dem Passivhauskonzept ist die energetisch motivierte Reduzierung des Umluftanteils sowie des Außenluftvolumenstroms (vgl. auch die Ausführungen in der Grundlagenuntersuchung [Schulz et al. 2009]). Dabei sind die entscheidenden Parameter der Luftqualität zwingend zu berücksichtigen. Bei Bädern entstehen durch Chlorung zur Sicherstellung der Beckenwasserhygiene sogenannte Desinfektionsnebenprodukte (DNP). Im Fokus der Gesundheitsbewertung sind insbesondere die entstehende Gruppe der Trihalogenmethane (THM) sowie der Trichloramine (NCl_3). Bei Trihalogenmethanen (THM) handelt es sich um organische Verbindungen, bei denen in der Molekülstruktur des Methan (CH_4) drei der vier Wasserstoffatome durch unterschiedliche Halogene (Fluor, Chlor, Brom, Iod) ersetzt sind. Sie entstehen durch die Reaktion des Chlors mit den Belastungsstoffen im Wasser und mit den durch Badegäste eingetragenen organischen Belastungsstoffen (z.B. Harnstoff und Aminosäuren aus den Quellen Haut, Schweiß und Urin [Junek et al. 2017]). THM wird als Summenparameter aus den vier Verbindungen Trichlormethan (auch "Chloroform"), Dibromdichlormethan, Dibromchlormethan sowie Tribrommethan berechnet. Dafür wird der THM-Gehalt auf die Verbindung mit der geringsten Molekülmasse umgerechnet – in diesem Fall das Chloroform¹. THM ist schlecht wasserlöslich, leichtflüchtig und gast deshalb aus dem Beckenwasser aus [Junek et al. 2017]. Bei unzureichender Hallenlüftung kann sich THM in der Hallenluft anreichern. Im

¹ Nach [DIN 19643] berechnet als Chloroform (CHCl_3):

$$\text{THM} = A + 0,728 \times B + 0,574 \times C + 0,472 \times D,$$

mit A = mg/l CHCl_3 ; B = mg/l CHBrCl_2 ; C = mg/l CHBr_2Cl ; D = mg/l CHBr_3 .

Beckenwasser dient das THM als Indikatorsubstanz für die Beurteilung der Badewasser-Qualität. Die Aufnahme der Verbindungen durch den Menschen erfolgt wahrscheinlich vorrangig über die Luft [Sacré et al. 1993].

Die in der Literatur vorliegenden Untersuchungen lassen nur wenige Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen der THM-Konzentration im Wasser und in der Luft mit dem Zu- bzw. Abluftvolumenstrom der Schwimmhalle zu. In den Passivhaus Hallenbädern in Bamberg und Lünen wurden in den Vorprojekten dazu bereits erste orientierenden THM-Messungen durchgeführt ([Peper/ Grove-Smith 2013] und [Gollwitzer et al. 2015]). Der Zusammenhang zwischen der Schadstoffkonzentration und dem Außenluftanteil sowie dem Wegfall bzw. der Reduktion der Umluft soll mit den, in drei Hallenbädern durchgeführten Messkampagnen, systematischen untersucht werden. Auf diesem Weg sollen Auswirkungen der veränderten Randbedingungen der Lüftung auf die Luftqualität geklärt werden. Die Auswahl der Messpunkte und Raumluftbedingungen etc. wurden vom PHI erarbeitet und festgelegt. Für die Untersuchung ist wichtig, dass identische chemische Analyseverfahren in den drei Bädern angewendet werden, damit eine Vergleichbarkeit untereinander möglich ist. Die Probenahme in den Bädern wurde unter Leitung des PHI gemeinsam mit dem Chemischen Labor Dr. Graser (CLG) aus Schonungen durchgeführt. Die chemischen Analysen der Luft- und Wasserproben führte das CLG durch. Das Labor gibt die Messunsicherheit der THM-Werte mit einem Bereich zwischen 10 und 15 % an.

6.5.1 Messablauf

Bei jeder der drei Untersuchungskampagnen wurden Proben der Hallenluft zeitgleich mit Proben des Badewassers genommen, da das Wasser die Quelle der DNP darstellt. Nach der Festlegung der Positionen der Probenahme in den Hallen eines Bades wurden die Messungen bei unterschiedlichen Umluftluftwechselraten durchgeführt. Mit Constant-Flow-Pumpen wurden je Halle an unterschiedlichen Positionen möglichst zeitgleich Proben aus der Luft angesaugt. Die Luftproben wurden 20 cm über der Wasseroberfläche genommen, um die Belastung der Luft abzubilden, welche Schwimmer einatmen. Zum Vergleich erfolgte auch eine Probenahme in 1,5 m Höhe im Beckenumgang zur Beurteilung der Atemluft von Personal und Badegästen.

Die Probenahmen mit den Pumpen dauerten jeweils 10 Minuten bei einer Ansaugung von 20 Liter/Minute. Parallel zur Luftprobenahme wurden die Lufttemperatur und die relative Feuchte im Bereich der Probenahme messtechnisch erfasst. Als Adsorbens diente Aktivkohle (Röhrchen). Während der Probenahme wurden die sich im Becken befindlichen Personen (in der Nähe der Messstelle) gezählt und deren Aktivität (ruhiges Schwimmen bis Wassergymnastik) festgehalten. Es ist anzunehmen, dass die Bewegung der Wasseroberfläche Einfluss auf die Freisetzung der THM-Verbindung hat. Bei [Jentsch/Matthiessen 1998] findet sich dazu die Aussage: "Höhere THM-Belastungen des Wassers ermöglichen grundsätzlich auch höhere THM-Belastungen der Luft. In welchem Maß diese Möglichkeit umgesetzt wird, hängt von der Förderung der Emission durch die Aktivitäten der Badenden und den Betrieb von Wasser-Attraktionen, von dem jeweils gefahrenen Frischluft-Anteil und von anderen Faktoren ab." sowie "Bei konstanter THM-Belastung des Wassers kann die THM-Belastung der Luft je nach Aktivität der Badenden und je nach Betrieb von

Wasser-Attraktionen (...) variieren. Schon normaler Schwimmbetrieb fördert die Emission der THM aus dem Wasser, kurzfristige Spitzenbelastungen der Luft entstehen z.B. bei Wellenbetrieb".

Die Aktivkohleröhrchen wurden zeitnah nach der jeweiligen Messkampagne im Labor analysiert und ausgewertet. Von der Datenerfassung der GLT des jeweiligen Bades wurden im Nachhinein die Daten vom Zu- und Außenluftvolumenstrom verwendet.

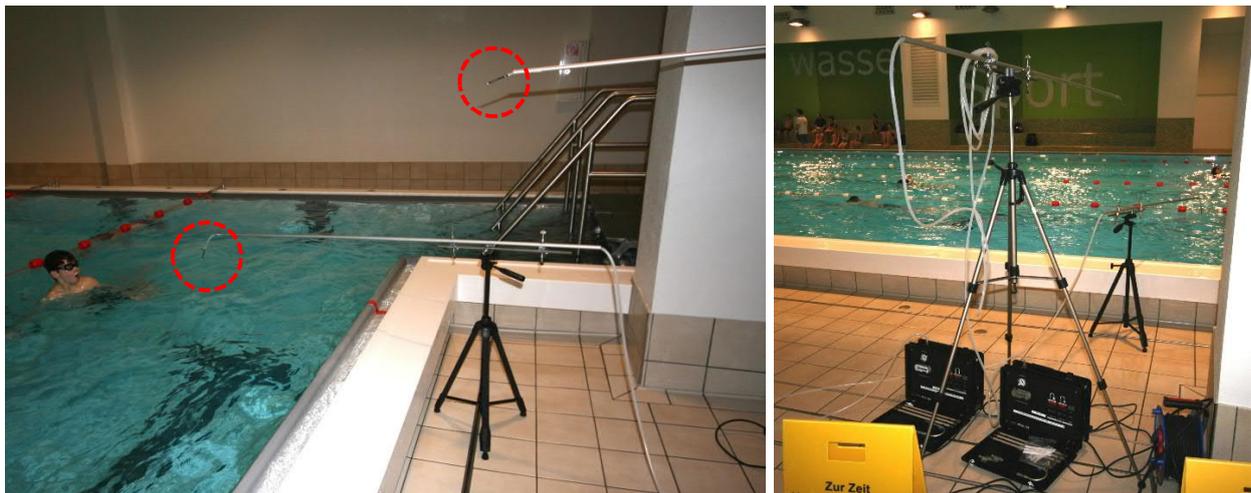


Abb. 56: Luftprobennahme mit Ansaugpumpen in einer Schwimmhalle (Halle 5 im Lippe-Bad Lünen) in 20 cm über der Wasseroberfläche und 1,5 m Höhe über dem Umgang.

6.5.2 THM-Messungen Bambados

Im Bambados wurden am 31.01. und 01.02.2017 die Probennahmen in drei Hallen durchgeführt. Dazu gehörten der Freizeitbereich, der Sportbereich mit 50 m Bahn sowie die kleine Lehrschwimmhalle 2. In den Abendstunden des 31.01.2017 zwischen 17:00 und 19:15 Uhr wurden die ersten Proben in den drei Hallen genommen. Zu dieser Zeit wurden die Becken genutzt. Die zweite Beprobung erfolgte an den gleichen Positionen in den frühen Morgenstunden (4:50 bis 6:00 Uhr) vor der öffentlichen Nutzung des Bades. Die Betriebsweise der Lüftungsanlagen wird unterschieden nach Tag- und Nachbetrieb (In der Nacht sind die Sollwerte der Luftfeuchte höher als im Tagbetrieb; die Anlagen schalten sich nur bei Entfeuchtungsbedarf ein). In den Morgenstunden wurden nur die Proben über der Wasseroberfläche genommen, keine im Umgang. Zu dieser Zeit waren die Becken entsprechend ungenutzt und die Wasseroberfläche glatt.



Abb. 57: Luftprobenahme mit Ansaugpumpen im Bambados in der Sporthalle mit 50 m Bahn (links) und in der Freizeithalle (rechts)

Die Ergebnisse der THM-Messungen der Hallenluft [CLG 2017-A] sind als Konzentrationen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in die folgenden Diagramme im Zusammenhang mit den Volumenströmen von Zu- und Außenluft eingetragen. Der Umluftvolumenstrom kann aus der Differenz zwischen Zu- und Außenluftvolumenstrom abgelesen werden. Um eine Einschätzung des Volumenstroms zum Hallenvolumen zu haben, ist die Luftwechselrate (Volumenstrom Außenluft in Bezug auf das Hallenluftvolumen) für die beiden Zeiträume angegeben. Zusätzlich sind textlich in den Diagrammen die Lufttemperaturen, THM-Konzentrationen im Wasser [$\mu\text{g}/\text{l}$] sowie die Personenzahlen (in der Nähe der Probenahme) zur Zeit der Beprobung angegeben.

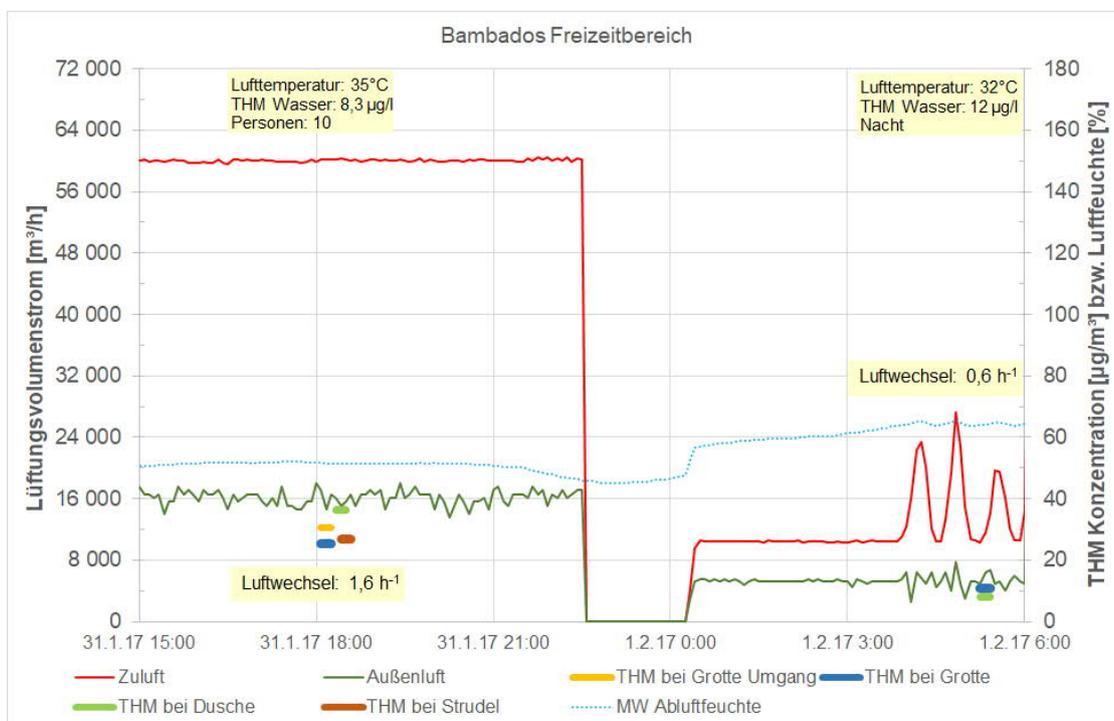


Abb. 58: THM Messwerte (Luft und Wasser), rel. Ablufffeuchte und Luftvolumenströme während des Messzeitraums der FREIZEITHALLE des Hallenbades Bambados.

Die THM-Werte in der Freizeithalle (Abb. 58) sind bereits bei der ersten Messung in den Abendstunden mit Werten zwischen 25 und 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ niedrig. Der Messwert in 1,5 m über dem Umgang (31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) liegt zwischen den drei über der Wasseroberfläche gemessenen Werten. Beim niedrigeren Außenluftwechsel in den Morgenstunden ohne Beckennutzung liegen die THM-Werte über der Wasseroberfläche nochmals niedriger (8 und 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Der geringere Außenluftwechsel sowie die deutlich geringere Umluft als im Tagbetrieb führen hier nicht zu einer Erhöhung der Konzentrationen.

In der Sporthalle (Abb. 59) ist die Luftwechselrate am Tag deutlich niedriger als in der Freizeithalle. Die Luftführung unterscheidet sich auch von der in der Freizeithalle. Durch die Einbringung und Absaugung der Luft im Deckenbereich wurde bereits bei vorausgehenden Untersuchungen nicht optimale Luftströmungen festgestellt (Kurzschluss-Strömungen) (vgl. [Gollwitzer et al. 2015]). Insgesamt ist zu bewerten, dass im Sportbereich - analog zum Passivhaus-Konzept - ein nur minimaler Umluftanteil gefahren wird. Die gemessenen THM-Konzentrationen liegen in den Abendstunden mit Werten zwischen 51 bis 83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei stärkerer Beckennutzung etwas höher als in der Freizeithalle. Der Messwert vom Umgang liegt wieder zwischen den Werten über der Wasseroberfläche. Der Messwert der Konzentration im Beckenwasser liegt mit 12 $\mu\text{g}/\text{l}$ nur gering über dem Wert vom Freizeitbecken 8,3 $\mu\text{g}/\text{l}$.

Am Ende der Nacht liegen die Messwerte der Hallenluft deutlich niedriger (26 und 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) als am Tag. Auch hier wirkt sich der niedrigere Luftwechsel mit so gut wie keinem Umluftanteil der Nachtstunden nicht negativ auf die Konzentration aus. Der Messwert im Beckenwasser liegt mit 14 $\mu\text{g}/\text{l}$ geringfügig über dem Wert der Abendstunden.

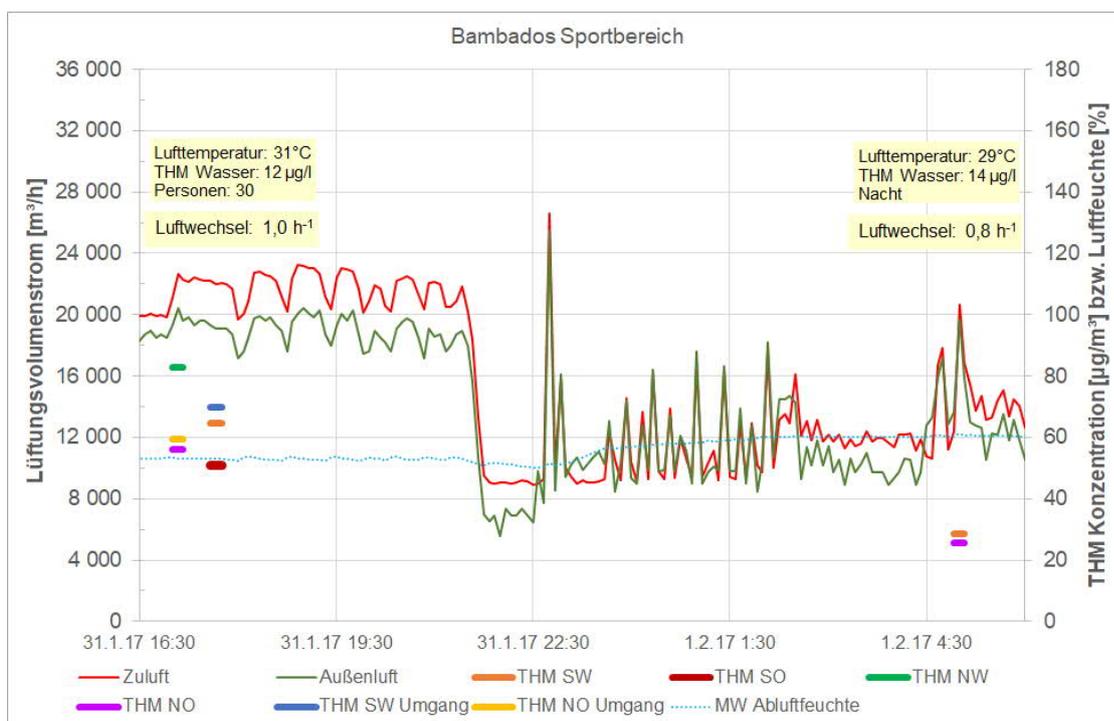


Abb. 59: THM Messwerte (Luft und Wasser), rel. Abluftfeuchte und Luftvolumenströme während des Messzeitraums der SPORTHALLE des Hallenbades "Bambados".

Der dritte untersuchte Bereich im Bamberger Bambados ist das Lehrbecken 2. Dort wurde nur eine Luftprobe über dem Wasser und eine im Umgang gezogen. Das Beckenwasser wurde ebenfalls beprobt (Tag und Nacht 18 µg/l). Beide Luftproben liegen - bei intensiver Beckennutzung - mit nur 14 µg/m³ sehr niedrig. Der Luftwechsel in der kleinen Halle ist während der Abendstunden mit durchschnittlich 4,3 h⁻¹ deutlich höher als in den anderen beiden Hallen. Einen Umluftanteil gibt es in der Halle zur Zeit der Messungen nicht (Zuluft- entspricht dem Außenluftvolumenstrom). In den frühen Morgenstunden ist der Luftwechsel mit 2,6 h⁻¹ wieder deutlich niedriger. Die THM-Konzentration über der Wasseroberfläche ist trotzdem nochmals halbiert (7 µg/m³). Insgesamt liegen die Werte damit in der Halle vom Lehrbecken 2 alle besonders niedrig. Weder der nicht vorhandene Umluftanteil, noch die Reduktion der Luftwechselrate haben sich negativ auf die Konzentration ausgewirkt. Allerdings liegt die Luftwechselrate in der kleinen Halle (niedrige Raumhöhe) im Vergleich relativ hoch.

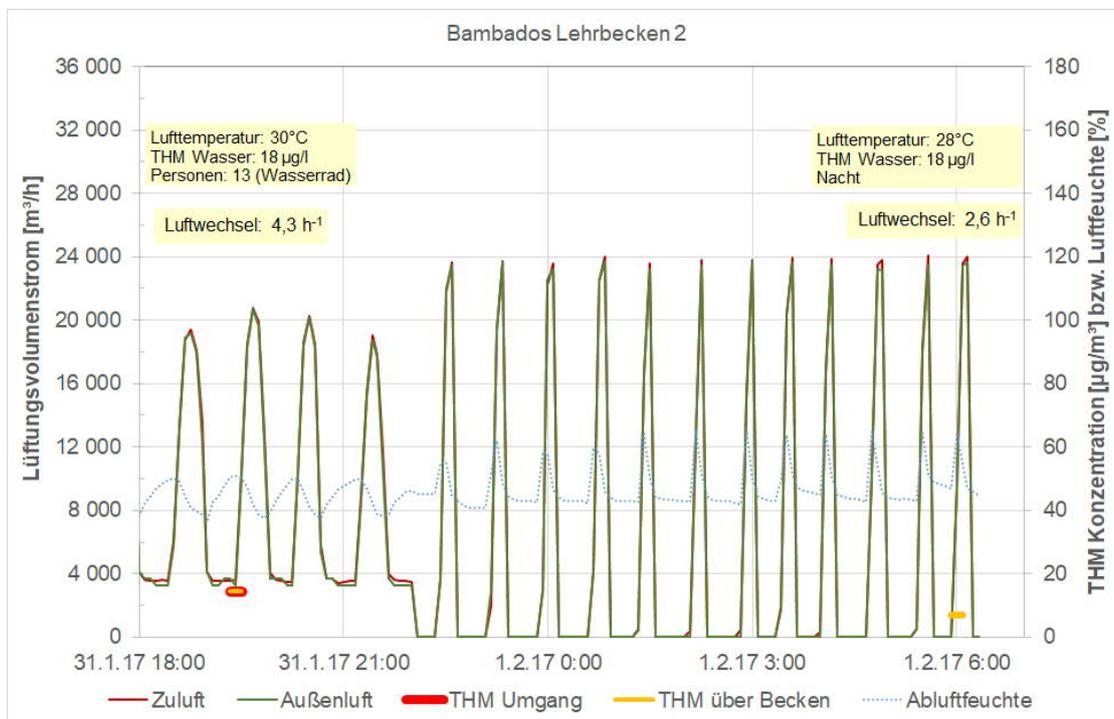


Abb. 60: THM Messwerte (Luft und Wasser), rel. Abluftfeuchte und Luftvolumenströme während des Messzeitraums der LEHRBECKEN 2 des Hallenbades "Bambados".

Der Vergleich mit den orientierenden Messungen im Rahmen des vorausgehenden Monitorings [Gollwitzer et al. 2015] zeigt, dass sich die THM-Konzentrationen der Hallenluft bei der Messkampagne 2017 verbessert haben. Zum Vergleich werden die Messwerte in einer Tabelle dargestellt.

Tab. 8: Messergebnisse der orientierenden THM-Messungen im Rahmen des Monitorings des Bamberger Bambados (aus [Gollwitzer et al. 2015]) ergänzt mit den Messwerten von 2017. Die Messwerte wurden auf Werte ohne Nachkommastelle gerundet. Legende: "o. Umluft" = ohne Umluft

THM-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	6.2.2014 11:00 - 16:30	11.3.2014 10:00 - 14:00	31.1.2017 Abend	1.2.2017 Früher Morgen
Lehrbecken				
<i>Beckenwasser</i>	14 $\mu\text{g}/\text{l}$	-	18 $\mu\text{g}/\text{l}$	18 $\mu\text{g}/\text{l}$
<i>Luftwechselrate h-1</i>	4,7 - 6,1	2,1 - 11,2	4,3	2,6
Lehrbecken 1	22 o. Umluft	28 o. Umluft	-	-
Lehrbecken 2	20 o. Umluft	26 o. Umluft	14 o. Umluft	7 o. Umluft
Umgang LB 2	-	-	14 o. U.	-
Freizeitbecken				
<i>Beckenwasser</i>	11 $\mu\text{g}/\text{l}$	-	8 $\mu\text{g}/\text{l}$	12 $\mu\text{g}/\text{l}$
<i>Luftwechselrate h-1</i>	0,9 - 1,1	1,0	1,6	0,6
Bei der Grotte	46	75 o. Umluft	25	11
Umgang Grotte	-	-	30,6	-
Nähe Dusche	53	64 o. Umluft	36	8
Beim Strudel	50	28 o. Umluft	27	-
Sportbecken				
<i>Beckenwasser</i>	12 $\mu\text{g}/\text{l}$	-	12 $\mu\text{g}/\text{l}$	14 $\mu\text{g}/\text{l}$
<i>Luftwechselrate h-1</i>	0,6 - 0,7	0,6 - 1,4	1,0	0,8
Süd-Ost	149	145 o. Umluft	51	-
Nord-West	146	86 o. Umluft	83	-
Nord-Ost	146	71 o. Umluft	56	26 o. Umluft
Nord-Ost Umgang	-	-	59	-
Süd-West	170	123 o. Umluft	65	29 o. Umluft
Süd-West Umgang	-	-	70	-

Zur Einordnung und zum Vergleich der Messwerte werden die Informationen, welche aus der Literatur bekannt sind, zusammengestellt: Laut Veröffentlichungen des Umweltbundesamtes (1994) und Eichelsdörfer (1996) liegt der Mittelwert für 70 Messungen der THM-Konzentration in der Hallenbadluft in einer Höhe von 20 cm über der Wasseroberfläche bei $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Minimum $7,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und Maximum $219 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [GSF 1997]. Untersuchungen durch das Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg ergaben eine durchschnittliche THM-Belastung der Luft (20 cm über der Wasseroberfläche) in Hallenbädern von ca. $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Minimum $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Maximum $192 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [GesAmtBW 2015] und [Jovanovic et al. 1993].

Eine umfangreiche Untersuchung u.a. über THM-Konzentrationen im Wasser, der Luft und im Blut ist in [Jentsch/Matthiessen 1998] zu finden. Zusammenfassend wird dort von THM-Belastungen der Luft über 10 Becken im Bereich von 74 bis $453 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berichtet; die Mittelwerte der dort untersuchten einzelnen Bäder lagen zwischen 76 und $196 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die THM-Belastungen der Beckenwasser lagen dabei z.T. deutlich höher als der heute gültige Grenzwert von $20 \mu\text{g}/\text{l}$.

In [Tardif et al. 2016] wird eine Untersuchung von 41 Hallenbädern in Kanada beschrieben. Dort wird abweichend der Gesamtwert der THM-Konzentration durch einfache Addition der vier Einzelverbindungen errechnet und nicht wie in Deutschland üblich [DIN 19643] mit der Gewichtungformel addiert (siehe Fußnote 1, Seite 57). Damit ist ein direkter Vergleich **nicht** möglich. Für ein Beispiel aus der Untersuchung würden sich statt der einfachen Gesamtsumme von $191,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nur $164,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (gewichtete Addition) ergeben. Daher wurden die Mittelwerte aus der Studie umgerechnet: Die THM-Belastungen des Beckenwassers waren im Durchschnitt mit umgerechnet $54,4 \mu\text{g}/\text{l}$ im Vergleich sehr hoch. Die Luft wies Mittelwerte von umgerechnet $164,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf, mit zusätzlich sehr hohen Maximalwerten.

Bei vier Untersuchungsperioden eines modernen Bades in Frankfurt wurden bei sehr geringer THM-Belastung des Beckenwassers (1,6 bis $4 \mu\text{g}/\text{l}$) in der Hallenluft THM-Belastungen von nur 8 bis $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Mittelwerte) gemessen [Junek et al. 2017]. Diese werden dort als "...sehr niedrige Belastung der Hallenluft..." eingestuft.

Im Vergleich zu den Literaturwerten sind die Messwerte der Messungen von 2017 im Bambados als gut zu bewerten. Es wird nochmals deutlich, dass die Luftführung im Sportbereich nicht optimal gelöst ist; ein Vorschlag zur Änderung der Luftführung wurde dem Betreiber unterbreitet. Aufgrund der Luftführung liegen hier etwas höhere Belastungswerte vor, die immer noch im niedrigen Bereich mit im Mittel $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Abendstunden mit bewegtem Wasser) liegen. Die anderen beiden Hallen zeigen niedrige Mittelwerte von $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Freizeithalle) bzw. $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Lehrschwimmhalle). Damit kann für das Bambados festgestellt werden, dass mit der Lüftung ohne Umluft nach dem Passivhaus-Konzept eine gute Lufthygiene mit niedrigen THM-Werten erreicht werden kann. Die Reduktion bzw. der Wegfall der Umluft kann in diesem Rahmen bedenkenlos durchgeführt und empfohlen werden.

6.5.3 THM-Messungen Lippe-Bad

Eine noch umfangreichere Messkampagne wurde Anfang Februar 2017 im Lippe-Bad durchgeführt. Die Probenahmen erfolgten in allen vier Hallen des Bades (Halle 1+2, Halle 3, Halle 4 sowie Halle 5) zu drei Zeitpunkten: In den Nachmittagsstunden des 09.02.2017 zwischen 16:20 und 17:50 Uhr wurden die ersten Proben in den vier Hallen genommen. Zu dieser Zeit wurden die Becken genutzt. Die zweite Beprobung erfolgte in den frühen Morgenstunden des Folgetages (4:50 bis 5:40 Uhr) vor der öffentlichen Nutzung des Bades (glatte Wasseroberfläche). Dann wurde die Betriebsweise der Lüftungsanlagen der vier Hallen per Hand verstellt auf reduzierte Umluftanteile. Am Nachmittag wurden dann zu etwa der gleichen Uhrzeit wie am Vortrag an den identischen Positionen erneut Proben genommen (10.02.2017 von 15:40 bis 17:00 Uhr).

Auch für das Lippe-Bad sind die Ergebnisse der THM-Messungen der Hallenluft sowie des Beckenwassers vom Chemischen Labor CLG Dr. Graser KG analysiert worden [CLG 2017-B]. Die THM-Werte der Luft sind wieder als Konzentrationen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in die folgenden Diagramme im Zusammenhang mit den Volumenströmen von Zu- und Außenluft eingetragen. Die Diagramme inkl. der weiteren Informationen sind identisch aufgebaut wie die vom Bambados.

In Halle 1+2 (Abb. 61) wurden als Ausgangswerte (Nachmittag) Konzentrationen zwischen 60 und 74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ festgestellt; im Umgang geringfügig niedriger (55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). In den Nachstunden wurden mit 73 und 88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gering höhere Werte festgestellt, obwohl keine Nutzung vorlag. Allerdings war die Konzentration im Beckenwasser mit 20 anstelle 16 $\mu\text{g}/\text{l}$ auch etwas höher. Durch die dann erfolgte Reduktion des Umluftanteils hat sich automatisch aber unbeabsichtigt auch der Außenluftvolumenstrom verringert (Außenluftwechsel von 1,4 auf 0,9 h^{-1}). Am Folgenachmittag - nach der Absenkung der Luftmengen - wurden dreimal etwas höhere THM-Konzentrationen gemessen und ein niedrigerer (Mittelwert Wasseroberfläche 89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Umgang 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Es ist zu vermuten, dass die Reduktion des Umluftvolumenstromes zu einer weniger optimalen Durchmischung der Hallenluft geführt hat. So ist zu erklären, dass bei sonst vergleichbaren Randbedingungen (Personenzahl, Wassertemperatur und THM-Belastung des Beckenwassers) zwei Messwerte über der Wasseroberfläche merkbar ansteigen und einer absinkt. Zusätzlich führt der niedrigere Außenluftwechsel zu einer geringeren Abfuhr der Schadstoffe. In dieser Halle ist die Luftführung damit nicht optimal ausgelegt für eine Reduktion des Umluftanteils.

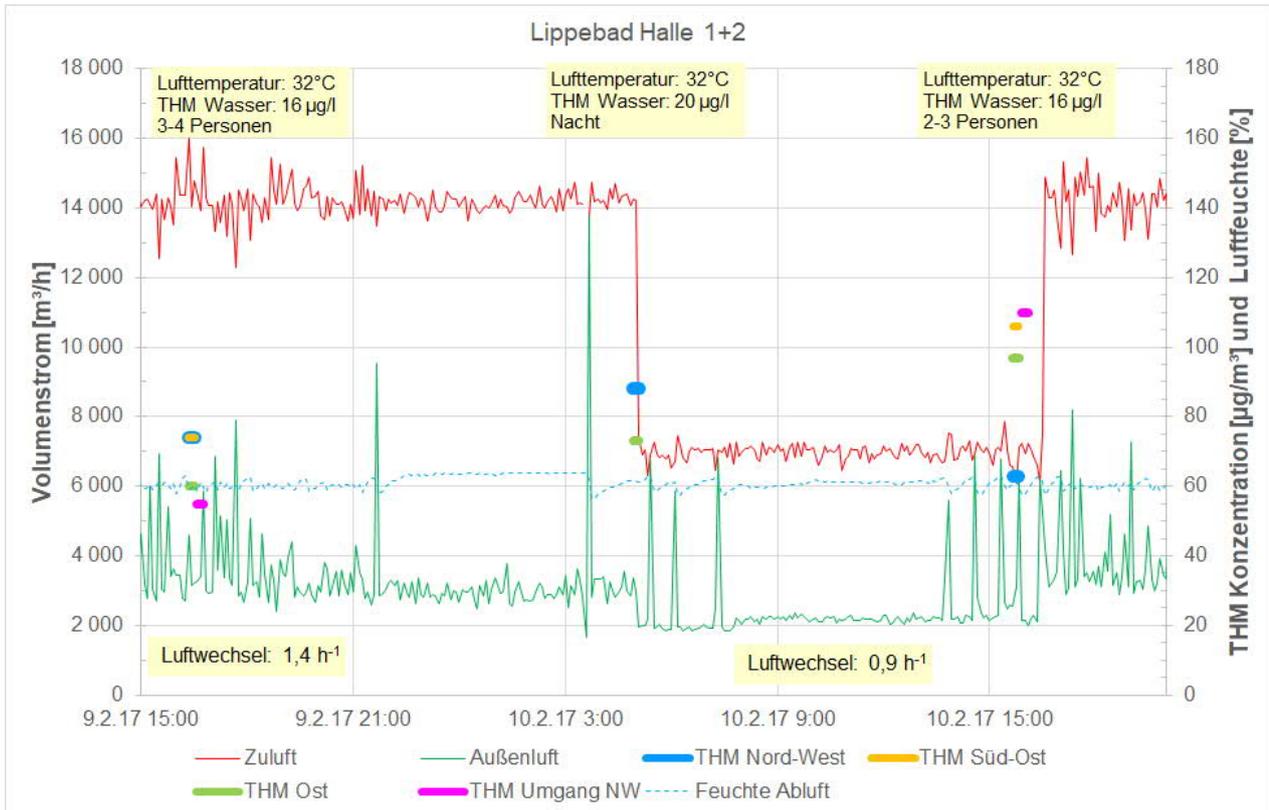


Abb. 61: THM Messwerte (Luft und Wasser), rel. Ablufffeuchte und Luftvolumenströme während des Messzeitraums der Halle 1+2 des Lippe-Bades.

Die Messwerte von Halle 3 in Abb. 62 zeigen ein ähnliches Verhalten der THM-Konzentrationen. Allerdings ist der Außenluftwechsel hier schon in den Nachtstunden von der Steuerung der Anlage reduziert worden, bevor die händische Absenkung des Umluftvolumenstroms am frühen Morgen eingestellt wurde. Kurz danach stieg der Außenluftwechsel wieder auf den Ausgangswert an. Die THM-Konzentration des Beckenwassers ist mit Werten um 30 µg/l deutlich höher als in Becken 1+2. Da das Beckenwasser die Quelle der THM-Konzentration der Luft darstellt, sind hier höhere Werte zu erwarten: Die beiden Messungen über der Wasseroberfläche steigen von den Ausgangswerten 62 bzw. 69 µg/m³ auf 91 bzw. 140 µg/m³ am Folgenachmittag an. Auch hier ist eine deutliche Spreizung zwischen den beiden letzten Werten festzustellen, was wieder auf eine reduzierte Durchmischung hinweisen könnte.

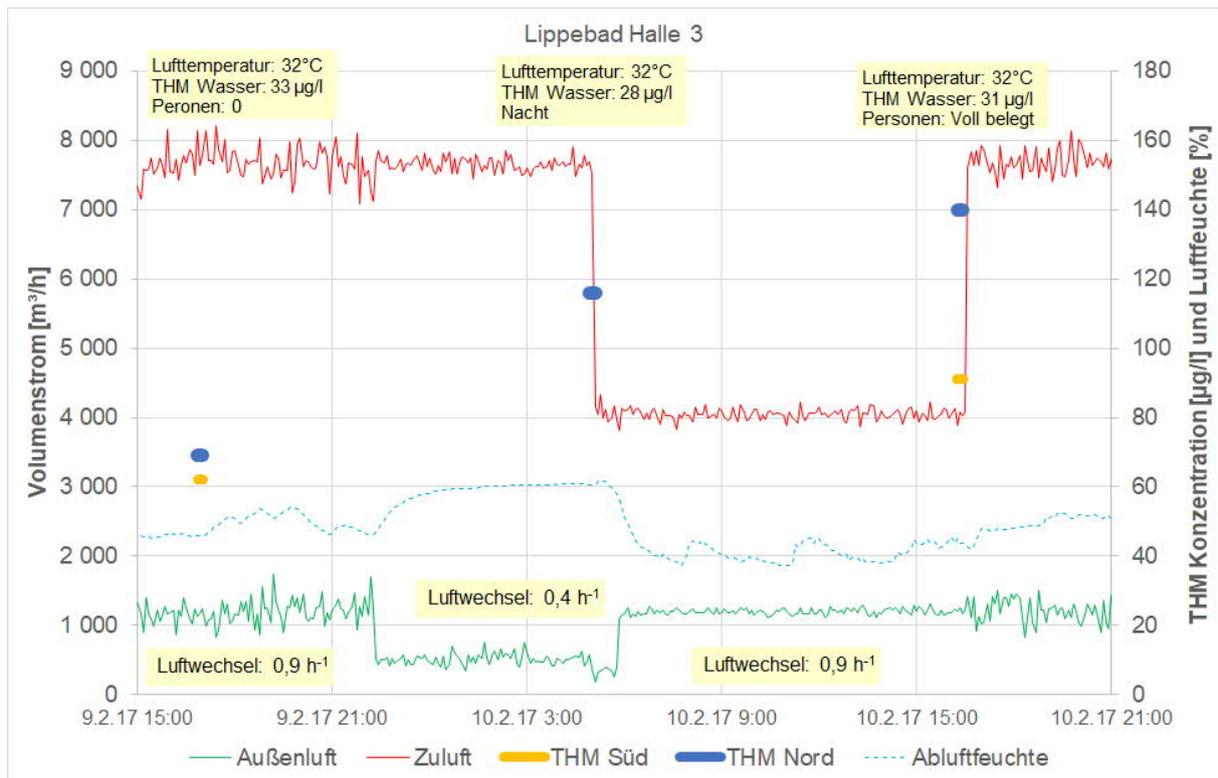


Abb. 62: THM Messwerte (Luft und Wasser), rel. Abluftfeuchte und Luftvolumenströme während des Messzeitraums der Halle 3 des Lippe-Bades.

Halle 4 steht im Luftverbund mit Halle 5, wobei beide Hallen über eigene Lüftungsgeräte verfügen. Die THM-Messwerte in Halle 4 (Abb. 63) zeigen ebenso einen signifikanten Anstieg nach der Absenkung des Umluftanteils. Auch in dieser Halle wurde der Außenluftwechsel in der Nacht automatisch reduziert (halbiert). Die Messwerte über der Wasseroberfläche steigen von 61 bzw. 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ auf 105 bzw. 99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Im Umgang fällt der Anstieg moderater aus (50 auf 84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

In Halle 5 (Abb. 64) zeigt sich ein sehr ähnliches Ergebnis mit einem Anstieg von Konzentrationen über der Wasseroberfläche um 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ auf die Werte 79 und 124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ am zweiten Nachmittag. Auch hier fällt der Anstieg über dem Umgang geringer aus (56 auf 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

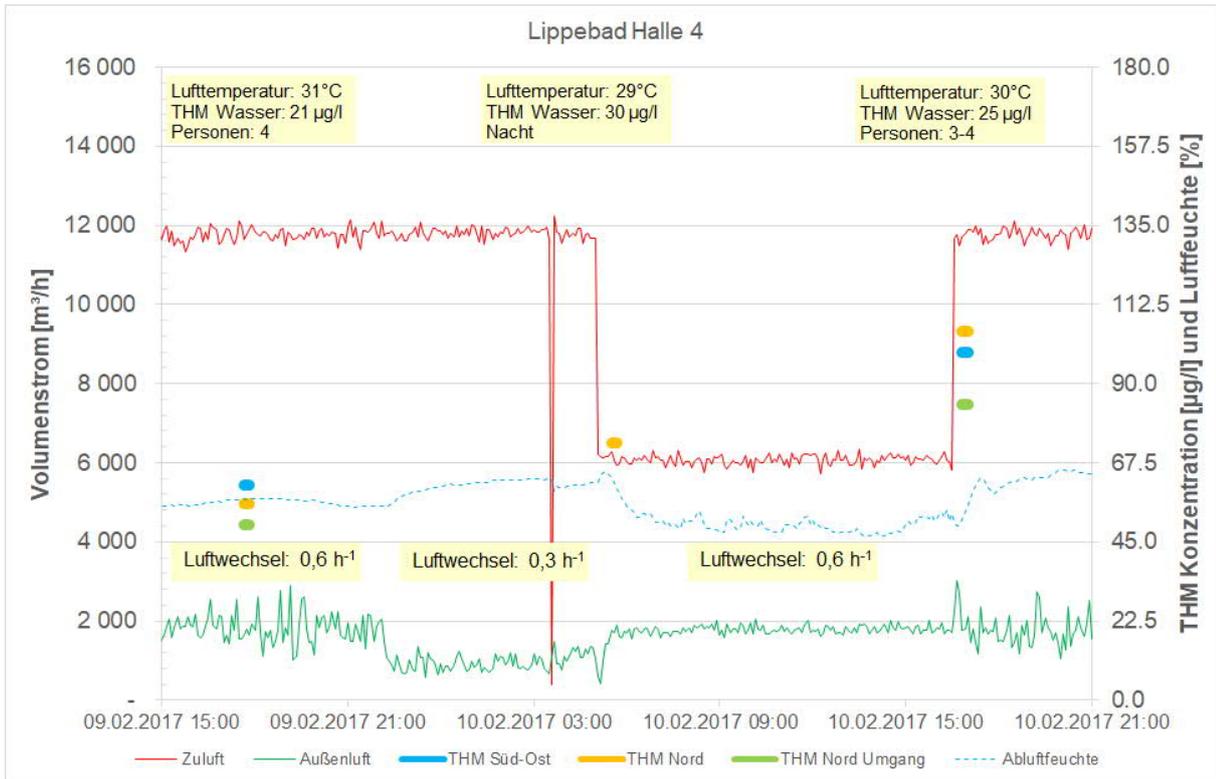


Abb. 63: THM Messwerte (Luft und Wasser), rel. Ablufffeuchte und Luftvolumenströme während des Messzeitraums der Halle 4 des Lippe-Bades.

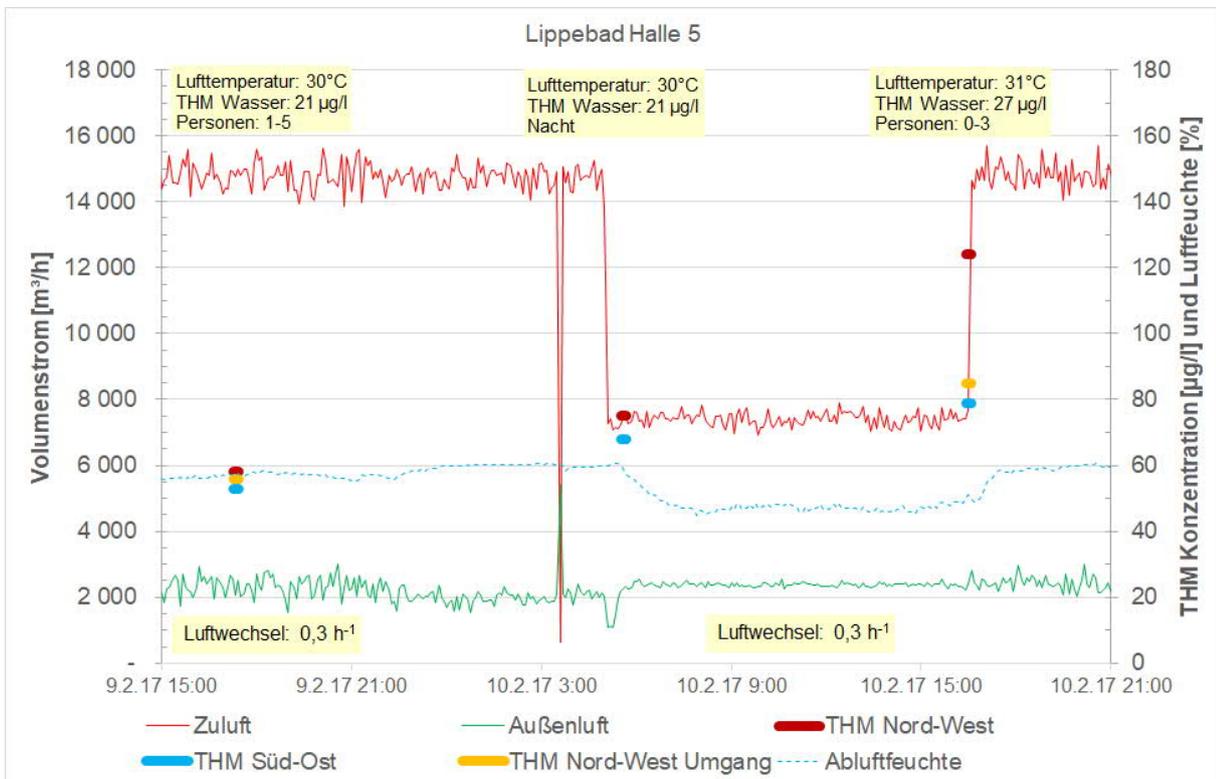


Abb. 64: THM Messwerte (Luft und Wasser), rel. Ablufffeuchte und Luftvolumenströme während des Messzeitraums der Halle 5 des Lippe-Bades.

Tab. 9: Messergebnisse der THM-Messungen vom 09. und 10.02.2017 im Lippe-Bad. Die Messwerte wurden auf Werte ohne Nachkommastelle gerundet. Legende: "o. Umluft" = ohne Umluft

THM-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	09.02.2017 Nachmittag	10.02.2017 Früher Morgen	10.02.2017 Nachmittag
Halle 1+2			
<i>Beckenwasser</i>	16 $\mu\text{g}/\text{l}$	20 $\mu\text{g}/\text{l}$	16 $\mu\text{g}/\text{l}$
<i>Luftwechselrate h-1</i>	1,4	0,9	0,9
Nord-West	74	88	63
Süd-Ost	74	116	106
Ost	60	73	97
Umgang Nord-West	55	-	110
Halle 3			
<i>Beckenwasser</i>	33 $\mu\text{g}/\text{l}$	28 $\mu\text{g}/\text{l}$	31 $\mu\text{g}/\text{l}$
<i>Luftwechselrate h-1</i>	0,9	0,4	0,9
Süd	62	-	91
Nord	69	116	140
Halle 4			
<i>Beckenwasser</i>	21 $\mu\text{g}/\text{l}$	30	25 $\mu\text{g}/\text{l}$
<i>Luftwechselrate h-1</i>	0,6	0,3	0,6
Süd-Ost	61	-	99
Nord	56	73	105
Umgang Nord	50	-	84
Halle 5			
<i>Beckenwasser</i>	21 $\mu\text{g}/\text{l}$	21 $\mu\text{g}/\text{l}$	27 $\mu\text{g}/\text{l}$
<i>Luftwechselrate h-1</i>	0,3	0,3	0,3
Nord-West	58	75	124
Süd-Ost	53	68	79
Umgang Nord-W.	56	-	85

Da sich die Analytik der vorausgehenden THM-Untersuchung der Hallenluft im Lippe-Bad von der für diese Messkampagne gewählten unterscheidet, ist ein direkter Vergleich mit den früheren Werten aus [Peper/Grove-Smith 2013] nicht möglich. Insgesamt zeigt sich für das Lippe-Bad, dass die THM-Konzentrationen höher liegen als die im Bambados. Die Konzentrationen im Beckenwasser als Quelle der Luftbelastung liegen bereits höher als im Bambados (Mittelwerte aller Wassermessungen 14 gegenüber 24 $\mu\text{g/l}$). Als weitere Ursache der höheren Konzentrationen in der Hallenluft wird die Art der Hallendurchströmung (Anordnung Zu- und Abluft) vermutet (vgl. oben). Die Absenkung der Umluftvolumenströme führt in den Hallen zu einer Erhöhung der THM-Konzentrationen. Insgesamt sind die 9 Messwerte im Lippe-Bad ohne die Umluftreduktion (Gesamtmittelwert über Wasseroberfläche: 63 $\mu\text{g/m}^3$) gegenüber den aus der Literatur zitierten Werten (siehe oben im Abschnitt THM-Messungen Bambados) als vergleichbar zu beurteilen. Die festgestellten Spitzenwerte nach der Umluftreduktion (maximal 140 $\mu\text{g/m}^3$) liegen deutlich unter den in der Literatur beschriebenen Spitzenwert-Konzentrationen (453 bzw. 219 $\mu\text{g/m}^3$) [Jentsch/Matthiessen 1998] [GSF 1997]. Der Mittelwert der 9 über der Wasseroberfläche gemessenen Werte nach der Umluftreduktion beträgt genau 100 $\mu\text{g/m}^3$ und ist im Vergleich mit der Literatur als nicht optimal zu bezeichnen. Da die Luftführung im Lippe-Bad nicht ohne großen Aufwand verändert werden kann, ist eine Umluftreduktion nur moderat und in den Nachtstunden zu empfehlen.

6.5.4 THM-Messungen Familienbad Niederheid

In einem weiteren Bad (Landeshauptstadt Düsseldorf; Familienbad Niederheid; Betreiber: Bädergesellschaft Düsseldorf mbH) wurden im Zuge der vergleichbaren Untersuchung THM-Messungen durchgeführt. Bei dem Bad handelt es sich um ein saniertes Hallenbad. Obwohl keine Passivhaus-Gebäudehülle vorhanden ist, wurde es auf Grund seiner optimierten Luftführung ausgewählt. Das Ingenieurbüro Inco aus Aachen realisierte dort eine Schichtlüftung (Erklärung siehe 5.1 Leitfaden Lüftung in der Schwimmhalle).

Das Hallenbad verfügt über eine zentrale, längliche Schwimmhalle, welche mit einem 25 m - Becken, einem Lehrbecken und einem Planschbecken ausgestattet ist. An einer Längsseite schließen die Duschen und Nebenräume an. Die andere Längsseite ist verglast. Die Zuluft kann wahlweise zu 80 % von unten an der Fassade (alte Kanalführung) und zu 20 % an der Decke oder in umgekehrtem Verhältnis eingebracht werden. Der Zuluft-Auslass an der Decke befindet sich an der Stirnseite der Halle oberhalb der abgehängten Decke. Die Luft wird impulsarm eingebracht. Sie strömt einfach aus einem großen Kanal in die Halle und verteilt sich oberhalb der abgehängten Decke. Von dort bewegt sie sich durch größere Spalte nach unten. Ein Drittel der Abluft strömt über in die Duschen. Zwei Drittel der Abluft werden in der Halle an der gleichen Stirnseite wie die Zuluft-Einbringung abgesaugt. Das zentrale Abluftgitter der Halle befindet sich auf Bodenhöhe und hat die Abmessung von 2 m x 2 m. Durch die bodennahe Absaugung der Abluft stellt sich eine Feuchteschichtung ein. Unmittelbar über der Wasseroberfläche ist die relative Feuchte sehr hoch, aber bereits in 50 cm Höhe ist sie wesentlich geringer (Differenz um ca. 10 %-Punkte oder mehr). Während der Probenahme konnte mit Feuchtigkeitssensoren diese Schichtung eindeutig bestätigt werden. An einer Stelle wurde diese Schichtung durch einen kalten Luftzug aus einem Lager

(offene Tür) gestört. Dort konnte keine Feuchtedifferenz gemessen werden. Auf kältere einströmende Luft reagiert die Schichtung damit nachweislich empfindlich.

Der Auslegungsvolumenstrom für diese Halle, berechnet nach der [VDI 2089] beträgt 39.000 m³/h. Allerdings wird das Bad mit einem reduzierten Umluftanteil betrieben. Während der Probenahmen (21. und 22.2.2017) wurden durchschnittlich etwa nur 19.000 m³/h gefördert. Das entspricht einer Volumenstromreduktion von ca. 50 % gegenüber der [VDI 2089]. Leider wird der Außenluftvolumenstrom auf der Gebäudeleittechnik nicht aufgezeichnet. So lässt sich der Um- bzw. Außenluftanteil nicht bestimmen. Die THM-Messungen wurden zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt:

- während des Badbetriebes mit Zuluft zu 80 % an der Fassade (20 % von der Decke)
- früh morgens vor Badebetrieb mit Zuluft zu 80 % an der Decke (20 % Fassade) und um 0,5 bis 1 K erhöhter Hallentemperatur
- während des Badbetriebes mit Zuluft zu 80 % an der Decke (20 % Fassade) und um 0,5 bis 1 K erhöhter Hallentemperatur.



Abb. 65: Luftprobenahme mit Ansaugpumpen im Bad Niederheid in Düsseldorf vor dem zentralen Absauggitter (links) und über der Wasseroberfläche und im Umgang (rechts).

Für die THM-Messung wurden am 21. und 22.02.2017 insgesamt 18 Luftproben und sechs Wasserproben genommen. Die Laborauswertung der Proben [CLG 2017-C], welche in 20 cm über der Wasseroberfläche genommen wurden, zeigt THM-Werte zwischen 8 und 31 µg/m³ und im Durchschnitt von 21 µg/m³ (12 Messwerte). Um die Belastung des Personals beurteilen zu können, wurden zusätzliche vier Proben im Umgang in 1,5 m Höhe genommen. Dort lagen die Ergebnisse noch deutlich niedriger (5 - 10 µg/m³; 4 Messwerte). Am Abluftgitter in 1,5 m Höhe wurden Proben der Mischluft der gesamten Hallen gezogen: 16 µg/m³ und 20 µg/m³. Zu allen drei Betriebszuständen wurde parallel die THM-Belastung im Wasser gemessen. Diese Werte liegen zwischen 6 und 9 µg/m³ (6 Messwerte).

Die drei unterschiedlichen Betriebsweisen der Luftzuführung zeigen keinen Einfluss auf die THM-Messwerte. Frühere Versuche von Ingenieurbüro Inco in diesem Bad haben gezeigt, dass bei Nicht-Passivhäusern (hohe Heizlast) die Zuluft unter der Decke nicht zu empfehlen ist, da dies zu hoher Strahlungsasymmetrie führt.

Tab. 10: Messergebnisse der THM-Messungen vom 21. und 22.02.2017 im Sportbad Niederheid (Düsseldorf). Die Messwerte wurden auf Werte ohne Nachkommastelle gerundet.

THM-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	21.02.2017 Nachmittag	22.02.2017 Früher Morgen	22.02.2017 Mittag
Sportbecken			
<i>Beckenwasser</i>	<i>7 $\mu\text{g}/\text{l}$</i>	<i>9 $\mu\text{g}/\text{l}$</i>	<i>7 $\mu\text{g}/\text{l}$</i>
Innenseite	27	31	21
Fassadenseite	11	24	8
Umgang Innens.	9	--	10
Umgang Fassade	9	--	5
Abluftgitter	16	--	20
Kinderbecken			
<i>Beckenwasser</i>	<i>7 $\mu\text{g}/\text{l}$</i>	<i>8 $\mu\text{g}/\text{l}$</i>	<i>6 $\mu\text{g}/\text{l}$</i>
Innenseite	24	28	27
Fassadenseite	28	24	24

Die geringen THM-Konzentrationen in der Luft (8 - 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sind an erster Stelle Folge der geringen THM-Konzentrationen im Beckenwasser. Die Messwerte in der Luft zeigen eindeutig, dass das Prinzip der "Schichtlüftung" eine gute Hallendurchströmung selbst bei reduziertem Volumenstrom bewirkt. Die THM-Belastung im Umgang und damit die Belastung für das Badpersonal sind nochmal eindeutig reduziert. Die Messung zeigt, dass die "Schichtlüftung" auch in Bezug auf die Schadstoffabfuhr für Hallenbäder zu empfehlen ist. Diese Ergebnisse werden auch durch die durchgeführten Strömungssimulationen (siehe oben Abschnitt 6.4) bestätigt. Im Vergleich mit den besten aufgeführten Literaturwerten (8 - 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) aus [Junek et al. 2017] können die Messwerte vom Sportbad Niederheid sehr gut mithalten.

6.6 Programmierung Lüftungsgerät Schwimmhalle

In Deutschland wird die Regelung von Lüftungsgeräten für Schwimmhallen oft von den Lüftungsfirmen standardmäßig mit angeboten. Alternativ erfolgt die Regelung über die GLT. Normalerweise folgt die Regelung der [VDI 2089], d.h. der Gesamtvolumenstrom wird konstant gehalten und nur der Außenluftanteil variiert nach Entfeuchtungsbedarf. Das Passivhauskonzept sieht hier zur Reduzierung der Stromkosten eine Regelung ohne Umluft vor, d.h. der Gesamtvolumenstrom variiert (siehe auch Kap. 5.1). Um dies umzusetzen, mussten bisher für jedes Projekt genaue Angaben zur Regelung erarbeitet werden. Ziel dieses Forschungsprojektes war es, Hilfestellung für zukünftige Projekte zu geben. Das Passivhaus Institut hat zu diesem Zweck eine exemplarische Lüftungsregelung ausgearbeitet. Durch die Zusammenarbeit mit dem Lüftungshersteller FlaktGroup Deutschland GmbH konnte diese Regelung 2017 direkt in einem Programmcode umgesetzt werden. Bei den Schwimmbadlüftungsgeräten (CAIRpool) des Herstellers kann nun zwischen einer Lüftung nach VDI und einer Passivhauslüftung gewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Passivhauslüftung nur bei entsprechend geeigneter Passivhausgebäudehülle gewählt werden sollte. Durch diese Zusammenarbeit konnte eine Vorarbeit geleistet werden, die ansonsten bei jedem Projekt zwischen TGA-Planer und Programmierer der Lüftungsregelung erfolgen muss.

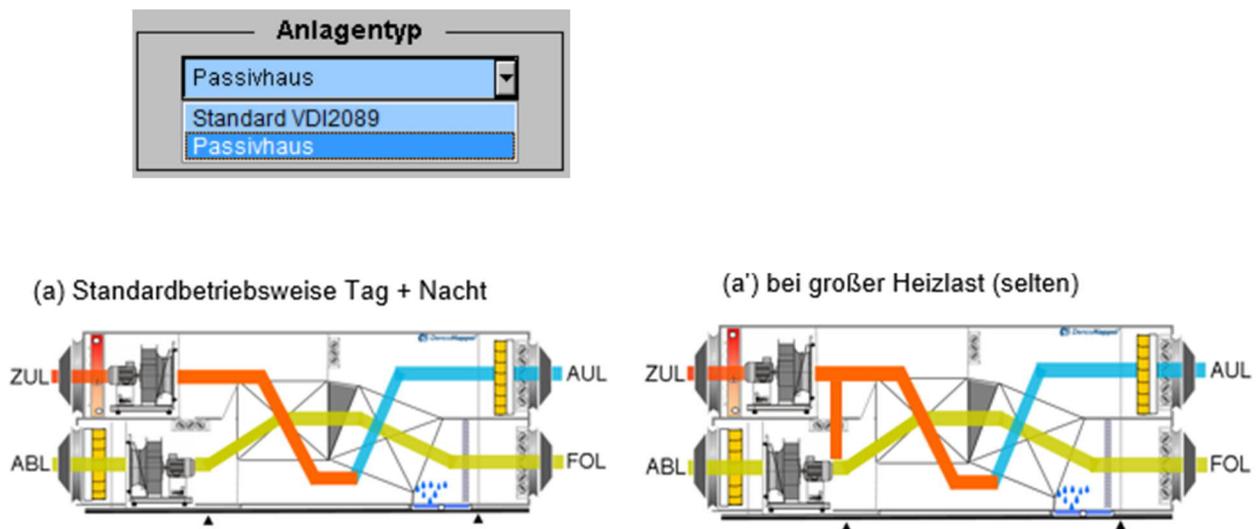


Abb. 66: oben: Auswahlmnü VDI-Regelung oder Passivhauslüftung; unten links: Funktionsschema bei reinem Außenluftbetrieb (Standardbetrieb bei PH-Lüftung); unten rechts: Außenluftbetrieb mit zusätzlicher Funktion "Umluft Heizen" (im PH gar nicht oder selten notwendig); Grafiken © FlaktGroup Deutschland GmbH

Die genaue Beschreibung der Regelung ist in den folgenden Tabellen zu finden. Sie ist ein Beispiel für eine Passivhauslüftung (ohne Umluft), enthält aber auch Punkte wie Frischluftspülung und Kühlung, die nicht Teil des Passivhauskonzeptes sind. Alternativ zum intermittierenden Ruhebetrieb, bei dem sich das Gerät in regelmäßigen Zeitintervallen einschaltet, um die Feuchte und Temperatur mit Hilfe der Abluftsensoren zu überwachen, kann die Überwachung auch kontinuierlich vorgenommen werden, indem zusätzliche Feuchtesensoren in der Halle installiert werden. Damit wird das regelmäßige Anschalten zu Messzwecken verhindert.

Deshalb ist die Beschreibung der Beispielregelung auch als Exceldatei zur weiteren Projekt- und Gerätespezifischen Anpassung auf Anfrage beim Passivhaus Institut erhältlich.

Tab. 11 listet alle Sollwerte auf und unterscheidet dabei, wo diese eingestellt werden können. In Tab. 12 sind die verschiedenen Regelungen der Lüftung beschrieben. Dabei nutzt man sogenannte Regler (Ein Regler ist eine programminterne Größe; Beispiel: Wenn die Formeln im Programm aus den Messwerten errechnen, dass ein Entfeuchtungsbedarf besteht, wird der Regler Entfeuchten aktiv, was wiederum zu weiteren Aktionen in der Regelung führt z.B. Steuerung des Ventilators). Möchte man nachvollziehen, warum welche Aktionen im Lüftungsgerät vorgenommen wurden, ist es sehr hilfreich, den jeweiligen Zustand der Regler einsehen zu können.

Tab. 13 listet den Datenaustausch zwischen Lüftungsgerät und GLT auf. Die Datenpunkte sind nach Ein- bzw. Ausgang auf der GLT sortiert.

Für zukünftige Passivhaus Hallenbäder können Planer und Bauherren entweder direkt auf das Programm von FlaktGroup zurückgreifen oder Lüftungshersteller bzw. GLT-Firmen beauftragen, die wiederum die hier aufgeführten Beschreibungen für eine Programmierung zu Grunde legen können. Wird die Lüftungsregelung in der GLT programmiert, werden sich in Konsequenz die Schnittstellen der Gewerke verschieben.

Tab. 11: Beispiel einer Regelungsbeschreibung für eine Schwimmhallenlüftung (Exceldatei auf Anfrage beim Passivhaus Institut erhältlich); Teil 1: Definitionen Sollwerte

(Erklärungen: die "Frischlüftungspülung" ist für Bäder gedacht, die im Sommer dauerhaft Fenster öffnen möchten; die "Schiebung zu rF soll Tag" bewirkt, dass bei wärmeren Außentemperaturen nachts eine höhere Hallenfeuchte zugelassen wird.)

Lüftungsregelung Schwimmhalle

Die Passivhaus Lüftung ist nur in Gebäuden mit geeigneter Passivhausgebäudehülle möglich.

Sollwerte auf GLT einstellbar:

Hinweise zu den Sollwerten

Tsoll Tag	32°C	auf diese Temperatur wird die Hallenluft geheizt
Tsoll Nacht	31°C	
Tmax	4 K über Tsoll Tag	auf diese Temperatur wird die Hallenluft gekühlt (soweit möglich); Eingabe begrenzt auf $\geq 2K$
rFsoll Tag	58%	auf diese Feuchte der Hallenluft wird entfeuchtet
rFsoll Nacht max	61%	
Volumenstrom min.	5.000 m ³ /h	Außenluftvolumenstrom nach VDI 2089 entweder 15% oder 30% des Auslegungsvolumenstroms einstellen
Zeitprogramm	Mo 6-22 Uhr Badebetrieb, 22-6 Uhr Ruhebetrieb...	Vorspülbetrieb einplanen
Intermittierender Ruhebetrieb	0 (nicht aktiv) oder Stundenzahl z.B. 2h	in diesem Abstand schaltet sich das Gerät nachts zur Überwachung der Feuchte und Temperatur ein

optional:

Vol.strom Soll Frischluft	10.000 m ³ /h	Volumenstrom sollte passend zum möglichen Volumenstrom durch RWAs/Fenster, die für die Frischlüftungspülung geöffnet werden, gewählt werden.
Betrieb Fortluft-WP	automatisch	automatisch oder aus

Sollwert im Programm des Lüftungsgerätes:

rF soll Nacht	Schiebung zu rF soll Tag: 30%Punkte (beginnend bei 0°C bis 15°C Taußen), aber maximal rFsoll Nacht max	
Frischlüftungspülung Modus (ZU/AB)	ZU	je nach Position der ZU-/AB-Luftventile und der Fenster den reinen Zu- oder Abluftbetrieb des Lüftungsgerätes wählen

Legende Messwerte:

Temp	Temperatur in Halle	Ablufsensor wird verwendet, evtl. Nachrüstmöglichkeit: Sensoren im Raum für die Regelung nachts verwenden
rF	Feuchte in der Halle	Ablufsensor wird verwendet, evtl. Nachrüstmöglichkeit: Sensoren im Raum für die Regelung nachts verwenden
Taußen	Lufttemperatur außen	

Tab. 12: Beispiel einer Regelungsbeschreibung für eine Schwimmhallenlüftung (Exceldatei auf Anfrage beim Passivhaus Institut erhältlich); Teil 2: Beschreibung der Regelung

Lüftungsregelung Schwimmhalle			
Die Passivhaus Lüftung ist nur in Gebäuden mit geeigneter Passivhausgebäudehülle möglich.			
von GLT	Regelung Lüftungsgerät	an GLT	Regelung GLT
	Betrieb Lüftungsgerät		
Zeitprogramm	Badebetrieb: Lüftungsgerät immer an, nur bei Störungen aus (z.B. Motorstörung)		
Zeitprogramm, rF soll Nacht, Tsoll Nacht, Intervallschaltung Nacht	Ruhebetrieb: Lüftungsgerät ausgeschaltet, aber Feuchteüberwachung: - einschalten nach Intervallschaltung Nacht - abschalten, wenn rF > rFsoll Nacht - 2 % und Temp > Tsoll Nacht + 1K - Mindestlaufzeit 20 Min		
rF soll Tag, rF soll Nacht	Regler Entfeuchten wenn rF > rFsoll		
Volumenstrom min.	Außenluft-Volumenstrom: - variabler Volumenstrom nach Entfeuchtungsbedarf, keine Umluft - Minimalvolumenstrom laut GLT (Volumenstrom min.) - Volumenstrom Fo/ Volumenstrom AU: Balance oder leichter Unterdruck im Gebäude	Volumenstromhöhe	ggf. Regelung Klappen Zuluft für konst. Druck
	Klappe Umluft Entfeuchten/Heizen geschlossen		
	Klappe Au, Fo: offen, so daß kein unnötiger Widerstand		
	Filtertrocknung: In der Regel nicht notwendig, da nur kurze Stillstandszeiten		
Tsoll Tag, Tsoll Nacht	Regler Heizen wenn Temp < Tsoll		
	Heizregister: Heizleistung in Abhängigkeit von Tsoll		
	Klappe Umluft Heizen: wenn Heizlast mit momentanem Außenluft-Volumenstrom nicht gedeckt werden kann, Umluftanteil stetig hochfahren		
	Regler Frostschutz		
	Frostschutz für Heizregister: wenn T Zuluft < 10°C wird geheizt		
	Frostschutz für Rekuperator: T Fortluft < -5°C, stetig AU-Luft über Bypass		
Tmax	Regler Kühlen wenn Temp > Tmax		
	Meldung an GLT: Empfehlung Sonnenschutz aktivieren	Empfehlung Sonnenschutz	
	Bypass auf, wenn Temp > T außen, Bypass zu, wenn Temp < Taußen		
	Volumenstrom: Wenn Bypassklappe 60 Min. vollständig geöffnet, Temp > T außen + 4 K und Temp > T max, dann Volumenstrom auf Nennvolumenstrom hochfahren		
GLT gibt Freigabe zu Frischluftspülung, wenn Fenster/RWAs geöffnet	Regler Frischluftspülung wenn GLT Freigabe zur Frischluftspülung		
Vol.strom Soll Frischluft, Frischluftspülung Modus	Wenn Temp > T soll + 2K und T außen > 25° entweder nur Zuluft- oder nur Abluftventilator an, auf Vol.strom Soll Frischluft		
Betrieb WP	Wärmepumpe (in der Fortluft) - Grundvoraussetzung: Volumenstrom > 20% (abhängig von WP Größe) - wenn Heizanforderung Luft - wenn Kühlanforderung (falls vollumschaltbare WP)		
	Autokalibrierung Druckdosen - einmal wöchentlich oder einmal täglich, wenn nötig		
	Prioritäten der Regler: - Regler Kühlen sperrt Regler Heizen - Frostschutz hat immer Vorrang - Frischluftspülung sperrt Regler Entfeuchten und Regler Heizen		

Tab. 13: Beispiel einer Regelungsbeschreibung für eine Schwimmhallenlüftung (Exceldatei auf Anfrage beim Passivhaus Institut erhältlich); Teil 3: Datenaustausch zwischen GLT und Lüftungsgerät

Bezeichnung	Einheit	Lüftungs- gerät Ausgang	Lüftungs- gerät Eingang
T Abluft	°C	X	
rel. Feuchte Abluft	%	X	
T Zuluft	°C	X	
T Fortluft	°C	X	
T Außenluft	°C	X	
Betrieb Lüftungsgerät	Ruhebetrieb, Badebetrieb, Automatik, aus	X	
Betrieb Wärmepumpe		X	
Regler Entfeuchten		X	
Regler Heizen		X	
Regler Kühlen		X	
Regler Frostschutz		X	
Regler Frischluftspülung		X	
Empfehlung Sonnenschutz	0/1	X	
Volumenstrom Zuluft	m³/h	X	
Volumenstrom Abluft	m³/h	X	
Volumenstrom Außenluft	m³/h	X	
rF soll Tag	% r.h.		X
rF soll Nacht	% r.h.		X
Tsoll Tag	°C		X
Tsoll Nacht	°C		X
Tmax	°C		X
Zeitprogramm			X
Volumenstrom min.	m³/h		X
Vol.strom Soll Frischluft	m³/h		X

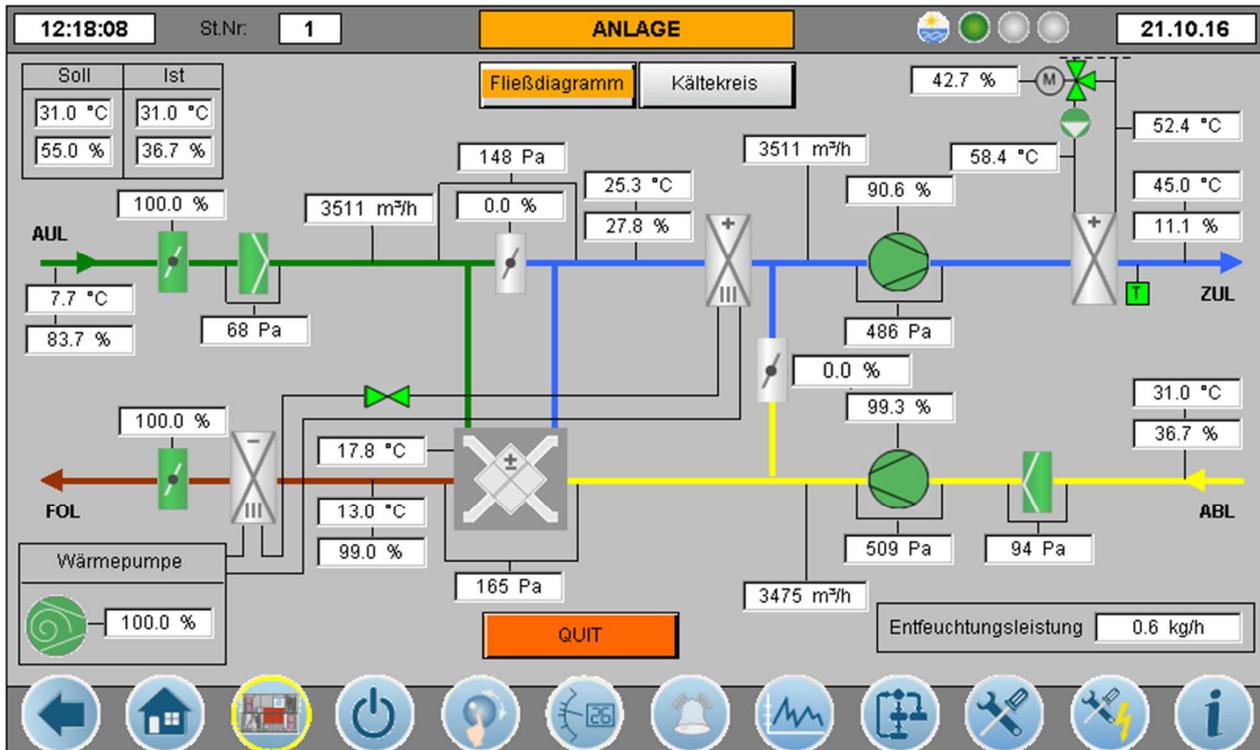


Abb. 67: Anlagenschema auf dem Display des Lüftungsgerätes CAIRpool (reiner Außenluftbetrieb), Grafik © FlaktGroup Deutschland GmbH

7 Schwimmbadtechnik: Leitfaden

Ein Großteil des Energieverbrauchs in Schwimmbädern wird für die Bereitstellung des warmen hygienischen Beckenwassers benötigt. Zum einen fällt Heizbedarf zur Erwärmung des kalten Wassers auf die Beckentemperaturen an (siehe Kapitel 8.5) und zum anderen wird ein nicht unerheblicher Stromeinsatz zur Reinigung und Beförderung des Beckenwassers benötigt (Umwälzung, sowie Betrieb der Attraktionen) (siehe Kapitel 8.1). Durch eine durchdachte Planung der Schwimmbadtechnik inkl. Komponentenauswahl und Betriebsweise kann der Energiebedarf erheblich gesenkt werden. Aufgrund der im Allgemeinen höheren Temperaturen und Belastung (30-32°C & 2,7 m²/P) bei Nichtschwimmer- und Freizeitbecken gegenüber Schwimmerbecken (28°C & 4,5 m²/P), ist dort das Einsparpotential höher und auf eine effiziente Betriebsweise zu achten.

Es gibt zahlreiche unterschiedliche Ansätze zur Badewasseraufbereitung mit unterschiedlichen Filtersystemen. Die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Anlagen sind nicht Bestandteil dieses Berichts und die Auswahl sollte für jedes Bad entsprechend der Randbedingungen und im Hinblick auf Energieeffizienz erfolgen.

Beim Strombedarf der Wasseraufbereitungsanlage stehen die Pumpen zur Beckenwasserumwälzung im Vordergrund. Insbesondere durch die Pumpenauswahl, eine bedarfsgeregelte Betriebsweise, sowie eine Auslegung des Rohrleitungsnetzes mit reduzierten Druckverlusten, kann der Stromverbrauch langfristig reduziert werden. Dies spart nicht nur Betriebskosten sondern mindert durch geringere Abwärme auch das Überhitzungsrisiko in Technikräumen. Der Energiebedarf zur Beheizung des Beckenwassers kann z.B. mit Systemen zur Wärmerückgewinnung und/oder Abwasseraufbereitung effektiv reduziert werden. Zudem sind Maßnahmen zur Reduktion der Verdunstung förderlich, wie z.B. eine erhöhte Hallenluftfeuchte oder ein bedarfsgeregelter Betrieb der Wasserattraktionen.

7.1 Beckenwasserumwälzung

Die Umwälzpumpen sind ganzjährig in Betrieb und haben vergleichsweise hohe Leistungen. Durch diese langen Laufzeiten macht sich selbst eine kleine Verbesserung energetisch und kostentechnisch bemerkbar. Bei sehr effizienten System kann ein Stromverbrauch von 25-40 W je m³/h Umwälzvolumenstrom durchaus erreicht werden (bezogen auf den Aufbereitungs-Volumenstrom bei Nennbelastung nach DIN 19643 je nach Beckentyp und Belastbarkeitsfaktor $k = 0,5 \text{ m}^{-3}$). Die Herleitung ist in Kapitel 8.1 beschrieben. Bezogen auf die Beckenfläche entspricht dies bei Sportbecken ca. 10-17 W/m² und bei Nichtschwimmer- und Variobecken ca. 17-29 W/m². Im Folgenden werden einige konkrete Aspekte aufgeführt, die zur Steigerung der Energieeffizienz in diesem Bereich beitragen.

Rohrleitungsnetz:

Die Zusammenstellung des Rohrleitungsnetzes bestimmt die von der Pumpe zu bewältigende Förderhöhe. Je niedriger die Druckverluste, desto weniger Energie wird benötigt. Diese Planungsaufgabe ist Grundvoraussetzung für eine effiziente Betriebsweise. Als Richtlinie sollten 5-10 mWS (bei mittlerer Filterverschmutzung) für eine effiziente Lösung angestrebt werden (siehe Kapitel 8.1) - je niedriger desto besser. Technisch ist hier viel möglich und es gibt Projekte (Hallenbad Brilon, Freibad Hangeweiher) bei denen die Druckverluste im Betriebspunkt bis hin zu 3,5 mWS reduziert wurden [Kaluza 2018].

Folgende Maßnahmen tragen dazu bei, die Druckverluste zu reduzieren:

- Kompaktes Rohrnetz mit möglichst kurzen und direkten Leitungen
- Großzügige Dimensionierung der Rohrleitungsdurchmesser. Als Richtwert für die Auslegung wird 1-1,3 m/s als Geschwindigkeit für das Fördermedium empfohlen
- Druckverlustarme Formstücke (z.B. zwei 45° Hosenrohre anstelle von 90° T-Stücken, FW-Klappen (federkraft-schließend) anstelle von konventionellen Rückschlagklappen etc.)
- Erhöhung des Schwallwasserbehälters gegenüber Bodenniveau (reduziert die geodätische Höhendifferenz)
- Wahl der Beckenwassereinströmung
- Der Einsatz von Diffusoren nach den Pumpen (siehe z.B. [Kaluza 2014a])

Pumpenauswahl:

Ausschlaggebend für die Effizienz der Pumpe ist letztendlich der Wirkungsgrad des Gesamtsystems im tatsächlichen Betriebspunkt, d.h. die kombinierte Effizienz des Elektromotors, plus der Pumpenhydraulik, sowie der elektronischen Regelung. Für eine effiziente Lösung sollten Gesamtwirkungsgrade (Pumpe, Motor und FU) von über 70% angestrebt werden. Im Folgenden einige konkrete Handlungsempfehlungen und Tipps für die Pumpenauswahl:

- Prioritär ist auf eine hohe Effizienz des Elektromotors zu achten. Die international eingeführten IEC Effizienzklassen dienen hier als Hilfestellung. Effiziente Systeme sind meist Permanentmagnetmotoren bzw. Synchronmotoren gegenüber konventionellen Asynchronmotoren.
- Wichtig ist eine korrekte Abstimmung des Systems für die tatsächlichen Betriebspunkte, nicht nur auf die benötigte maximale Leistung. Voraussetzung hierfür ist eine genaue Berechnung und gutes Verständnis der Druckverluste im Betrieb. Hier gilt z.B. dass die Auswahl der Pumpe optimiert auf die durchschnittlichen Druckverluste über die Filter basiert wird, anstatt auf die Druckverluste bei maximaler Auslegung. Nur durch eine passende Pumpenauswahl kann ein hoher Wirkungsgrad in der Praxis erzielt werden. Zudem erhöht dies die Langlebigkeit der Pumpen und ermöglichte einen leiseren Betrieb.
- Der Einsatz von Frequenzumformern (FU) ist inzwischen Stand der Technik für einen effizienten Betrieb. Die höheren Investitionskosten rechnen sich i.d.R. durch die eingesparten Energie- und Wartungskosten über den Lebenszyklus der Pumpe. Durch die Drehzahlregelung der Pumpe mittels FU kann eine hohe Effizienz auch bei unterschiedlichen Betriebspunkten erreicht werden (z.B. Nachtabenkung oder bei verschiedenen Verschmutzungsgraden der

Filter). Zudem gewährleistet der Einsatz eines FU einen Puffer für einen effizienten Pumpenbetrieb, falls die Druckverluste der Anlage in der Praxis von den Planungswerten abweichen sollten.

- Die Materialwahl der Pumpe hat einen Einfluss auf deren Wirkungsgrad und insbesondere auf den Verschleiß. Durch den Einsatz von beschichteten Pumpen kann das Risiko von Korrosion vermindert werden.

Betriebsweise:

Es ist nicht zwingend nötig, das Beckenwasser durchgängig mit vollem Auslegungsvolumenstrom umzuwälzen. Außerhalb der Betriebszeiten oder bei wenigen Badegästen kann der Stromverbrauch durch Teillastbetrieb gesenkt werden. Zwingende Voraussetzung hierfür ist eine Gewährleistung der Wasserqualität. Die Regelung kann z.B. ganz einfach über eine Zeitschaltung für verschiedene Reduktions-Stufen erfolgen, so z.B. die niedrigste Teillast immer außerhalb der Betriebszeiten und eine mittlere Teillast zu bekannten Zeiten mit wenig Betrieb (z.B. keine Vereine oder Schulklassen). Das Einsparpotential ist insbesondere für Nichtschwimmerbecken hoch, bei denen der Nenn-Umwälzvolumenstrom nach DIN mit einer höheren Beckenbelegungsichte ausgelegt wird. Hier kann auch mit reduziertem Volumenstrom noch eine hohe Wechselrate des Beckenwassers (Umwälzung 1/h) erreicht werden.

- **Temporäre Volumenstromabsenkung.** Der Stromverbrauch sinkt proportional zur dritten Potenz des Reduktionsfaktors, d.h. bereits geringe Absenkungen sind sehr effektiv. Es ist in jedem Fall darauf zu achten, dass die Beckendurchströmung gewährleistet wird. Geringere Absenkungen des Volumenstroms über längere Zeiträume sind hinsichtlich der Gewährleistung der Wasserqualität vorteilhafter gegenüber temporären, starken Absenkungen, da hier die Durchströmung und Wasserwechselrate weniger beeinträchtigt werden.
- Bei einer sogenannten **Internumwälzung** wird der Volumenstrom unterhalb der Wasseroberfläche des Beckens entnommen, zirkuliert also ohne Überlaufrinne und den Schwallwasserbehälter. Durch entsprechend niedrigere Druckverluste sinkt auch der Strombedarf. Auch hierbei ist auf eine ausreichende Beckendurchströmung zu achten. Die Internumwälzung kann für den gesamten Volumenstrom oder nur für ein Teilvolumen realisiert werden.

7.2 Wasserattraktionen

Wasserattraktionen wie z.B. Rutschen, Massagedüsen, Wasserpilze o.ä. benötigen zusätzlichen Strom zum Betrieb der Pumpen. Zusätzlich entsteht durch den Betrieb eine erhöhte Verdunstung, mit einhergehenden Verdunstungswärmeverlusten und erhöhtem Lüftungsbedarf. Als wesentliche Energieeinsparmaßnahme für Attraktionen gilt es, auf eine gute Regelung zu achten d.h. ein Betrieb möglichst nur bei Bedarf. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten z.B. über manuelle Taster mit Zeitschaltuhr (automatische Ausschaltung nach einer voreingestellten Betriebszeit), über automatische Auslöser (z.B. Lichtschranke bei Rutschen) oder über Zeitschaltuhren (feste Zeiten oder intelligente Steuerung unter Berücksichtigung der Besucherzahlen).

7.3 Heizwärmebedarf Beckenwasser

Es ist zu erwarten, dass der Heizwärmebedarf für Beckenwasser bei effizienten Lösungsansätzen im Bereich von ca. 400-700 kWh/(m²_{WFA}) liegen (Herleitung siehe Kapitel 8.5). Allerdings gibt es hier viele Einflussfaktoren, die starke Abweichungen verursachen können und einen Vergleich ohne weitere Informationen erschweren (z.B. Wechselwirkung mit Effizienz der Schwimmbadtechnik).

Generell gilt: Je niedriger die Wassertemperatur, desto niedriger der Heizwärmebedarf. Die Temperatur sollte also entsprechend der vorgesehenen Nutzung und des Besucherkomforts möglichst niedrig gehalten werden. Zudem ist die benötigte Menge an täglichem Beckenfrischwasser ausschlaggebend für den Heizwärmebedarf. Als Richtlinie für das hygienische Mindestvolumen gelten mindestens 30 Liter pro Gast. Ausschlaggebend für den Wasserverbrauch sind in der Praxis oft auch die benötigten Wassermengen zur Filterspülung. Diese Menge hängt von der gewählten Filtertechnologie und den Randbedingungen im Einzelfall ab. Als Orientierungswert, im Falle von konventionellen Mehrschichtfilter, kann ein Filterspülwasserbedarf von ca. 0,6 m³/(m²Monat) für Schwimmerbecken bzw. 1 m³/(m²Monat) für Nichtschwimmerbecken heran gezogen werden (siehe 8.2). Bei der Planung sollte bei der Wahl der Schwimmbadtechnik darauf geachtet werden, dass die benötigten Frischwassermengen nicht unnötig hoch ausfallen, denn ein hoher Wasserverbrauch geht mit höherem Energiebedarf und auch mit höheren Betriebskosten einher.

Es gibt zwei mögliche Ansätze, um die Wärmeverluste an dieser Stelle zu reduzieren. Je größer die nötige Frischwassermenge, desto mehr fallen diese Maßnahmen ins Gewicht.

- Wärmerückgewinnung aus dem warmen Filterspülabwasser, entweder mit einem passiven Ansatz mittels Wärmetauscher oder als aktives System mit Wärmepumpe (deutlich kostenintensiver). Siehe Kapitel 9 für eine beispielhafte Kosten-Nutzen-Analyse.
- Aufbereitung des Filterspülabwassers zur Wiederverwendung im Bad z.B. als Brauchwasser (Toiletten) und/oder als Füllwasser für die Becken. Siehe auch Kapitel 8.3 für die Betriebserfahrungen im Lippe-Bad und Kapitel 9 für eine Kosten-Nutzen-Analyse unterschiedlicher Aufbereitungsanlagen.

Eine weitere effektive Maßnahme, den Heizwärmebedarf des Beckenwassers zu reduzieren, ist die Reduktion der Verdunstungswärmeverluste. Effektive Maßnahmen sind z.B.

- Erhöhung der Hallenluftfeuchte, durchgängig oder zumindest außerhalb der Öffnungszeiten (siehe auch Kapitel 5.1). Als Richtwert für die Planung wird eine Feuchte von um die 55-60% während der Betriebszeiten vorgeschlagen. Voraussetzung hierfür ist eine gut gedämmte Gebäudehülle und dadurch die Vermeidung von Kondensatbildung. Aus Bauschutzgründen sollte die relative Feuchte 64 % nicht überschreiten.
- Nachtabenkung des Wasserspiegels (keine Verdunstung über das Rinnensystem, sowie eine insgesamt reduzierte Verdunstungsfläche)
- Gestaltung des Wasserüberlaufs (Rinnensystem)
- Wenige Wasserattraktionen bzw. reduzierte Laufzeiten nur bei tatsächlicher Nutzung.

7.4 Weitere Einsparpotentiale Schwimmbadtechnik

Im Bereich der Schwimmbadtechnik gibt es weitere Ansatzpunkte zur Einsparung von Energie. Wichtig ist, dass das Gesamtsystem (Komponenten und Regelung) auf die Nutzung und die gewählte Filtertechnik abgestimmt ist. Es gilt, die Anzahl der Stromverbraucher zu reduzieren, möglichst effiziente Technik einzusetzen und durch die Betriebsweise den Heiz- und Strombedarf gering zu halten. Weitere Beispiele für weitere Einsparmaßnahmen sind:

- Reduzierte Wärmeverluste indem Überdachentlüftungen vermieden werden (z.B. Schwallwasserbehälter)
- Führung des Messwassers zur Überprüfung der Wasserqualität in den Umwälzkreislauf integrieren, d.h. ohne zusätzliche Pumpen. Außerdem eine Rückführung des Messwassers in den Beckenkreislauf anstatt dies als Abwasser abzuleiten. Dies reduziert sowohl den Strom- als auch den Wasserverbrauch.
- Regelmäßige Reinigung der Pumpenfilter für einen effizienten Betrieb der Pumpen.

8 Schwimmbadtechnik und Sanitär: Ausgewählte Fragestellungen

8.1 Stromverbrauch Umwälzpumpen

Der Stromverbrauch der Umwälzpumpen der Beckenkreisläufe fällt bei Hallenbädern in der Regel stark ins Gewicht. Laut Auswertung der Messungen im Lippe-Bad macht der Stromverbrauch allein dieser Pumpen 23% des Gesamtstromverbrauchs aus (siehe Kapitel 3.2 "Langzeit Stromverbrauch"). Durch Optimierung des Systems und der Pumpenauswahl kann dieser Stromverbrauch signifikant gesenkt werden; konkrete Empfehlungen sind in Kapitel 7 aufgeführt.

In Abb. 68 bis Abb. 70 sind die gemessenen Leistungsaufnahmen und Umwälzvolumenströme über zwei Jahre (2016 & 2017) im Lippe-Bad dargestellt, jeweils aufgeschlüsselt für die drei Beckenkreisläufe. Interessant und aussagekräftig zur Bewertung der Energieeffizienz sind zusätzlich zu den absoluten Leistungsaufnahmen (Abb. 68) die spezifischen Werte pro m² Beckenfläche (Abb. 70) oder pro m³/h Umwälzvolumenstrom (Abb. 70). Tab. 14 beinhaltet eine Übersicht der relevanten Ergebnisse dazu aus dem Lippe-Bad.

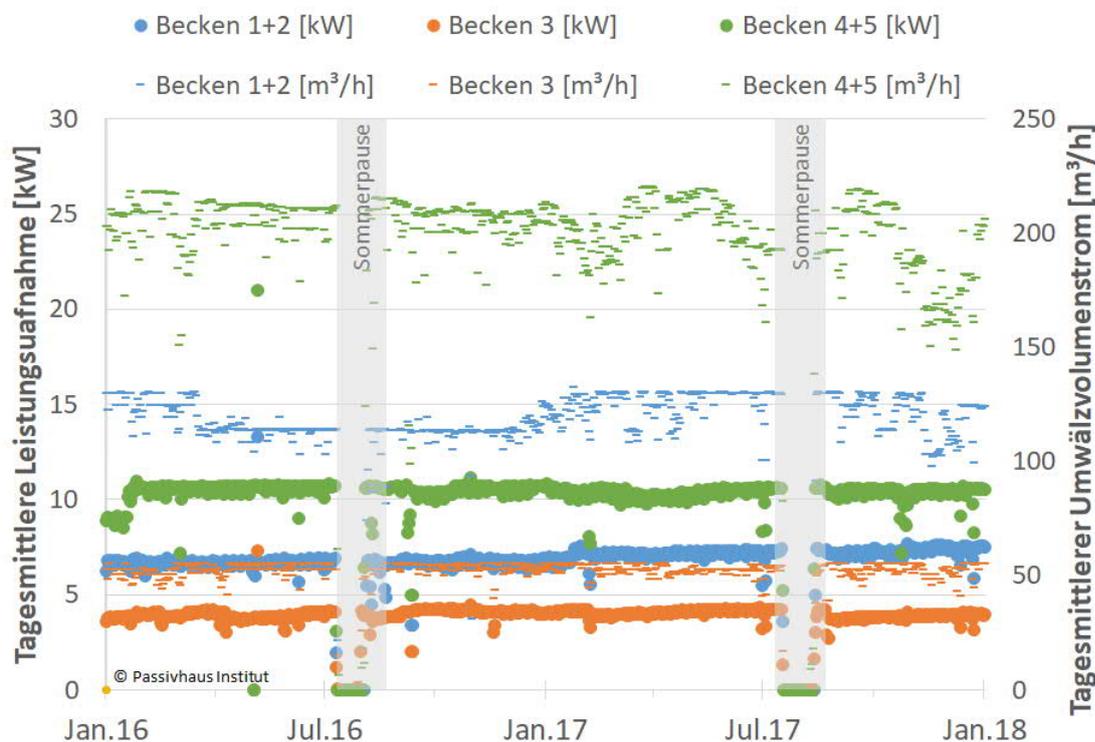


Abb. 68: Gemessener Stromverbrauch und Umwälzvolumenstrom der drei Beckenkreisläufe im Lippe-Bad über zwei Jahre 2016 & 2017.

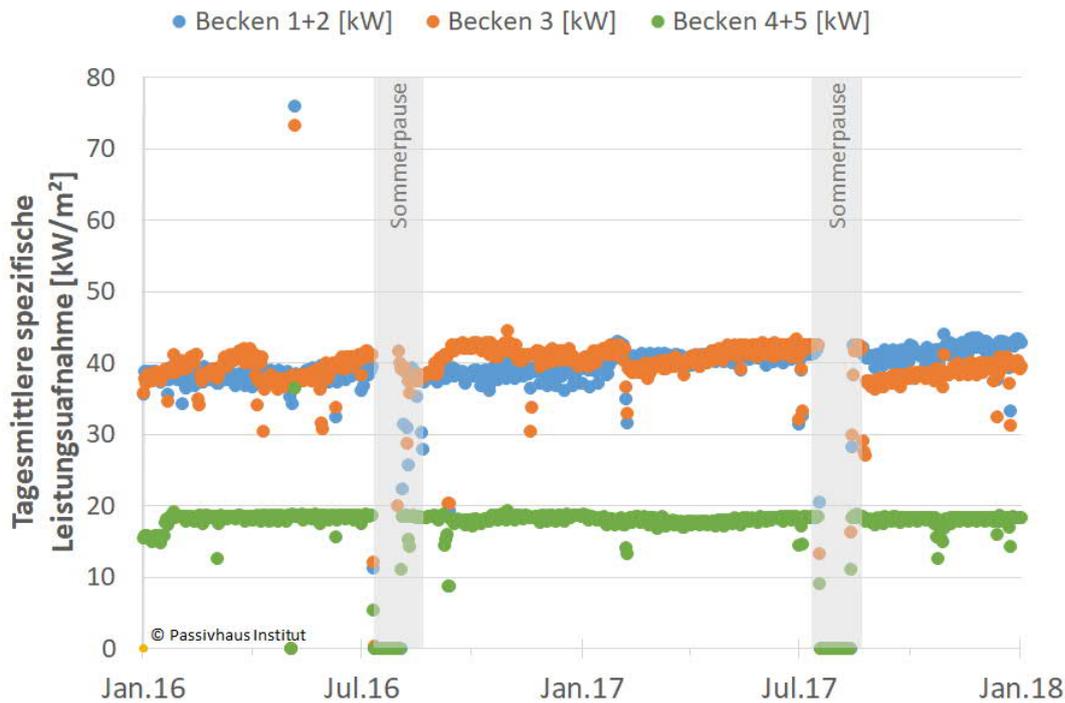


Abb. 69: Spezifische Leistungsaufnahme der Umwälzpumpen pro m² Beckenfläche (als Tagesmittelwert) aller drei Beckenkreisläufe im Lippe-Bad.

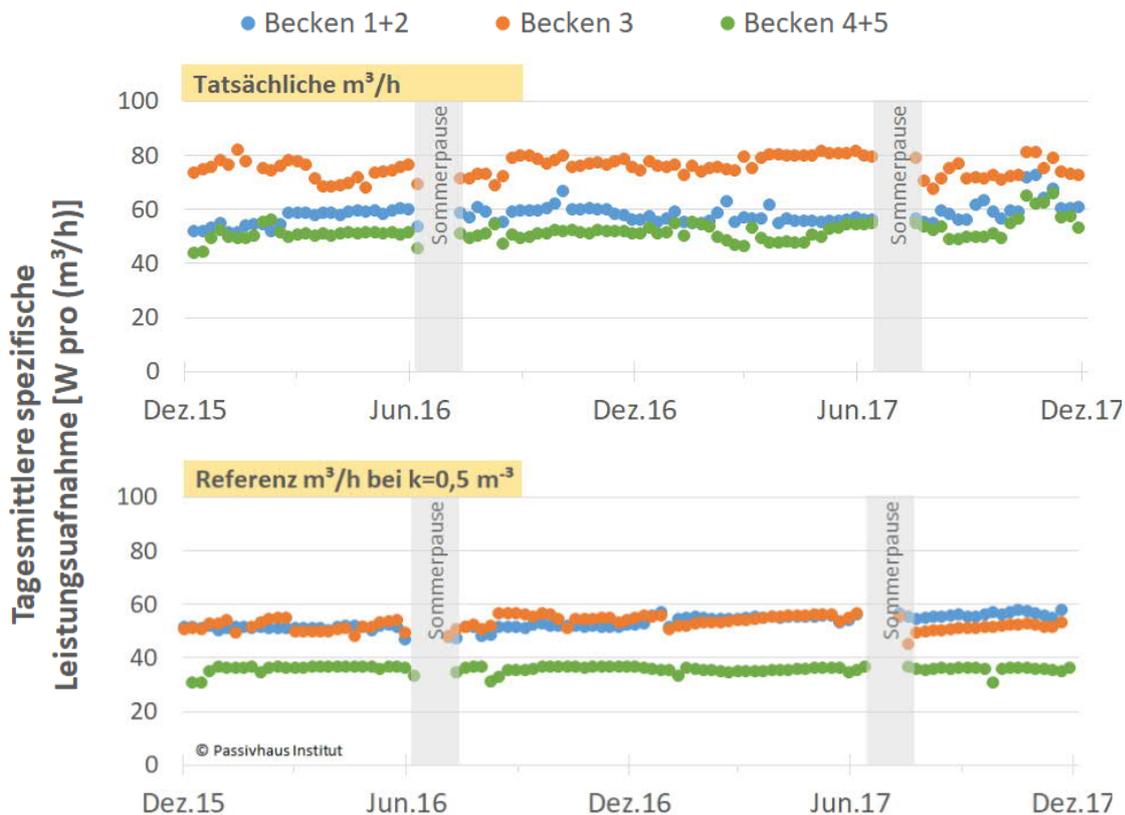


Abb. 70: Spezifische Leistungsaufnahme der Umwälzpumpen pro m³/h Umwälzvolumenstrom (als Wochenmittelwert) aller drei Beckenkreisläufe im Lippe-Bad. Mit Bezug auf den tatsächlich geförderten Volumenstrom (oben) und auf den nach [KOK 2013] berechneten Volumenstrom mit Belastbarkeitsfaktor $k = 0,5 \text{ m}^{-3}$ (unten).

Tab. 14: Absolute und spezifische Leistungsaufnahmen der Umwälzpumpen im Lippe-Bad.

Mittlere Leistungsaufnahme der Umwälzpumpen im Lippe-Bad 2016/2017			
	Becken 1+2	Becken 3	Becken 4+5
kW	6,9	4,0	10,4
W/m ² Beckenfläche	40	40	18
W/(m ³ /h) gemessener Volumenstrom	58	76	52
W/(m ³ /h) k=0,5 m ⁻³ Belastbarkeitsfaktor (Referenzwert)	53	53	36
Bezugsgrößen			
Beckenfläche [m ²]	175	100	575
Mittlerer Volumenstrom m ³ /h mit k=1 m ⁻³ (Ultrafiltration)	65	40	145
Mittlerer Volumenstrom m ³ /h 2016/2017 gemessen & Erhöhung gegenüber UF-Auslegung	120 185%	52 130%	200 138%
Umwälzvolumenstrom m ³ /h mit k=0,5 m ⁻³ (typisch für die meisten Filterarten)	130	75	290

Es ist zu erwarten, dass unterschiedliche Beckentypen unterschiedliche spezifische elektrische Leistungsaufnahmen pro m² Beckenfläche aufweisen. Je nach Nutzungsannahme für die Beckentypen und dementsprechend unterschiedlichen Nennbelastungen nach [KOK 2013] variiert der hygienisch notwendige Umwälzvolumenstrom pro m² Beckenfläche. Mit einer höheren Nennbelastung von 2,7 m²/P für Becken 1+2 und 3 ist der erforderliche Nenn-Umwälzvolumenstrom je m² Beckenfläche höher als für die Schwimmerbecken 4+5 mit 4,5 m²/P. Es ist daher zu erwarten, dass die spezifischen Stromverbräuche für Schwimmerbecken in der Regel niedriger ausfallen als für Vario- oder Nichtschwimmerbecken. Die gemessenen Leistungsaufnahmen im Lippe-Bad (Tab. 14) bezogen auf die Beckenfläche liegen im Durchschnitt bei 40 W/m² für Becken 1+2 und Becken 3, sowie bei 18 W/m² für Becken 4+5.

Im Lippe-Bad basiert die Schwimmbadtechnik auf Ultrafiltration. Ein Vorteil der Ultrafiltration ist, dass sie mit niedrigeren Umwälzvolumenströmen betrieben werden kann: Die Auslegung erfolgt mit einem Belastbarkeitsfaktor von $k = 1 \text{ m}^{-3}$, anstelle von $0,5 \text{ m}^{-3}$ bei Festbett- und Anschwemmfiltern. Prinzipiell können Anlagen mit Ultrafiltration also mit 50% niedrigerem Volumenstrom betrieben werden, wie das z.B. im Bambados in Bamberg der Fall ist. Im Falle des Lippe-Bades mussten die Umwälzvolumenströme im Betrieb etwas erhöht werden, um die gewünschte Wasserqualität zu erreichen. Im langfristigen Betrieb entspricht die Erhöhung des Umwälzvolumenstroms im Lippe-Bad auf 185% für Becken 1+2, 130% für Becken 3 und 138% für Becken 4+5 gegenüber einer Auslegung mit einem k-Faktor von 1 (üblich für Ultrafiltration).

Dass die spezifischen Verbrauchswerte pro m² Beckenfläche für Becken 1+2 und 3 gleich ausfallen ist Zufall: Der tatsächliche Betriebspunkt für Becken 3 ist weniger effizient pro tatsächlich realisiertem Umwälzvolumenstrom (76 Wh/m³ gegenüber 58 Wh/m³), dafür ist der spezifische geförderte Volumenstrom niedriger als bei Becken 1+2. Becken 4+5 hat mit 52 Wh/m³ die beste Systemeffizienz im Lippe-Bad und eine Erhöhung des Umwälzvolumenstroms auf ca. 138% gegenüber Auslegung mit $k = 1 \text{ m}^{-3}$.

Für eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Bädern - unabhängig von der Filtertechnik und dem tatsächlich realisierten Volumenstrom - wird der Auslegungs-Umwälzvolumenstrom nach den Richtlinien für den Bäderbau [KOK 2013] mit einem einheitlichen Belastbarkeitsfaktor $k = 0,5 \text{ m}^{-3}$ vorgeschlagen (siehe [Peper/Grove-Smith 2013], S.89). Dies ist der übliche Belastbarkeitsfaktor für die meisten Filtertechnologien, außer der Ultrafiltration. Im Lippe-Bad liegt dieser Wert bei $53 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})_{k=0,5}$ für Becken 1+2 und Becken 3 sowie bei $36 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})_{k=0,5}$ für Becken 4+5 (siehe Abb. 70 und Tab. 14).

Wie auch bereits im ersten Monitoring-Bericht beschrieben [Peper/Grove-Smith 2013] (S. 87ff.) weicht der tatsächlich umgesetzte Umwälzvolumenstrom (m³/h) im Lippe-Bad von den Planungswerten ab (Sicherstellung der Wasserqualität). Zudem wurden Komponenten nachgerüstet, die zu einer Erhöhung der Druckverluste im Beckenkreislauf führten. Der Stromverbrauch in Lünen entspricht daher nicht dem, der mit einer optimierten Neuplanung erreicht werden kann. Zusätzliche Reduktionen des Umwälzvolumenstroms oder eine geplante teilweise Internumwälzung konnten im laufenden Betrieb nicht umgesetzt werden.

Referenzwerte

Niedrige Druckverluste und ein hoher Gesamtwirkungsgrad sind die Grundlage für stromeffiziente Wasserumwälzung. Bei halbierten Druckverlusten, sinkt linear dazu auch der Strombedarf um 50%. Tab. 15 enthält die entsprechende Ergebnisübersicht für Schwimmerbecken für Nichtschwimmerbecken bei durchgängigem Betrieb mit Nennvolumenstrom. Demnach sind ca. 25-40 Wh/m³ als effiziente Lösung bei durchgängigem Vollastbetrieb anzusehen. Dies entspricht für Sportbecken 10-17 W/m² und für Nichtschwimmerbecken 17-29 W/m².

Durch Absenkung des Umwälzvolumenstroms können weitere Einsparungen erzielt werden. Unter der Annahme eines Gesamtwirkungsgrades von 70% (Pumpe, Motor & Frequenzumformer), kann die zu erwartende spezifische Stromaufnahme bei unterschiedlichen Druckverlusten und Betriebsweisen berechnet werden. Die Stromaufnahme bei reduziertem Volumenstrom berechnet sich hierbei in erster Näherung als $P_2 = P_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^3$, mit P = Leistungsaufnahme, Q = Volumenstrom im Betriebspunkt 1 und Betriebspunkt 2. In Abb. 71 ist das entsprechende Einsparpotential durch Absenkung des Volumenstroms aufgezeigt.

Tab. 15: Abschätzung des spezifischen Strombedarfs der Umwälzpumpen bei unterschiedlichen Druckverlusten (Randbedingungen: Belastbarkeitsfaktor $k = 0,5 \text{ m}^{-3}$, Gesamtwirkungsgrad = 70%).

Sportbecken:

Nenn-Volumenstrom $\text{m}^3/\text{h pro m}^2$	Druckverluste mWs	mittlere spezifische Stromaufnahme	
		Wh/m^3	W/m^2
0,44	4	16	7
0,44	6	23	10
0,44	8	31	14
0,44	10	39	17
0,44	12	47	21
0,44	15	58	26
0,44	25	97	43

Nichtschwimmerbecken:

Nenn-Volumenstrom $\text{m}^3/\text{h pro m}^2$	Druckverluste mWs	mittlere spezifische Stromaufnahme	
		Wh/m^3	W/m^2
0,74	4	16	12
0,74	6	23	17
0,74	8	31	23
0,74	10	39	29
0,74	12	47	35
0,74	15	58	43
0,74	25	97	72

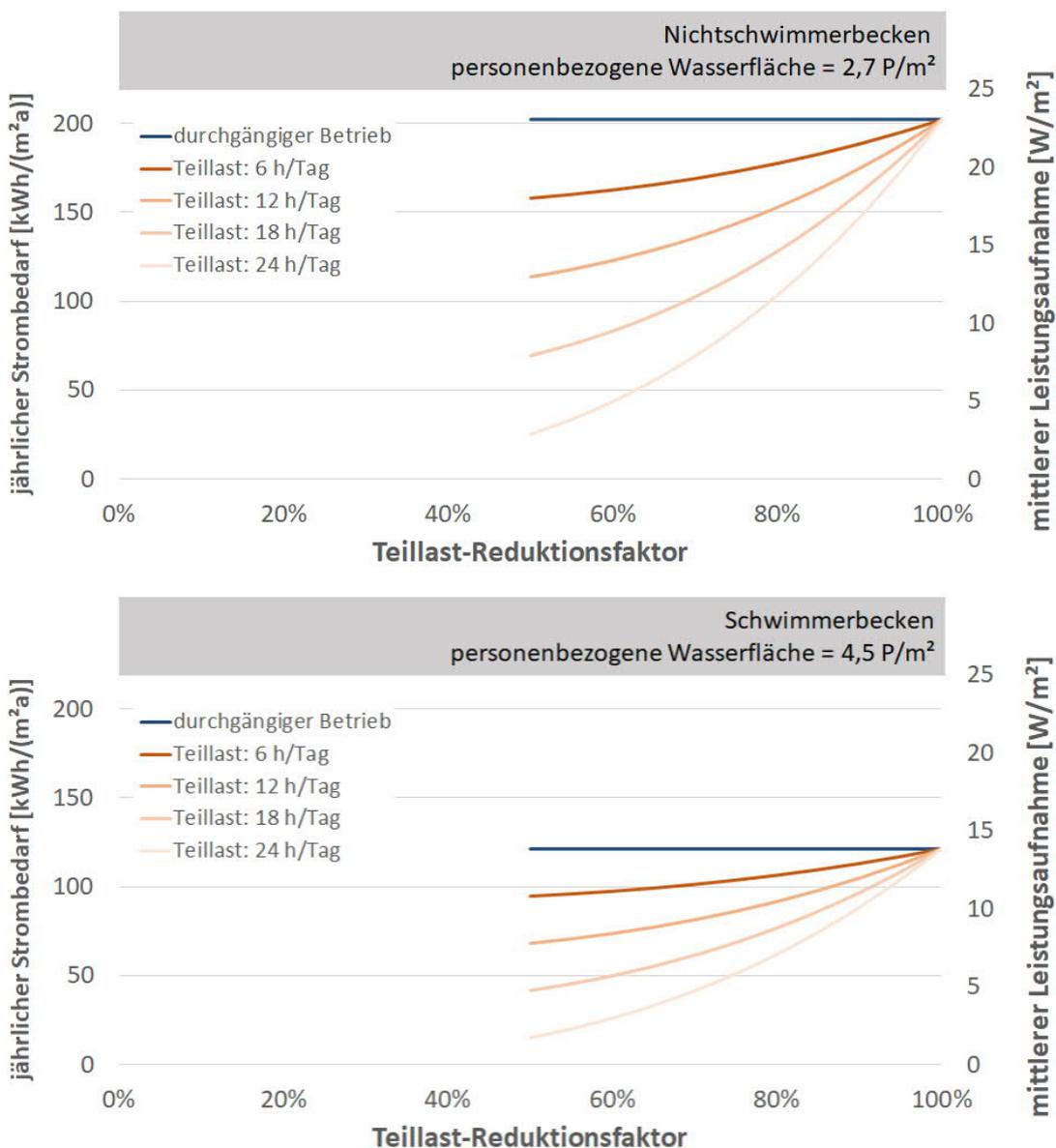


Abb. 71: Beispiele des Strombedarfs der Umwälzpumpen bei unterschiedlichen Teillastbetrieben für ein Nichtschwimmerbecken (oben) und ein Schwimmerbecken (unten). Randbedingungen für die Berechnung: 8mWS Druckverlust und 70% Gesamtwirkungsgrad der Pumpe.

In der Praxis liegen die Druckverluste oft deutlich über dem technischen Potential und die Einsparpotentiale werden durch gängige Planungsansätze nicht ausgeschöpft. An dieser Stelle wäre eine Verbreitung von konkreten Planungsansätzen sehr wichtig, um in die Zukunft Kanalnetze mit stark reduzierten Druckverlusten umsetzen zu können. Als konkrete Beispiele und als Hilfestellung für Orientierungswerte sind in Abb. 72 und Abb. 73 Druckverluste (im Betriebspunkt) einzelner Komponenten im Beckenkreislauf aufgeführt. Die Gesamt-Druckverluste liegen in diesen Beispielen im optimierten Fall bei 5,8 mWS (Abb. 72) und bei 9 mWS (Abb. 73). Jedes individuelle Bad ist etwas anders aufgebaut und es gilt im Einzelfall das Gesamtsystem zu optimieren.

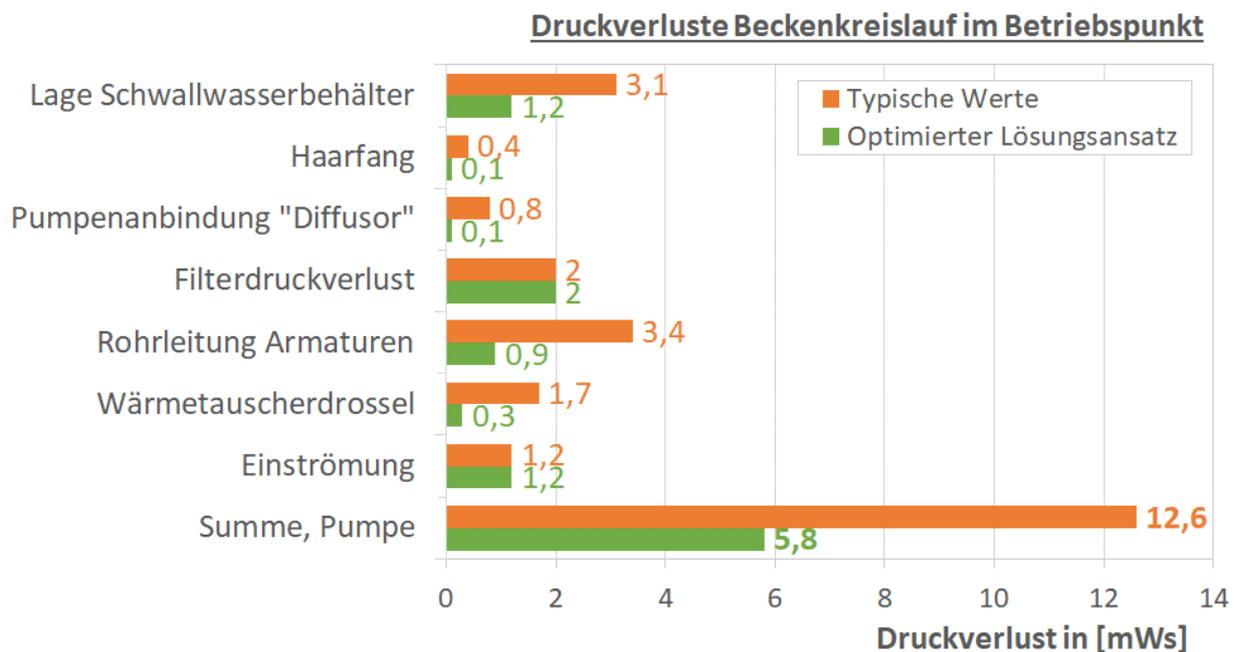


Abb. 72: Beispielhafte Druckverluste einzelner Komponenten eines Beckenkreislaufs für übliche Lösungen (rot) und einen optimierten Ansatz (blau). Die Daten wurden durch das Ingenieurbüro Inco aufbereitet und bilden durchschnittliche Werte aus Messungen und Analysen zahlreicher Bäder ab. In Summe werden hier die Druckverluste um mehr als 50% von 12,6 mWS auf 5,8 mWS gesenkt.
Quelle: Inco.

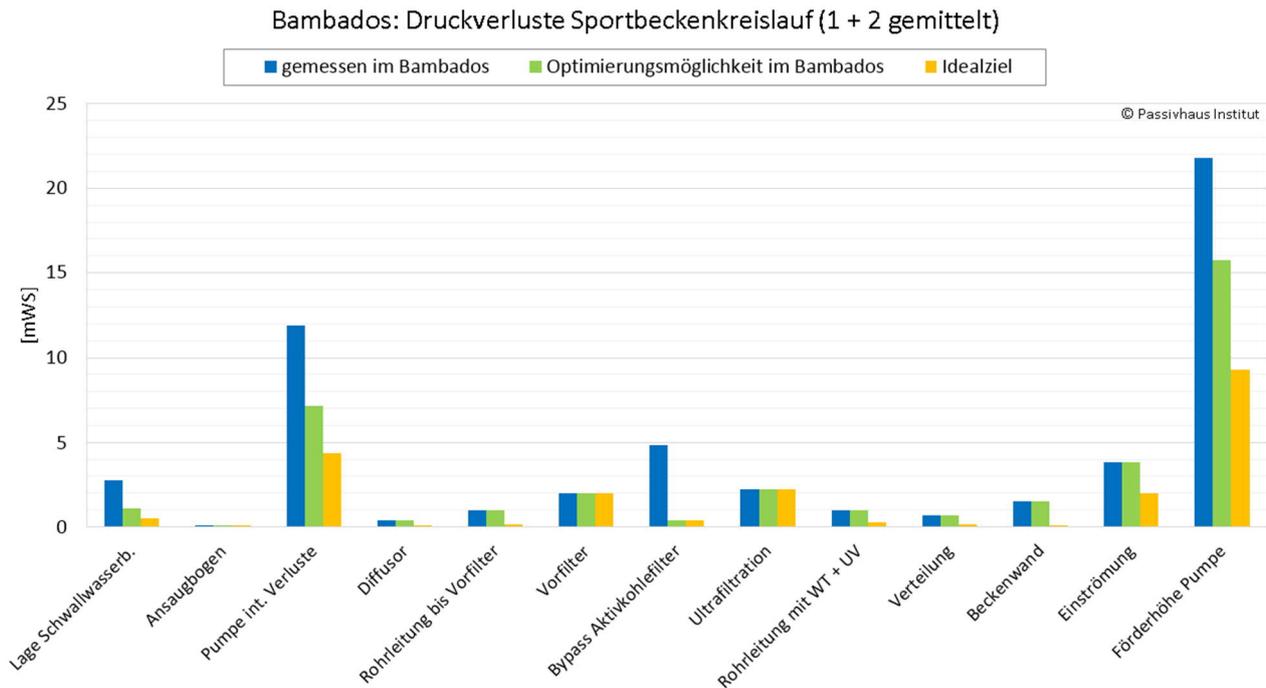


Abb. 73: Beispiel der Druckverluste einzelner Komponenten des Sportbeckenkreislaufs im Bambados Hallenbad: Gemittelte gemessene Druckverluste (blau), sowie deren Optimierungspotential durch Nachrüstung (grün) und, im Vergleich dazu, die im idealfall realisierbaren Druckverluste bei einer Neuplanung (gelb). Quelle: [Gollwitzer et al. 2015], [Kaluza 2014].

8.2 Frischwasserverbrauch Beckenwasser

Als hygienische Richtlinie gelten für Hallenbäder 30 Liter Frischwasser pro Badegast für die Erhaltung einer guten Badewasserqualität. In der Praxis wird die tatsächlich verbrauchte Wassermenge der Beckenkreisläufe oft durch die Filterspülung bestimmt. Im Lippe-Bad wird Ultrafiltration als Filtertechnologie verwendet, welche i.d.R. einen höheren Wasserverbrauch aufweist als konventionelle Sand-/Mehrschichtfilter.

Die Auswertung der Daten bestätigt, dass der Frischwasserverbrauch in diesem Bad tatsächlich deutlich höher ist, als nach hygienischen Richtlinien erforderlich. Im Jahr 2016 wurden über das Kassensystem 241.274 Besucher registriert (siehe Jahresverlauf in Abb. 74). Das entspricht monatlich 24 Besuchern pro m² Beckenfläche. In Abb. 75 ist als Beispiel für das Jahr 2016 der monatliche Wasserverbrauch für die drei Beckenkreisläufe im Vergleich zum Richtwert von 30 Litern pro Gast aufgezeigt. Im Jahresmittel (ohne August, in dem das Wasser komplett ausgewechselt wird) werden 76 Liter pro Besucher Frischwasser nachgespeist, also ca. 250% des hygienischen Bedarfs. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen 13 l/P Füllwasser aus der Spül- abwasseraufbereitungsanlage, beträgt der Anteil ca. 300% des hygienischen Bedarfs. Dieser vergleichbar hohe Wasserverbrauch ist auf die Ultrafiltrationsanlage zurück zu führen.

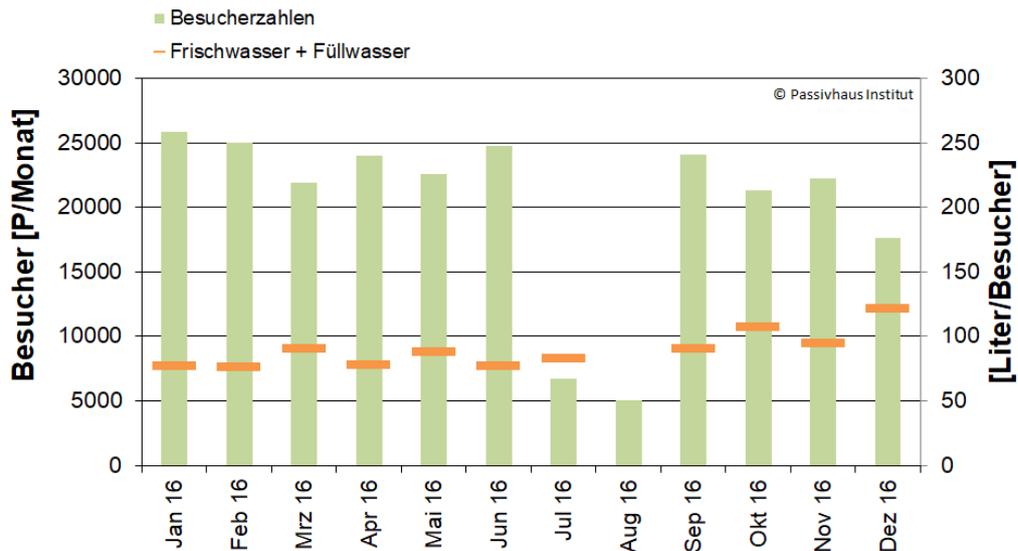


Abb. 74: Monatliche Besucher (Personenzahl basierend auf Zählung durch das Kassensystem) im Jahr 2016 und die äquivalente Frischwassermengen pro Gast im Lippe-Bad.

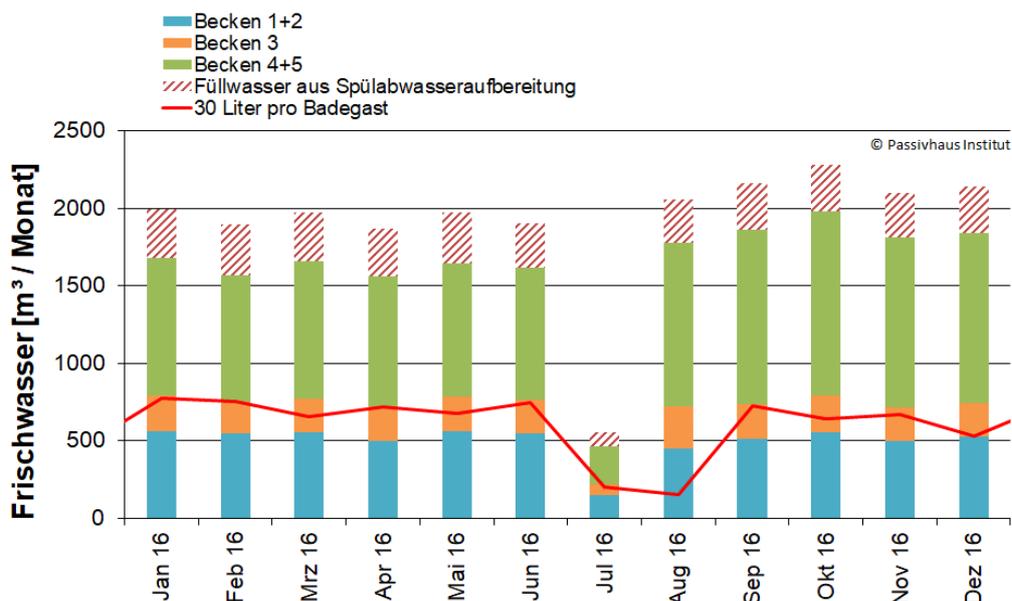


Abb. 75: Monatlicher Frischwasserverbrauch im Lippe-Bad für die drei Beckenkreisläufe im Vergleich zur hygienischen Mindestanforderung von 30 Liter/ Gast (Personenzahl basierend auf Zählung durch das Kassensystem).

Eine Betrachtung der spezifischen Verbrauchswerte (inkl. Füllwasser) im Lippe-Bad pro m² Beckenfläche (Abb. 76) weist einen Unterschied zwischen den Beckenkreisläufen auf: Mit 1,8 m³/(m²Monat) war der mittlere spezifische Frischwasserverbrauch für Becken 4+5 (Schwimmerbecken) im Jahr 2016 niedriger als die verbrauchten 2,8 m³/(m²Monat) für Becken 3 und 3,3 m³/(m²Monat) für Becken 1+2. Das ist nur zu erwarten, denn die Filter werden nach der Nennbelastung ausgelegt, welche für Schwimmerbecken niedriger angesetzt werden.

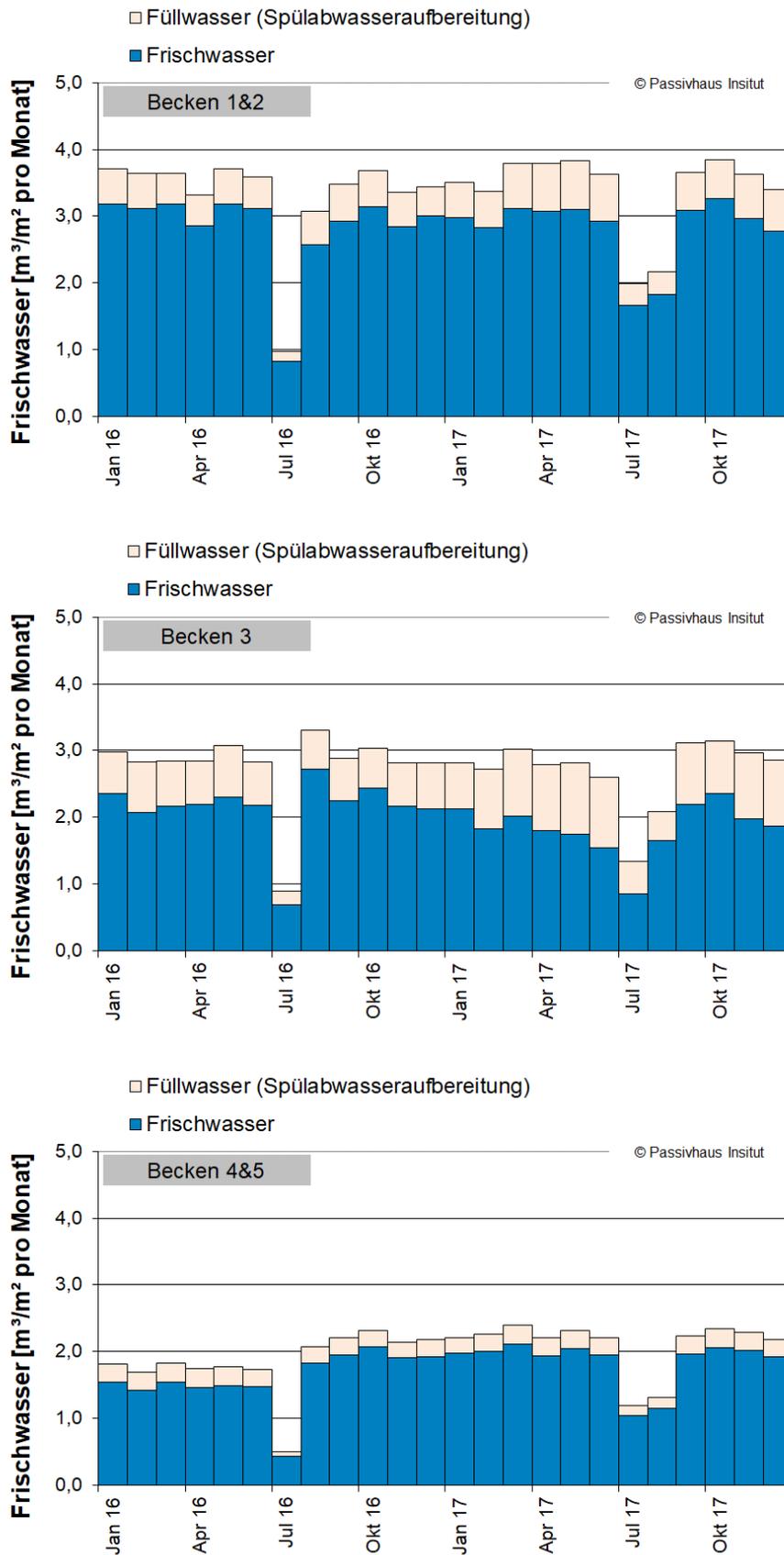


Abb. 76: Spezifischer monatlicher Wasserverbrauch pro m² Beckenfläche der drei Beckenkreisläufe im Lippe-Bad im Zeitverlauf 2016-2017.

Referenzwerte

Ausgehend von einer ähnlichen Besucherzahl pro m² Beckenfläche wie im Lippe-Bad (im 24h-Mittel ca.11% der [KOK 2013] Nennbelastung), können von 18 Besuchern pro m² pro Monat für ein Schwimmerbecken (SB) und 30 Besuchern/(m²Monat) für ein Nichtschwimmerbecken (NSB) ausgegangen werden. Daraus ergibt sich ein hygienischer Frischwasserbedarf von 0,5 m³/(m²Monat) (SB) bzw. 0,9 m³/(m²Monat) (NSB). Dieser Wert kann selbstverständlich von Projekt zu Projekt je nach Besucherzahlen stark abweichen.

Im Vergleich dazu kann auch der typische Wasserbedarf für die Filterspülung bei konventionellen Mehrschichtfiltern berechnet werden. Aus der Anforderung einer Spülgeschwindigkeit von 30 m/h und den Nennbelastungen nach [KOK 2013] kann die Filtergröße pro m² Beckenfläche berechnet werden (0,015 m²_{Filter}/m²_{Becken} für SB und 0,025 m²_{Filter}/m²_{Becken} für NSB). Ausgehend von einer Spülwassermenge von ca. 4,5 m³/m²_{Filter} und zwei Spülungen wöchentlich, ergibt sich ein Wasserbedarf von 0,6 m³/(m²Monat) (SB) bzw. 1 m³/(m²Monat) (NSB). Diese Werte sind in einer ähnlichen Größenordnung wie der zuvor berechnete hygienische Frischwasserbedarf. Bei anderen Filtersystemen kann der Wasserbedarf deutlich höher ausfallen, wie z.B. im Falle der Ultrafiltration im Lippe-Bad. Es ist zu erwarten, dass der tatsächliche Frischwasserbedarf etwas höher ausfällt als die reine Filterspülwassermenge, da zusätzlich Wasserverluste durch ausgetragenes Wasser der Badegäste, Verdunstung und Wasserabzapfungen für Proben etc. ausgeglichen werden müssen.

Aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht ist es erstrebenswert, die gewünschte Wasserqualität mit möglichst niedrigen Frischwassermengen zu realisieren (Einsparung an Frischwasser, Abwasser und Heizenergie). Dies sollte bei der Abwägung der Vor- und Nachteile verschiedener Filterverfahren berücksichtigt werden.

8.3 Lippe-Bad: Spülwasseraufbereitung

In Schwimmbädern müssen die Wasserfilter der Beckenwasserkreisläufe regelmäßig rückgespült werden. Das dabei anfallende Spülwasser kann weiter genutzt werden. Um Kosten für Heizenergie, für Wasser und für Abwasser zu senken, wurde im Lippe-Bad deshalb eine Spülwasseraufbereitungsanlage installiert. Damit kann aus Abwasser Wärme, Wasser oder beides zurückgewonnen werden. Die Spülwasseraufbereitung wurde von Anfang 2014 bis Mitte 2015 schrittweise in Betrieb genommen. Seitdem wird sie durchgehend betrieben. Die folgende Auswertung wurde für das Jahr 2016 durchgeführt.

Schema

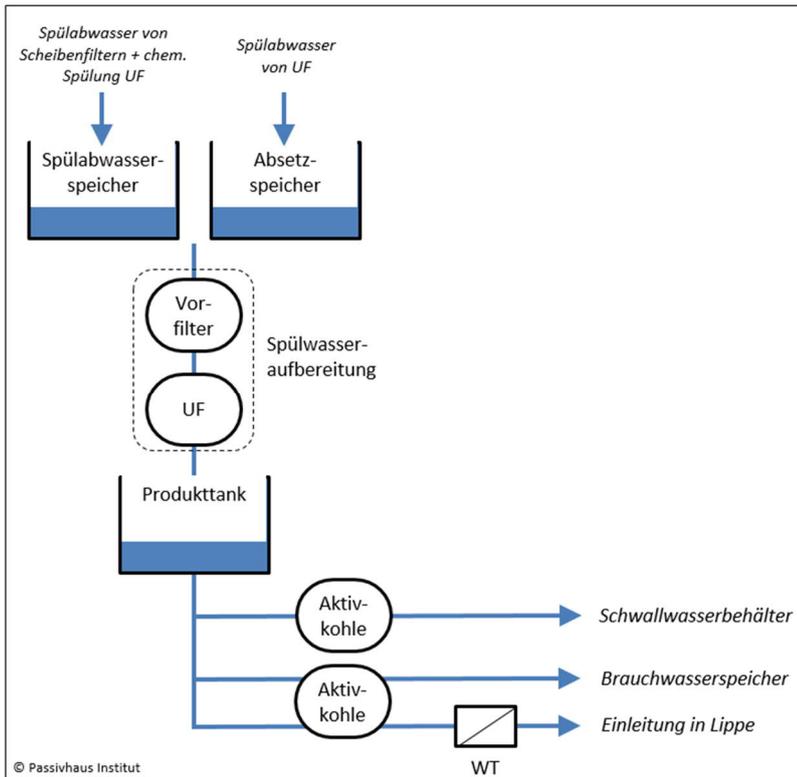


Abb. 77: Schema der Spülwasseraufbereitung.

Das aufbereitete Wasser im Lippe-Bad kann wahlweise auf drei verschiedene Arten genutzt werden (siehe Abb. 77): Es kann zur Füllung der Schwallwasserbehälter verwendet werden. Aus energetischer Sicht ist das die erste Wahl, da nicht nur das Wasser, sondern auch die Wärme des Wassers genutzt werden kann. Das aufbereitete Wasser aus der chemischen Spülung (nachts) wird allerdings in großem Umfang als Abwasser in die Lippe eingeleitet (Reduzierung der Abwasserkosten) und zu einem kleinen Teil als Brauchwasser im Gebäude genutzt. Das Wasser, das in die Lippe eingeleitet wird, fließt über einen Wärmetauscher, so dass ein Teil der Wärme für das Gebäude zurückgewonnen wird.

Auswertung

Das folgende Diagramm zeigt die Auswertung der Spülwasseraufbereitung im Lippe-Bad für 2016. Der linke Balken zeigt die Gesamtmenge des Spülwassers (aus Messdaten und zusätzlichen Abschätzungen ermittelt). Ein Teil des Spülwassers wird aufbereitet und kann genutzt werden (siehe rechter Balken: Becken, WCs, Lippe). Ein Teil des Spülwassers wird nicht aufbereitet, sondern wird direkt zur Rückspülung der Vorfilter der Spülwasseraufbereitungsanlage (ca. 8.000 m³/a) verwendet und als Abwasser abgeführt. Damit ist dies der größte Teil des Abwassers in der rechten Säule der folgenden Grafik. Der restliche Teil des Abwassers entsteht dadurch, dass aufbereitetes Wasser für die Rückspülung der Spülwasseraufbereitung (UF) benutzt wird.

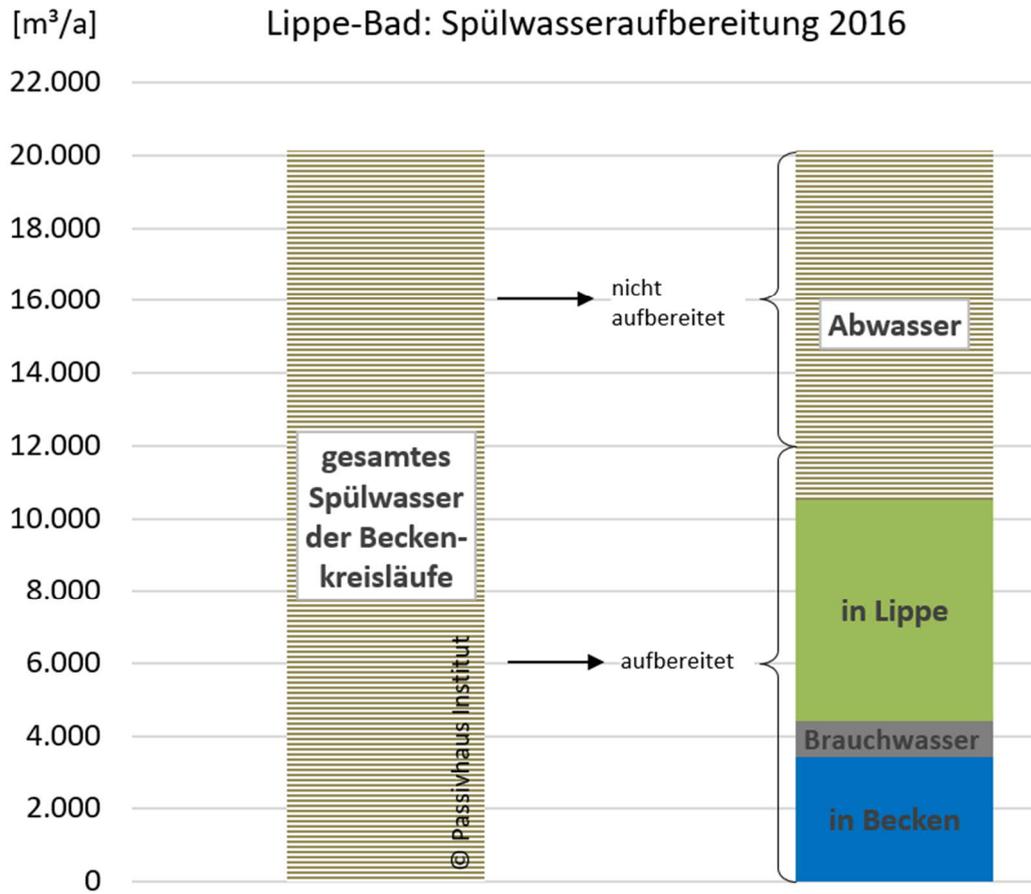


Abb. 78: Spülwasserverbrauch im Lippe-Bad und dessen Nutzung

Im folgenden Diagramm wird nicht mehr die gesamte Spülwassermenge betrachtet, sondern nur noch das Spülwasser, das aufbereitet wird. Es wird gezeigt, wie sich das aufbereitete Wasser auf die genannten Nutzungen aufteilt. Zum Vergleich ist die Gesamtmenge an aufbereitetem Wasser (blaue Linien) dargestellt. Die Differenz zwischen dieser Gesamtmenge und der Summe des genutzten aufbereiteten Wassers (Balken im Diagramm) wird zur Rückspülung der Spülwasseraufbereitung (UF) verwendet. Das Spülwasser für die Vorfilter der Spülwasseraufbereitungsanlage selber ist nicht im Diagramm enthalten.

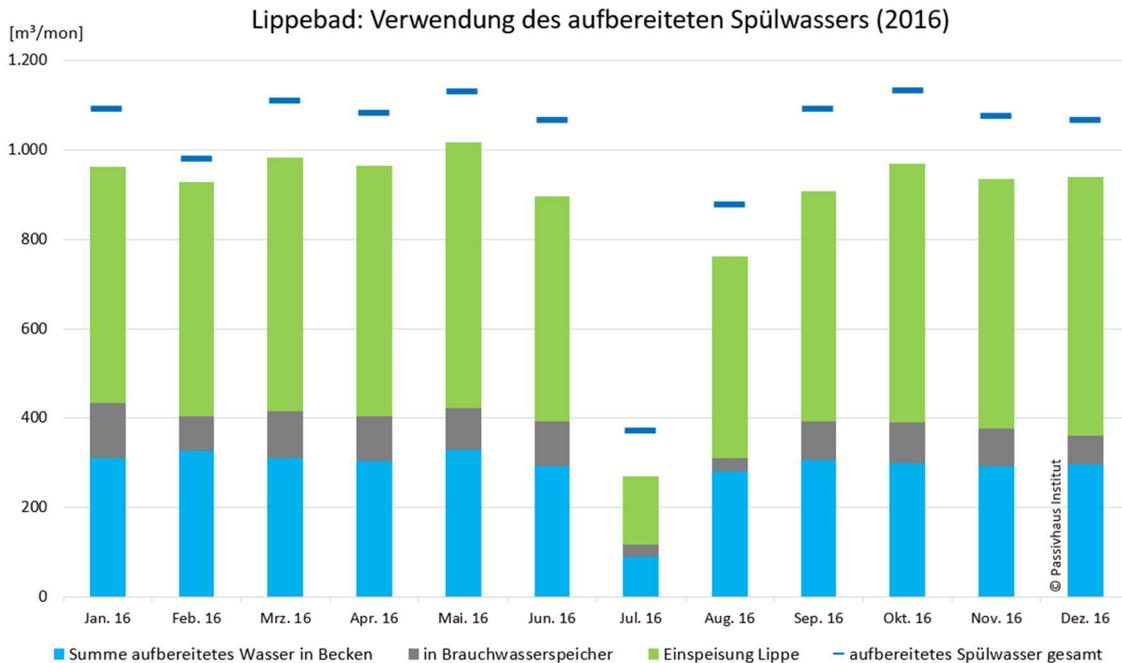


Abb. 79: Nutzung des aufbereiteten Spülwassers in drei Nutzungsbereiche und Angabe der Gesamtmenge des aufbereiteten Spülwassers (Monatssummen). Die Differenz zur Gesamtmenge wird zur Rückspülung der Spülwasseraufbereitung selber genutzt.

Die Nachspeisung der Schwallwasserbehälter konnte zu 15 % aus aufbereitetem Wasser gedeckt werden. Die genaue Aufteilung ist im folgenden Diagramm dargestellt.

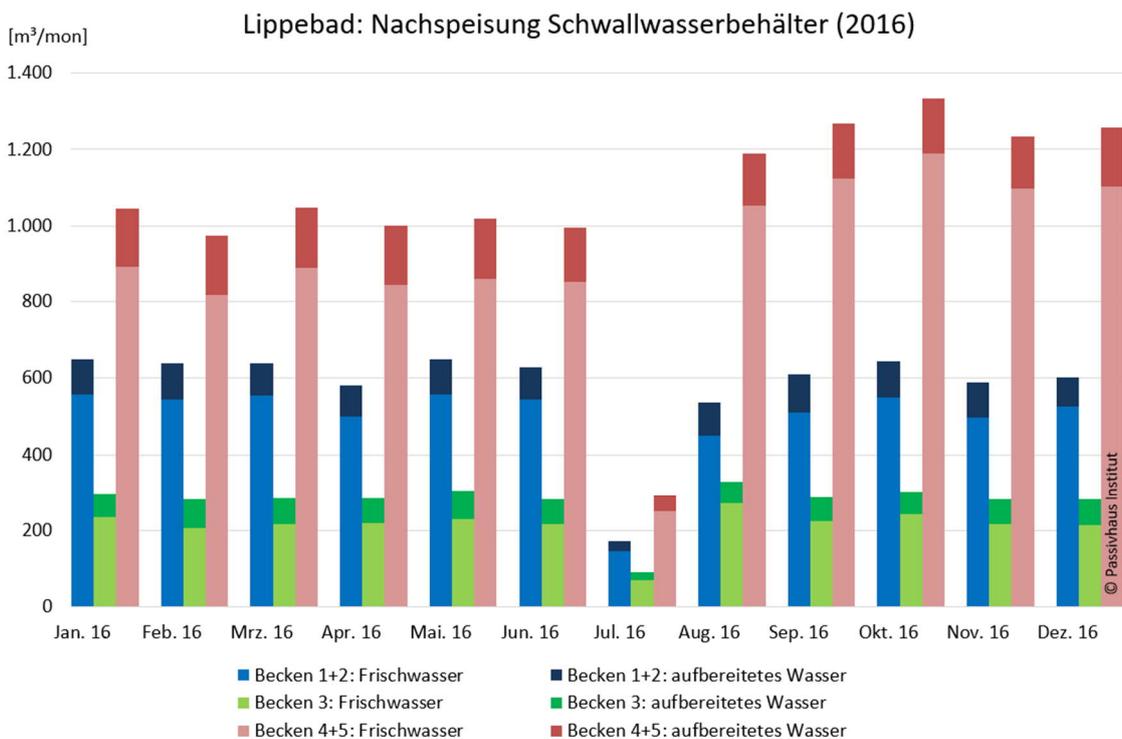


Abb. 80: Monatsdarstellung der Beckenwassernachspeisung der drei Beckenwasserkreisläufe. Im Mittel über alle Kreisläufe deckt das aufbereitete Wasser 15 % der Nachspeisung ab.

Betriebsänderungen

Im Betrieb stellte sich heraus, dass die Filter der Spülwasseraufbereitung mehr gespült werden müssen, damit sie sich nicht so schnell zusetzen. Nachdem eine Pumpe für den Brauchwasserkreislauf defekt war, wurde vom Betreiber entschieden, kein aufbereitetes Wasser mehr als Brauchwasser zu verwenden (ab Mitte Januar 2017). Für das Jahr 2017 stieg dadurch die Menge des aufbereiteten Wassers, das für die Beckenkreisläufe genutzt wurde, leicht an (15 % im Vergleich zu 2016). Allerdings wurde auch ab August 2016 insgesamt mehr Frischwasser für die Becken 4 + 5 verwendet.

Einsatz und Einsparung

Folgende Einsparungen konnten für die Spülwasseraufbereitung im Jahr 2016 bilanziert werden:

- Das Abwasser wurde um 6.117 m³ reduziert, indem diese Menge als aufbereitetes Wasser in die Lippe eingeleitet wurde (Reduktion der Abwasserkosten).
- Es wurden 4.410 m³ Trinkwasser eingespart (13 % des Gesamtwasserverbrauchs): Indem 3.432 m³ aufbereitetes Wasser für die Becken und 978 m³ als Brauchwasser wiederverwendet werden konnten (Einsparung Kosten Trinkwasser). Die Wiederverwendung dieses Wassers spart gleichzeitig auch Abwasserkosten.
- Ca. 64 MWh an Heizwärme konnten gespart werden, da das aufbereitete Spülwasser warm in die Beckenkreisläufe zurückgeführt wurde. Das sind ca. 15 % des Heizwärmeverbrauchs für die Becken (Einsparung Heizwärme).
- Zusätzlich konnte dem Wasser, das in die Lippe eingeleitet wurde, über einen Wärmetauscher ca. 10MWh/a Energie entzogen werden und somit im Gebäude verbleiben (Einsparung Heizwärme).

Der Stromeinsatz für alle Pumpen der Spülwasseraufbereitung betrug 9.092 kWh im Jahr 2016. Das entspricht einer durchschnittlichen Leistung von ca. 1,1 kW.

Da die Datenauswertung zum Teil auf Hochrechnungen und Abschätzungen basiert, ist folgende prozentuale Bewertung nur bedingt belastbar: Durch die installierte Spülwasseraufbereitung konnten 30 % des Spülwassers aufbereitet in die Lippe geleitet werden und 22 % als Becken- bzw. Brauchwasser wieder verwendet werden. In Summe wurden damit 52 % des gesamten Spülwassers aufbereitet. Damit bleibt die Anlage zwar hinter der Prognose von 70 % Aufbereitungsquote zurück. Dennoch zeigt die Kosten-Nutzen-Analyse (siehe Kapitel 9), dass die Spülwasseraufbereitung sehr wirtschaftlich arbeitet. Für zukünftige Bäder wäre anzustreben, die Nutzung des warmen aufbereiteten Wassers im Gebäude (für Becken oder Duschen) noch weiter zu steigern. Bei diesem Projekt stieß eine höhere Nutzung an folgende Grenzen: Ein Großteil des Spülwassers wurde für die Spülung der Vorfilter der Aufbereitungsanlage benötigt. Wegen der Beckenwasserqualität sollte zur Nachspeisung der Becken nicht mehr aufbereitetes Spülwasser verwendet werden.

Generell und wie im Lippe-Bad betrieben, sollte der Teil des aufbereiteten Wassers aus der chemischen Rückspülung nicht für die Beckennachspeisung genutzt werden. Damit kann also die Nutzungsquote nicht gesteigert werden.

8.4 Verdunstung

Die Höhe der Verdunstung in einem Hallenbad hat einen erheblichen Einfluss auf verschiedene Bereiche: Energie, Komfort und nicht zuletzt die Luftqualität. Sie ist ausschlaggebend für die Dimensionierung und Betriebsweise der Lüftungsgeräte (siehe Kapitel 6.1) und hat durch die entstehenden Verdunstungsenthalpieverluste einen bedeutenden Einfluss auf den Heizwärmebedarf.

Für die Planung in Hallenbädern in Deutschland wird für die Berechnung der Verdunstungsmenge $M_{D,B,u/b}$ in kg/h, üblicherweise folgende Formel nach [VDI 208] verwendet:

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

- β Wasserübergangskoeffizient [m/h] - Indikator für die Beckenbelegung
- R_D spezifische Gaskonstante für Wasserdampf [J/(kgK)]
- \overline{T} Mittelwert der Beckenwasser- und Lufttemperatur [K]
- $p_{D,W}$ Sättigungsdruck bei Beckenwassertemperatur [Pa]
- $p_{D,L}$ Dampfdruck der Hallenluft [Pa]
- A_B Beckenwasseroberfläche [m²]

Die spezifische Verdunstungsmenge [kg/m²] ist demnach proportional zur

- a) Belegung β ; sehr variabel je nach Nutzung
- b) Dampfdruckdifferenz $(p_{D,W} - p_{D,L})$; abhängig von Wasser-, Lufttemperatur, Luftfeuchte
- c) mittleren Temperatur $1/\overline{T} \approx 0.003 \text{ K}^{-1}$; bei Hallenbädern (28-32°C) recht konstant

Es gibt in der Literatur verschiedene alternative Formeln auf deren Basis die zu erwartende Verdunstungsrate berechnet werden kann (siehe z.B. [Shah 2014]). Die Dampfdruckdifferenz an der Wasseroberfläche spielt dabei immer eine entscheidende Rolle. Je nach gewählter Methodik fällt sie mehr oder weniger ins Gewicht (siehe Abb. 46).

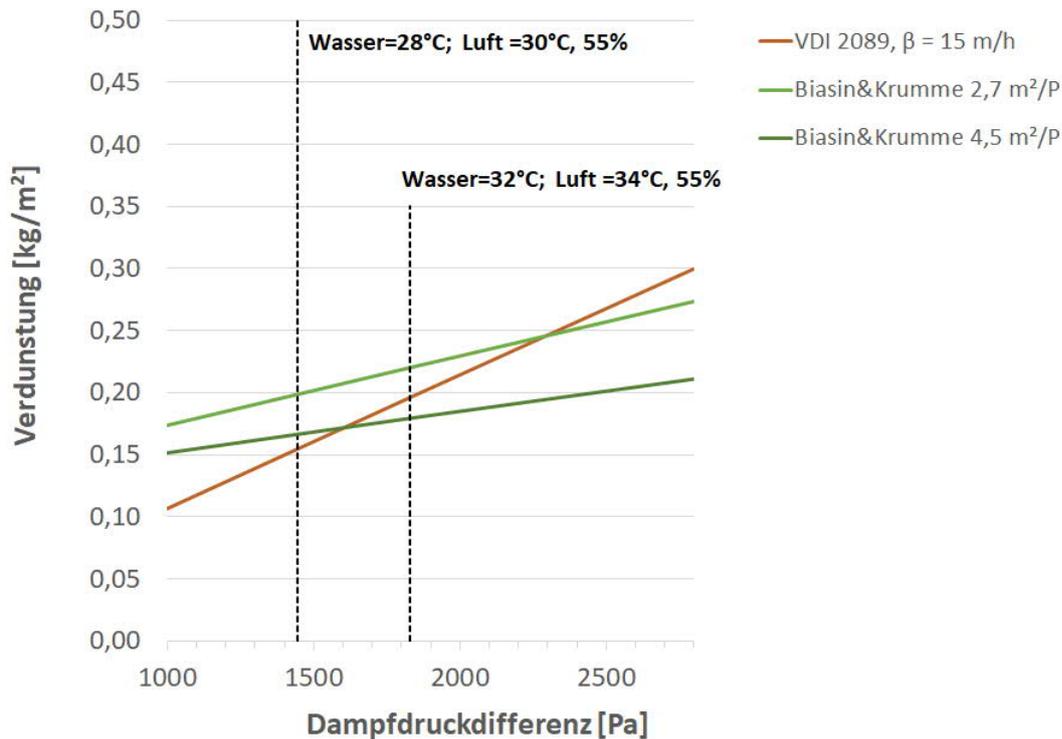


Abb. 81: Berechnete Verdunstung pro m² Beckenfläche je nach Dampfdruckdifferenz. Berechnet nach dem Verfahren der VDI 2089 (wird in Deutschland üblicherweise als Referenz verwendet) mit einem Wasserübergangskoeffizient β für durchschnittliche Nutzung und nach der Formel aus [Biasin, Krumme 1974] (wird z.B. in England als Referenz und zur Auslegung von Projekten verwendet).

Wie bereits in Kapitel 6.1 "Auslegung der Schwimmhallen-Lüftungsgeräte" und in [Peper/ Grove-Smith 2013] beschrieben, können über die Monitoring-Daten der Hallenlüftungsgeräte Rückschlüsse über die Verdunstungsmengen im Betrieb getroffen werden. In Abb. 82 bis Abb. 85 sind die Ergebnisse der Auswertungen des Lippe-Bades für die Jahre 2016 und 2017 dargestellt. Tab. 16 enthält eine Zusammenfassung der mittleren Verdunstungsraten für die verschiedenen Becken. Halle 4 und Halle 5 sind räumlich nicht getrennt, d.h. hier sind Wechselwirkungen zwischen den Lüftungsanlagen möglich und eine Betrachtung des gesamten Hallenbereichs (Becken 4+5) ist sinnvoll. Wie zu erwarten sind die Verdunstungsraten in Halle 1+2 am höchsten, da hier die Temperatur- und Feuchtebedingungen am ungünstigsten sind (höchste Dampfdruckdifferenz).

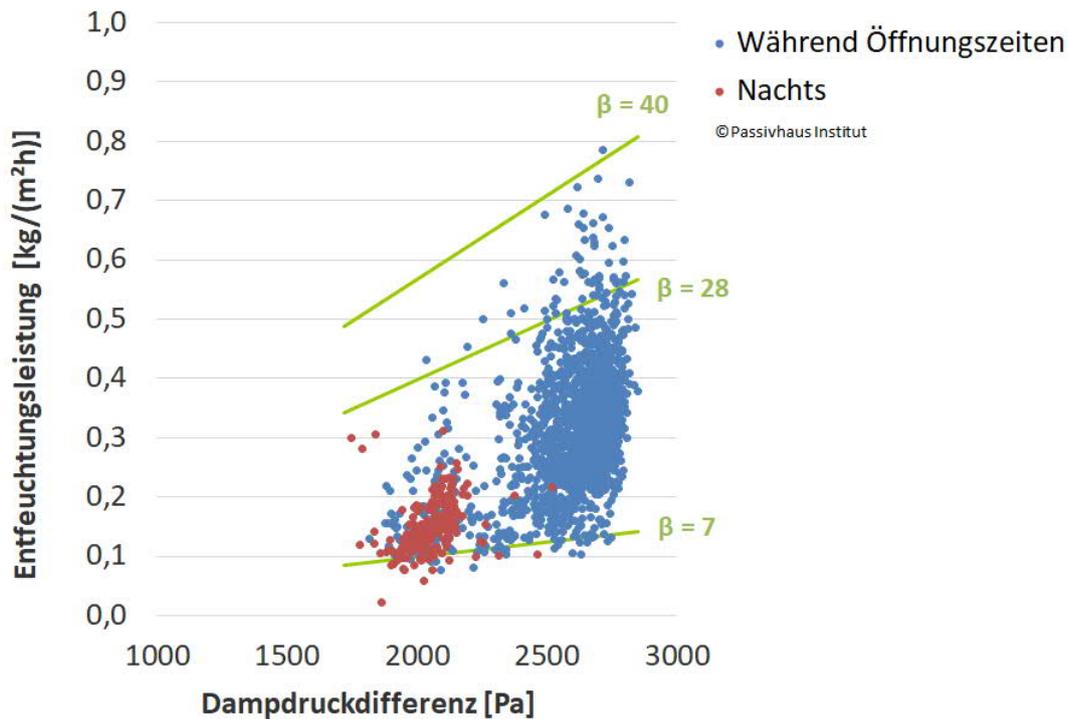


Abb. 82: Berechnete Entfeuchtungsleistung des Lüftungsgeräts der Halle 1+2 im Jahr 2016 (ohne Sommerpause). Die grünen Linien geben den Erwartungswert nach VDI bei den gemessenen mittleren Hallenbedingungen an: 32°C Wassertemperatur, 32°C Lufttemperatur

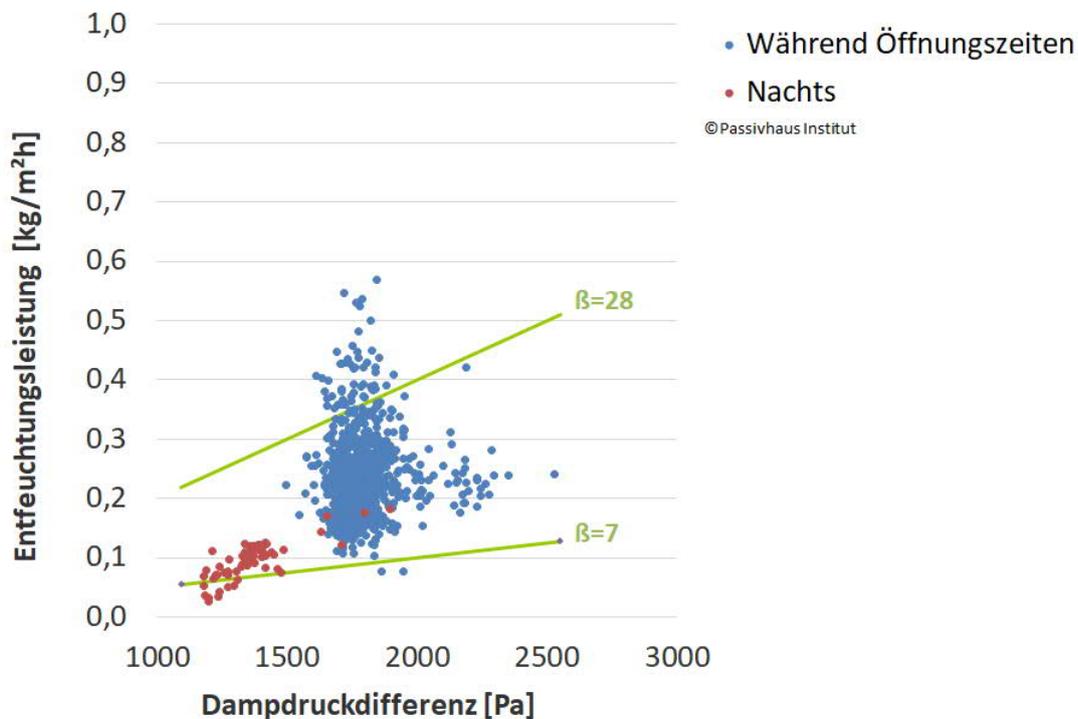


Abb. 83: Berechnete Entfeuchtungsleistung des Lüftungsgeräts der Halle 3 im Jahr 2016 (ohne Sommerpause). Die grünen Linien geben den Erwartungswert nach VDI bei den gemessenen mittleren Hallenbedingungen an: 30°C Wassertemperatur, 32°C Lufttemperatur

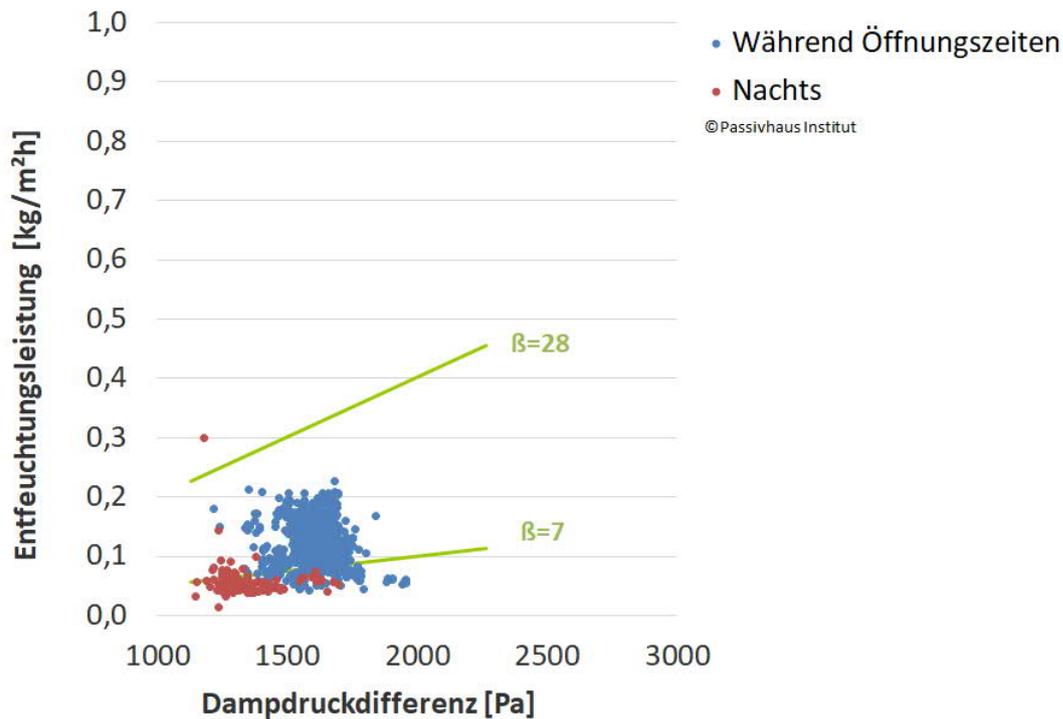


Abb. 84: Berechnete Entfeuchtungsleistung des Lüftungsgeräts der Halle 4 im Jahr 2016 (ohne Sommerpause). Die grünen Linien geben den Erwartungswert nach VDI bei den gemessenen mittleren Hallenbedingungen an: 28°C Wassertemperatur, 30°C Lufttemperatur

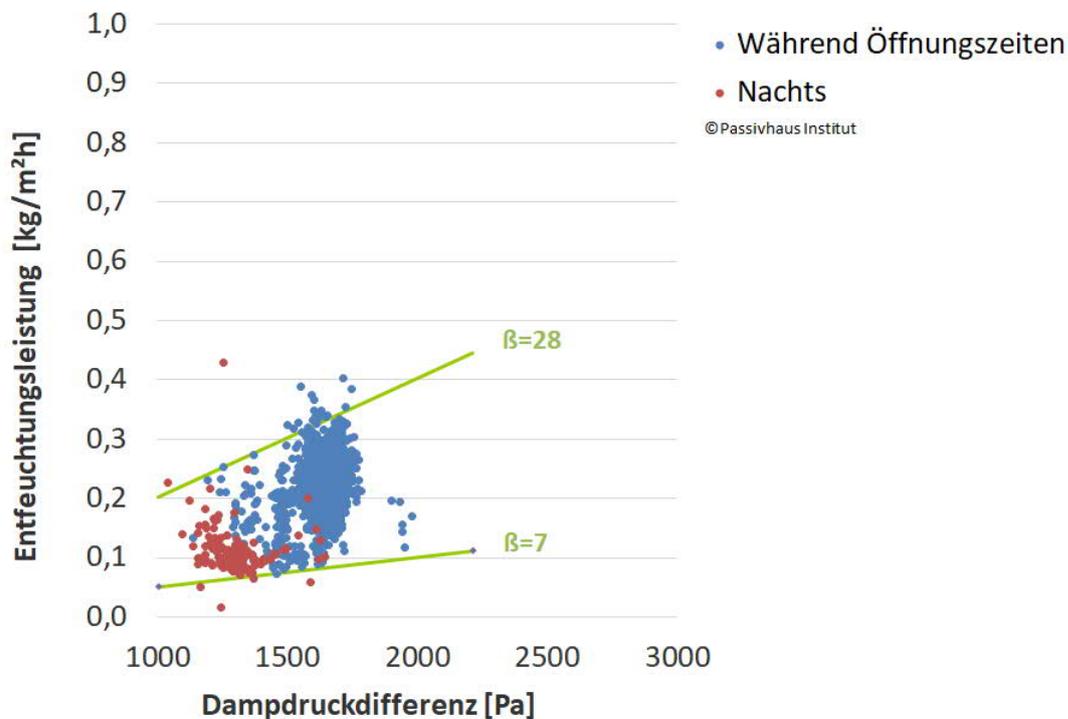


Abb. 85: Berechnete Entfeuchtungsleistung des Lüftungsgeräts der Halle 5 im Jahr 2016 (ohne Sommerpause). Die grünen Linien geben den Erwartungswert nach VDI bei den gemessenen mittleren Hallenbedingungen an: 28°C Wassertemperatur, 30°C Lufttemperatur

Tab. 16: Ergebnisübersicht der im Lippe-Bad ermittelten Verdunstungsraten 2016.

***Für Halle 4+5 sind die Ergebnisse als flächengewichtetes Mittel der beiden Becken angegeben, da die beiden Hallen im räumlichen Verbund stehen und nicht separat betrachtet werden können.**

	Becken 1+2	Becken 3	Becken 4+5*
Entfeuchtungsleistung tagsüber [kg/(hm ²)]	0,31	0,23	0,17
Äquivalentes β [m/h]	17	18	15
Entfeuchtungsleistung nachts [kg/(hm ²)]	0,15	0,08	0,09
Äquivalentes β [m/h]	11	7	9

Referenzwerte

Die Datenauswertung für das Lippe-Bad bestätigt im Wesentlichen die Erkenntnisse aus [Peper/Grove-Smith 2013] und [Gollwitzer et al. 2015]. Für die Berechnung der mittleren Verdunstungsmengen während der Nutzungszeiten kann ein mittlerer Wasserübergangskoeffizient von $\beta = 15$ m/h verwendet werden. Dies entspricht in etwa 50% der Auslegung nach VDI 2089 für Sportbecken ($\beta = 28$ m/h). Wie auch in den vorherigen Untersuchungen konnte im Lippe-Bad kein bedeutender Unterschied zwischen den Wasserübergangskoeffizienten der unterschiedlichen Beckentypen identifiziert werden; die Differenzen der einzelnen Becken liegen im Rahmen der Auswertungsunsicherheiten. Dies bekräftigt die Untersuchungen und Beschreibungen in 6.1 "Auslegung der Schwimmhallen-Lüftungsgeräte", dass die höheren Stoffübergänge nach VDI 2089 ($\beta = 40$) für flache Becken mit Vorsicht anzuwenden sind.

8.5 Energieverbrauch Erwärmung Beckenwasser

Für die Beckenwassererwärmung des Lippe-Bades wurden im Zeitraum 2013-2017 41% des Gesamtwärmeverbrauchs benötigt (siehe Kapitel 3.1 "Langzeit Wärmeverbrauch"). Für diesen Hauptverbraucher gilt es die Energiebilanz möglichst gut zu verstehen, um Einsparpotentiale identifizieren und ausschöpfen zu können. Bereits im Rahmen des ersten Monitoring-Zeitraums im Lippe-Bad 2012/2013 wurden die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Energiebilanz des Beckenwassers im Detail analysiert ([Peper/Grove-Smith 2013] S.95 ff.). Abb. 86 stellt schematisch die verschiedenen Einflussfaktoren dar, die zu Wärmegewinnen oder Wärmeverlusten führen. Die aufgeführte Solarstrahlung wird in den folgenden Berechnungen vernachlässigt, da die Becken innerhalb des Gebäudes wenig direkter Strahlung ausgesetzt sind.

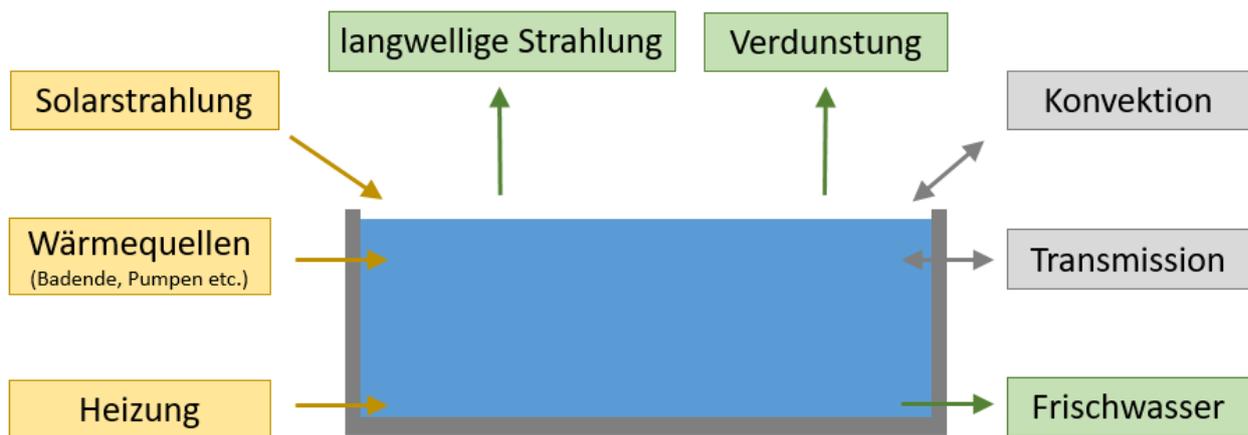


Abb. 86: Die wesentlichen Parameter für die Energiebilanz eines Schwimmbeckens (Hallenbad).

Ein Ziel im Rahmen dieses Projektes waren Richtwerte für energieeffiziente Lösungen, sowie verlässliche Berechnungsgrundlagen zu ermitteln. Für die Analysen wurden Messdaten aus dem Jahr 2016 heran gezogen. In Tab. 17 sind die entsprechenden Verbräuche der drei Beckenkreisläufe des Lippe-Bades als absolute und spezifische Werte aufgelistet.

Tab. 17: Übersicht der drei Beckenkreisläufe und deren Heizwärmeverbrauch im Jahr 2016.

	Becken 1+2	Becken 3	Becken 4+5
Wasserfläche [m^2_{WF}]	175	100	575
Wasservolumen [m^3]	185	230	1074
Mittlere Temperatur [$^{\circ}C$]	32	30	28
Heizwärmeverbrauch [MWh/a]	203,3	31,1	124,5
Spezifischer Heizwärmeverbrauch [$kWh/(m^2_{WFA})$]	1162	311	217
Äquivalente spezifische mittlere Heizleistung [W/m^2_{WF}]	133	36	25

In Abb. 88 bis Abb. 92 sind die berechneten Energiebilanzen der einzelnen Beckenkreisläufe dargestellt, im Vergleich zu den monatlichen Messdaten des Heizwärmeverbrauchs. Für die Berechnungen wurden folgende Annahmen getroffen (siehe auch [Peper/Grove-Smith 2013]):

- Temperaturen und relative Raumlufffeuchten entsprechend den monatsmittleren Messdaten
- Verdunstung entsprechend 80% der aus den Messdaten ermittelten Entfeuchtungsleistung über die jeweiligen Lüftungsanlagen (siehe Kapitel 8.4).

- Beckenbelegung basierend auf den Messdaten der Personenzählung im Becken 1+2. Diese wurden über die Wasserflächen und Nennbelastungsfaktoren auf Becken 3 und Becken 4+5 übertragen. 700 W Wärmeabgabe je Badegast für alle Becken.
- Frischwasser entsprechend der monatlichen Messdaten (vgl. Kapitel 8.2.)
- Füllwasser aus Spülabwasseraufbereitung entsprechend der Messdaten (vgl. Kapitel 8.3)
- Wärmerückgewinnung aus Abwasser der Spülabwasseraufbereitung für Becken 1+2 und Becken 3: Effektiver Wärmebereitstellungsgrad ca. 7%. Dies folgt aus einer Abschätzung basierend auf 70% Effizienz des Wärmetauschers, sowie Berücksichtigung dass nur aus einem geringen Teil des Abwassers Wärme zurück gewonnen wird (Lippe-Vorflut) und dies nicht immer zeitgleich mit der Frischwassernachspeisung zusammen fällt.
- 90% der gemessenen Stromaufnahme der Umwälzpumpen als Wärmeabgabe an das Beckenwasser (vgl. Kapitel 8.1)
- Als abgeschätzter Aufschlag für zusätzliche Wärmegewinne (weitere Schwimmbadtechnik, Beleuchtung etc.): Weitere 50% der Stromaufnahme der Umwälzpumpen
- Konvektion an der Wasseroberfläche und Transmission durch die Beckenwände entsprechend der physikalischen Zusammenhänge (siehe [Peper/Grove-Smith 2013] für nähere Erläuterungen).
- Für die Einflüsse der langwelligen Strahlung ist im Wesentlichen die Oberflächentemperatur der Decken relevant, die aber nicht gesondert gemessen wurde. Haupteinflussfaktoren sind an dieser Stelle die Temperaturschichtung (Abhängig von der Luftführung), als auch die Dämmstärke des Daches (Transmissionsverluste). Als Näherung wurde die Lufttemperatur der Halle als Umgebungstemperatur angesetzt.

Die Tendenzen im Jahresverlauf zwischen Berechnung und Messdaten stimmen für alle drei Beckenkreisläufe gut überein (siehe Abb. 88, Abb. 90 und Abb. 92). Im Falle von Becken 1+2 (Abb. 87), dem Beckenkreislauf mit dem höchsten spezifischen Heizwärmeverbrauch, ist die berechnete mittlere Heizleistung 4 W/m^2 höher als der gemessene Wert (3% Abweichung). Im Fall von Becken 3 (Abb. 89) und Becken 4+5 (Abb. 91) liegen die berechneten Werte um 20 bzw. 25 W/m^2 höher als die mittlere gemessene Heizleistung (Überschätzung um 57% für Becken 3 und 96% für Becken 4+5). Die Ursache dieser nicht unerheblichen Abweichungen konnten nicht endgültig geklärt werden, da die Nutzungs- und Randbedingungen nicht näher bestimmt werden können. Wie in den Energiebilanzen erkennbar, hat z.B. die Wärmeabgabe der Badenden einen erheblichen Einfluss. Die tatsächliche Beckenbelegung ist jedoch nicht bekannt, und die Wärmeabgabe pro Person kann auch nur abgeschätzt werden. Es ist durchaus möglich, dass die Wärmeabgabe bei sportlicher Aktivität höher liegt (vgl. Analysen in [Peper/Grove-Smith 2013]).

Die allgemeinen Tendenzen und Einflussfaktoren können mit einem neu entwickelten Berechnungstool für die Beckenwasser-Energiebilanz im Einzelnen abgebildet werden. Dies kann als hilfreiche Unterstützung bei der Planung dienen, um die energetischen Auswirkung der Randbedingungen (z.B. Temperatur und Feuchte), sowie der ausgewählten Komponenten (z.B. Filtertechnik und entsprechender Spülwasserbedarf) besser zu verstehen.

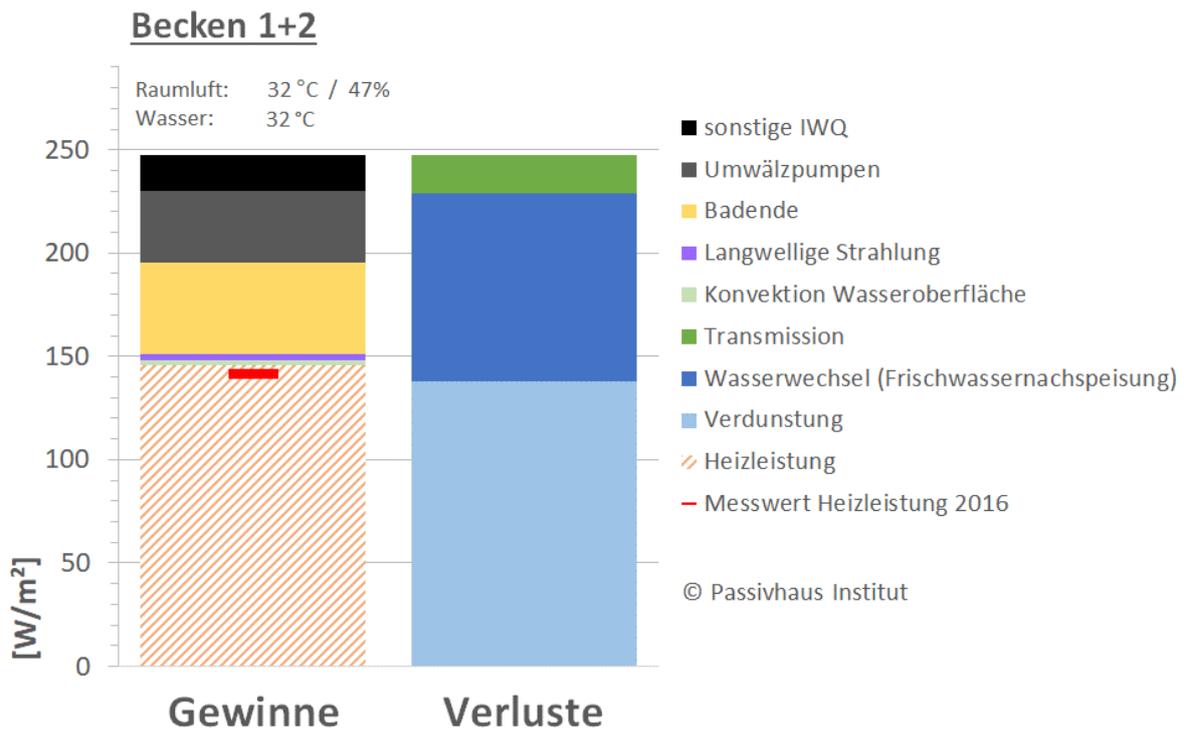


Abb. 87: Berechnete Energiebilanz für das Becken 1+2 unter den gemessenen Betriebsrandbedingungen des Jahres 2016 (ausgenommen Sommerpause Juli und August). (Anmerkung: Die Effekte der Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser, sowie das Füllwasser aus der Spülabwasseraufbereitung sind in der Frischwassernachspeisung berücksichtigt).

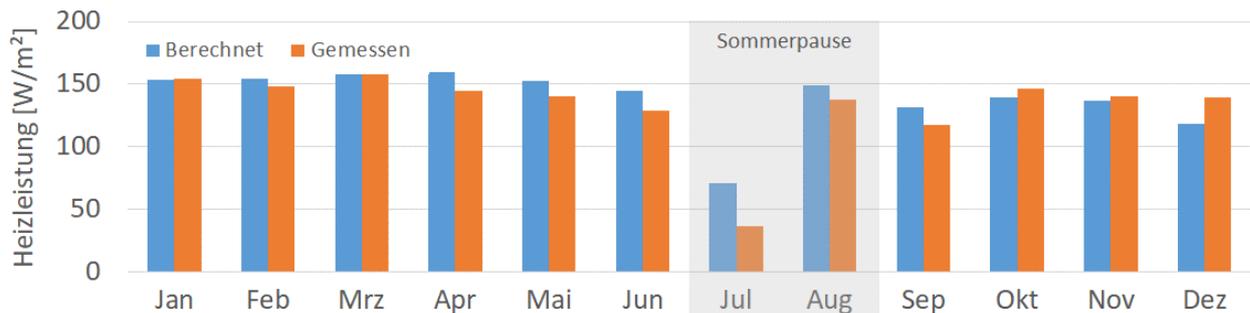


Abb. 88: Die berechnete monatliche Heizleistung für Becken 1+2 im Vergleich zu den Messdaten von 2016.

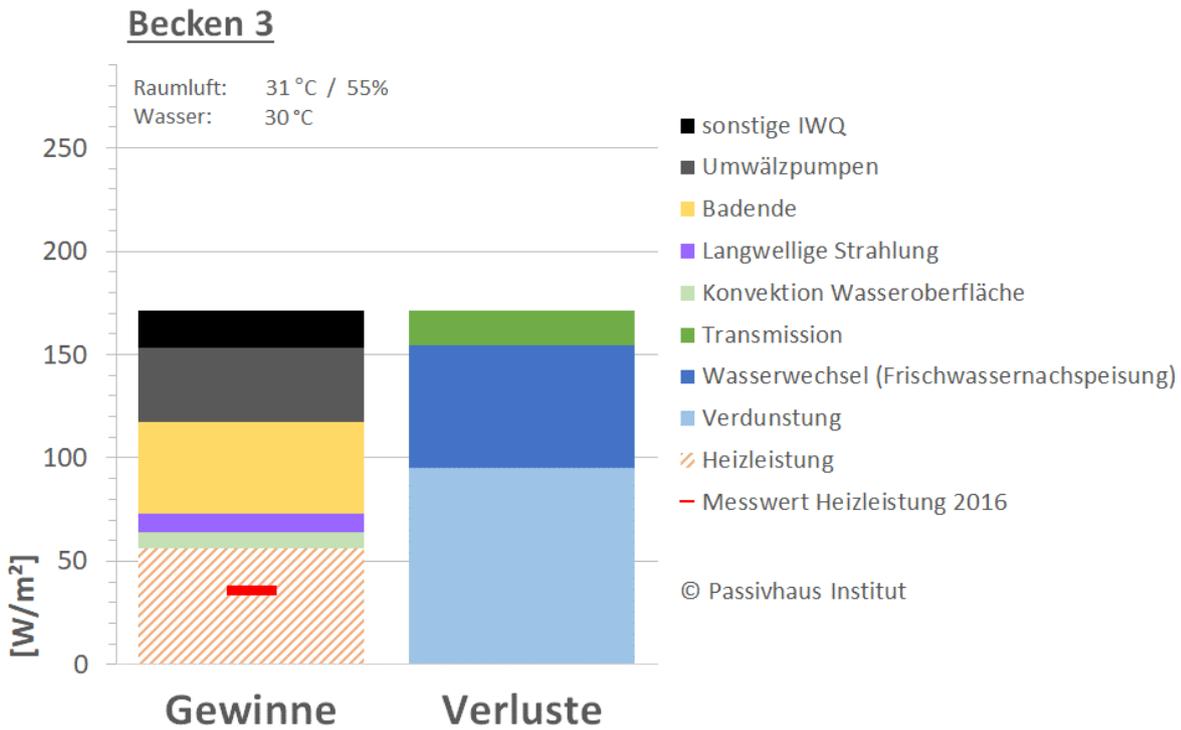


Abb. 89: Berechnete Energiebilanz für das Becken 3 unter den gemessenen Betriebsrandbedingungen des Jahres 2016 (ausgenommen Sommerpause Juli und August). (Anmerkung: Die Effekte der Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser, sowie das Füllwasser aus der Spülabwasseraufbereitung sind in der Frischwassernachspeisung berücksichtigt).

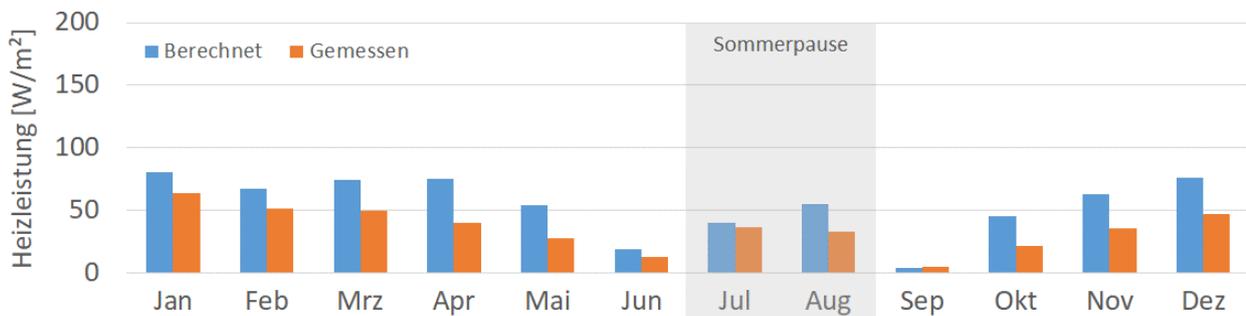


Abb. 90: Die berechnete monatliche Heizleistung für Becken 3 im Vergleich zu den Messdaten von 2016.

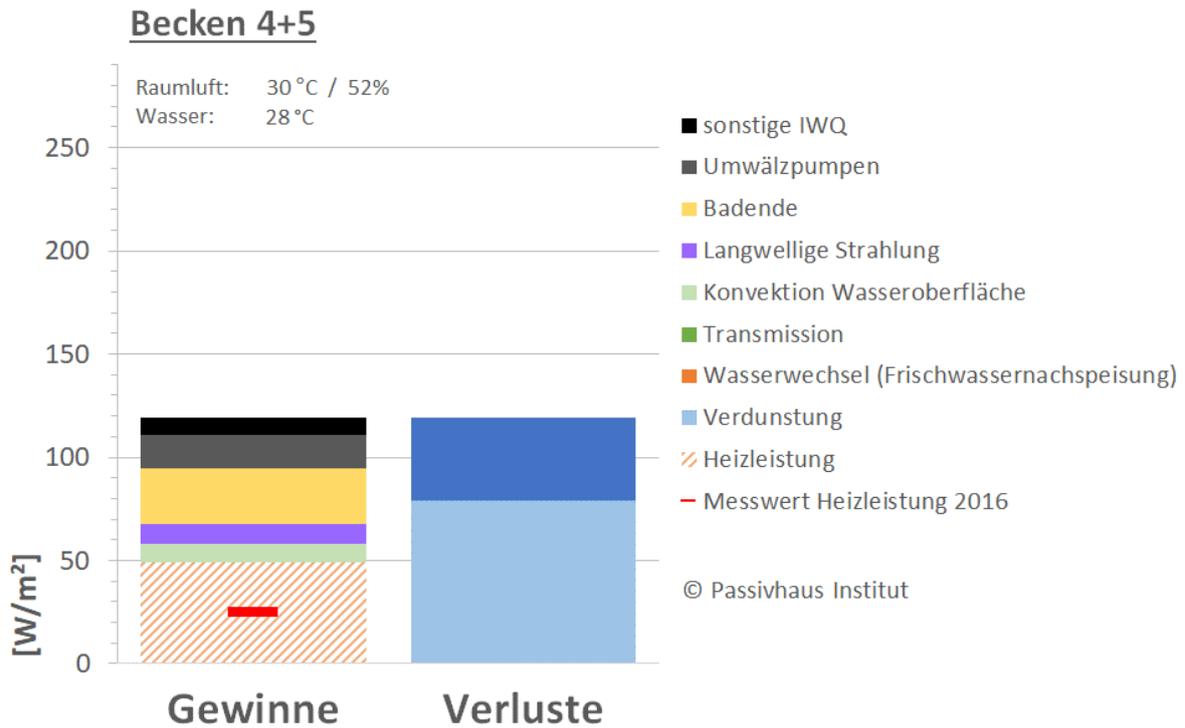


Abb. 91: Berechnete Energiebilanz für die Becken 4+5 unter den gemessenen Betriebsrandbedingungen des Jahres 2016 (ausgenommen Sommerpause Juli und August). (Anmerkung: Die Effekte der Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser, sowie das Füllwasser aus der Spülabwasseraufbereitung sind in der Frischwassernachspeisung berücksichtigt).

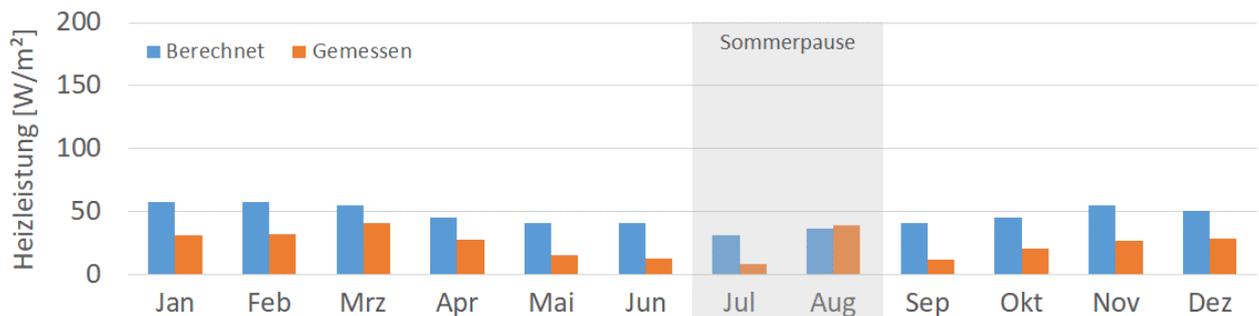


Abb. 92: Die berechnete monatliche Heizleistung für Becken 4+5 im Vergleich zu den Messdaten von 2016.

Im Allgemeinen ist der spezifische Heizwärmeverbrauch für Schwimmerbecken in der Regel niedriger als für Nichtschwimmer-, Spaß- und Freizeitbecken (siehe auch [Gollwitzer et al. 2015]). Das ist zum einen aufgrund der niedrigeren Temperaturen nachvollziehbar (typischerweise 28°C, bei Freizeitbecken 30-32°C), die zugleich mit niedrigeren Verdunstungsraten einhergehen. Zusätzlich haben Schwimmerbecken eine niedrigere Personen-Belastung, wodurch der Umwälzvolumenstrom und die Filterflächen kleiner ausgelegt werden können und demnach auch der spezifische Frischwasserverbrauch vergleichbar gering ist. In Abb. 93 sind als Beispiel zwei Energiebilanzen, im Vergleich für ein Schwimmerbecken und einer Nichtschwimmerbecken bei 55% Raumlufffeuchte, aufgeführt. Hierfür wurden die Richtwerte aus den vorherigen Kapiteln eingesetzt (z.B. Strombedarf der Umwälzpumpe, hygienischer Frischwasserbedarf, Beckenbelegung). Diese Beispielfälle dienen als Indikator für die zu erwartende Heizleistung für Becken abgeleitet. Im Beispiel: ca. 50 W/m² bzw. ca. 430 kWh/(m²a) für das Sportbecken und 80 W/m² bzw. ca. 700 kWh/(m²a) für das Nichtschwimmerbecken. Zudem ist deutlich zu erkennen, dass die Verdunstung einen Großteil der Wärmeverluste ausmacht, sowie dass die Wärmequellen im Wasser (durch Badende und Schwimmbadtechnik) einen erheblichen Einfluss haben. Je höher der Stromverbrauch der Pumpen (und somit die Abwärme an das Beckenwasser), desto niedriger der Heizbedarf für das Beckenwasser - obwohl das Gesamtsystem ineffizienter sein kann. Dies erschwert eine unabhängige Bewertung der erreichten Effizienz der Beckenwassererwärmung anhand reiner Verbrauchswerte, und damit auch die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Bädern. Die Beispiele verdeutlichen zudem, dass Maßnahmen zur Reduktion des Heizwärmebedarfs, z.B. Wärmerückgewinnung oder Spülabwasseraufbereitung insbesondere für Freizeitbecken interessant sind.

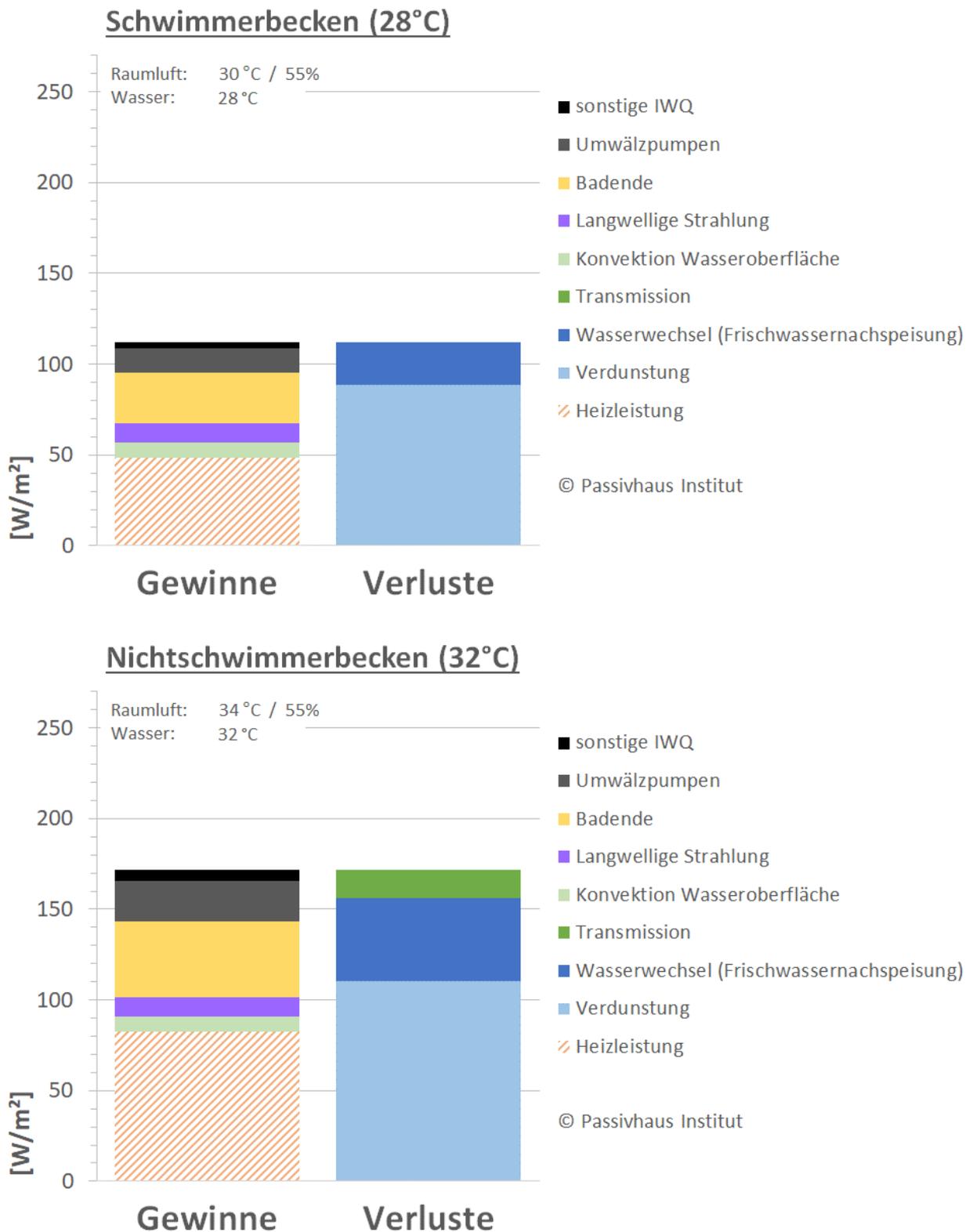


Abb. 93: Beispiele von Energiebilanzen für ein Schwimmerbecken und Nichtschwimmerbecken. Der spezifische Heizwärmebedarf ist für Nichtschwimmerbecken auf Grund der höheren Wassertemperatur und höheren Personen-Belastung in der Regel höher.

8.6 Lippe-Bad: Duschnutzung

Bei der Planung eines Hallenbades muss die Anzahl der Sanitärobjekte festgelegt werden. Für das Lippe-Bad ergeben sich nach den KOK-Richtlinien auf Grund der Wasserfläche des Lippe-Bades (850 m²) die folgenden Zahlen (ohne Sanitärräume für Personal):

- nach [KOK 2002]: 34 Duschen, 2 Damen WCs, 1 Herren WC und 2 Urinale
- nach [KOK 2013]: 29 Duschen, 3 Damen WCs, 2 Herren WCs und 3 Urinale

Mit 33 Duschen, 3 Damen WCs, 2 Herren WCs, 2 Urinalen und 2 separaten WCs liegt das Lippe-Bad in der Größenordnung der Richtlinien.

Für die Analyse der Duschnutzung im Lippe-Bad wurde Vorort eine Durchflussmessung durchgeführt und per Fernzugriff wurden Protokolle der Duscharmatur-Software ausgewertet. Der Durchfluss von drei Duschköpfe wurde am 11.01.2017 nachgemessen, indem das Wasser in einem Eimer aufgefangen und ausgelitert wurde. Es ergab sich ein Durchfluss von ca. 6 l/min. Damit konnte der gute Wert aus den Produktdaten sehr gut bestätigt werden.



Herrenduschen Messung 11.1.2017				
	sec	Liter	l/min	Mittelwert l/min
Dusche a	30,38	3,00	5,9	
	30,31	2,90	5,7	
	30,35	2,80	5,5	
	30,34	3,13	6,2	
	30,29	3,05	6,0	5,9
Dusche b	30,50	3,30	6,5	
	30,41	3,40	6,7	
	30,50	3,40	6,7	6,6
Dusche c	30,63	3,45	6,8	6,8
				6,4

Abb. 94: Durchflussmessung Duschen und Protokoll der Messung

Im Lippe-Bad werden verschiedene Daten der Armaturen mit der Software Aqua von Franke erfasst. Per Fernzugriff konnte die Software einsehen und Zählerstände ablesen werden. Da die Zähler bei 65.536 (z.B. 65.536 Sekunden Laufzeit, entspricht 18,2 Stunden) wieder auf Null springen, waren nur kurze Auswertungszeiträume möglich. Vom 5.12. bis 12.12.2016 wurden jeweils mittags an den Werktagen die Werte von allen 63 Armaturen abgelesen. Das folgende Diagramm zeigt die Verteilung der Laufzeiten auf öffentliche Duschen, Personalduschen und Waschtische/WCs.

Die Auswertung für die öffentlichen Duschen ergibt eine durchschnittliche Duschkdauer von 4 Minuten pro Besucher. Die Personalduschen laufen durchschnittlich 18 Minuten pro Tag. Die Verschlusszeiten der Armaturen waren für die öffentlichen Duschen überwiegend auf 30 Sekunden eingestellt. Setzt man den beispielhaft ausgeliterten Durchfluss von 6,4 l/min an, so ergibt sich pro

Badegast ein Wasserverbrauch von ca. 26 Litern für das Duschen. Dabei wird das Duschwasser aus veränderlichen Teilen aus Warm- und Kaltwasser gemischt. Für das Jahr 2016 errechnet sich bei 241.274 Badegästen ein Duschwasserverbrauch von ca. 6.177 m³. Das entspricht etwa 21 % des Gesamtwasserverbrauchs des Bades.

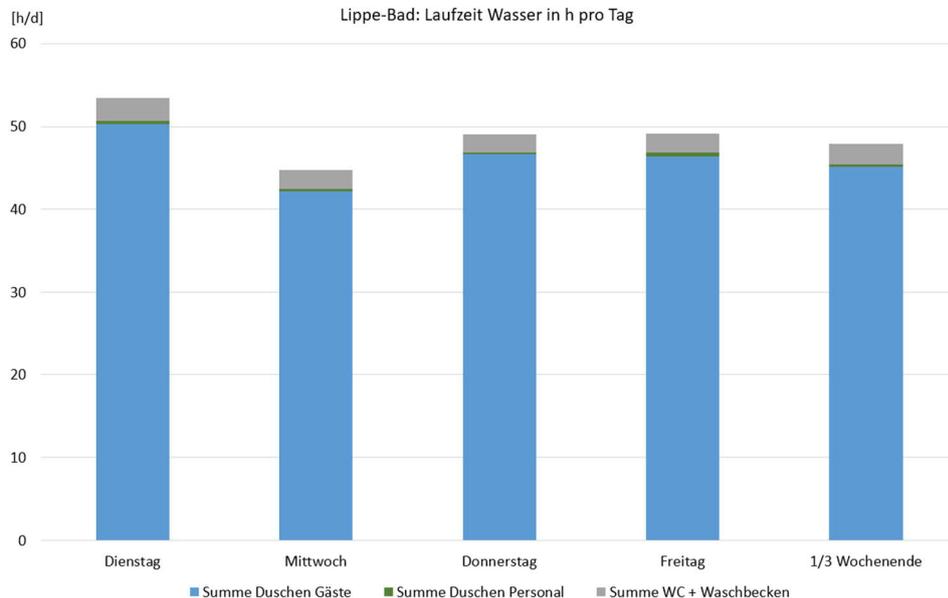


Abb. 95: Summierte Laufzeit aller Armaturen im Lippe-Bad pro Tag. (Die Werte des rechten Balkens "1/3 Wochenende" zeigen ein Drittel des Messzeitraums Freitag Mittag bis Montag Mittag)

Die Auswertung der einzelnen Armaturen zeigt, dass die Duschplätze - wie zu erwarten - nicht gleichmäßig benutzt werden (siehe Abb. 96). Wahrscheinlich werden diese auf Grund der unterschiedlichen Lage im Raum stärker oder schwächer frequentiert.

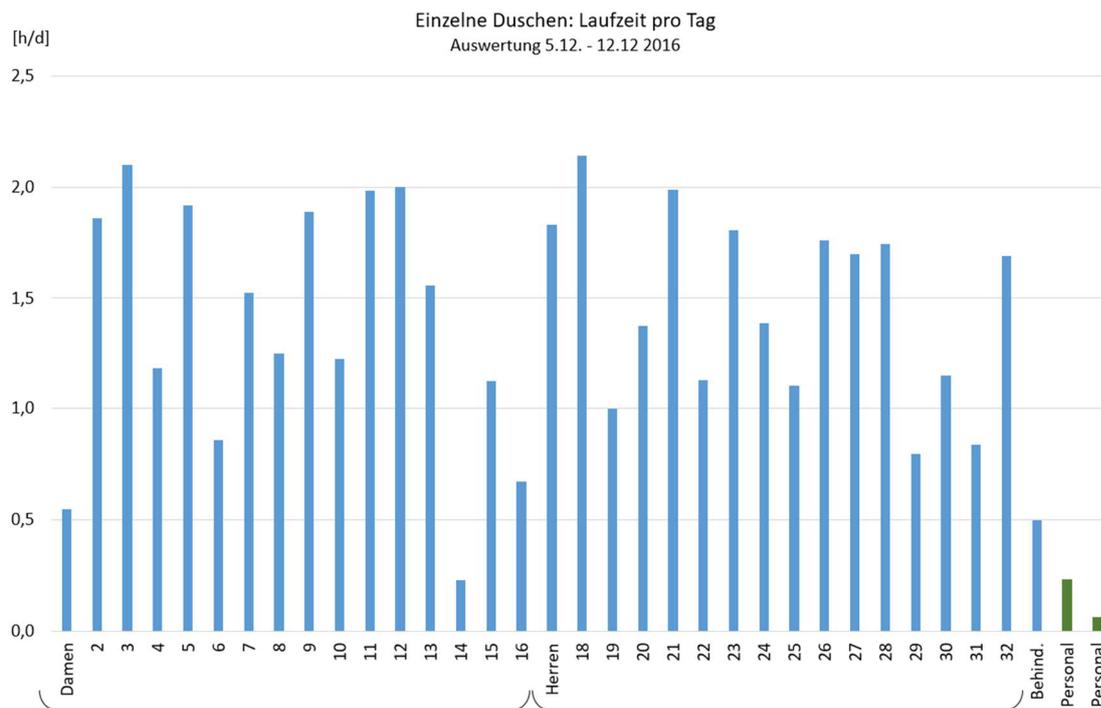


Abb. 96: Unterschiedliche Nutzung der Duschplätze im Lippe-Bad; dargestellt sind die durchschnittlichen Laufzeiten je Duscharmatur im Zeitraum 5.12. bis 12.12.2016.

9 Kosten-Nutzen-Analyse

Die Möglichkeiten zur Energie- und Wassereinsparung in Hallenbädern sind vielseitig und mit unterschiedlichem Kosten- und Arbeitsaufwand verbunden. Während einige Maßnahmen im Wesentlichen lediglich eine Anpassung der Regelungsstrategie benötigen (z.B. bedarfsgerechte Lüftung), erfordern andere Maßnahmen eine Anpassung der Komponenten mit z.T. erhöhten Investitionskosten. Für die Entscheidungsfindung ist für den Bauherren oft ausschlaggebend, ob diese zusätzlichen Investitionskosten wirtschaftlich sind. Als Hilfestellung für die Planung wurden für den vorliegenden Bericht einige Maßnahmen im Bereich der Gebäudetechnik ausgewählt und hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit analysiert. Die Analyse erfolgte in Zusammenarbeit vom Ingenieurbüro ENERATIO (TGA Planer des Lippe-Bades) mit dem Passivhaus Institut. Es wurden zum Teil Erfahrungswerte des Lippe-Bades und zum Teil Referenzanalysen anhand eines typischen 25 m Sportbeckens verwendet. Dieses Kapitel enthält eine Beschreibung der betrachteten Maßnahmen und der daraus gewonnenen Erkenntnisse. Eine Übersicht der Ergebnisse sind in Tab. 18 und Abb. 97 dargestellt. Im Folgenden werden weiterführende Informationen zu den einzelnen Maßnahmen beschrieben, sowie die Annahmen und Randbedingungen für die Kostenanalyse dokumentiert.

Diese Analysen sind als Beispiele und Richtwerte anzusehen. Da sich die Randbedingungen und tatsächlichen Maßnahmen im Detail bei jedem Projekt unterscheiden, sind diese Ergebnisse nicht direkt übertragbar.

Tab. 18: Ergebnisübersicht der Kosten-Nutzen-Analyse.

Maßnahme	alle Kostenangaben in €/a		
	Betriebskostensparnis	Kapital- und Erhaltungskosten	Kosteneinsparung
Auswertungen am Beispiel Lippe-Bad			
Spülwasseraufbereitung	31.400	8.400	23.000
Abwärmenutzung BHKW	26.200	4.100	22.100
Reduzierte WW-Temperatur (Zirkulation)	300	5.500	-5.200
Auswertungen für ein typisches 25m Sportbecken			
Wassersparende Duschköpfe	6.800	300	6.500
Erhöhung Schwallwasserbehälter (1m)	1.200	100	1.100
Reduzierte Druckverluste Rohrleitungsnetz	1.900	400	1.500
Reduzierte Umwälzung: durchgängig auf 85%	4.600	100	4.500
Reduzierte Umwälzung: 85% Teillast nachts	1.500	100	1.400
Spülwasseraufbereitung: Füllwasser für Becken	7.300	15.200	-7.900
Spülwasseraufbereitung: Vorfluteinspeisung	4.100	3.800	300
WRG Filterspülwasser mit Wärmetauscher	1.600	800	800
WRG Filterspülwasser mit Wärmepumpe	1.100	4.200	-3.100

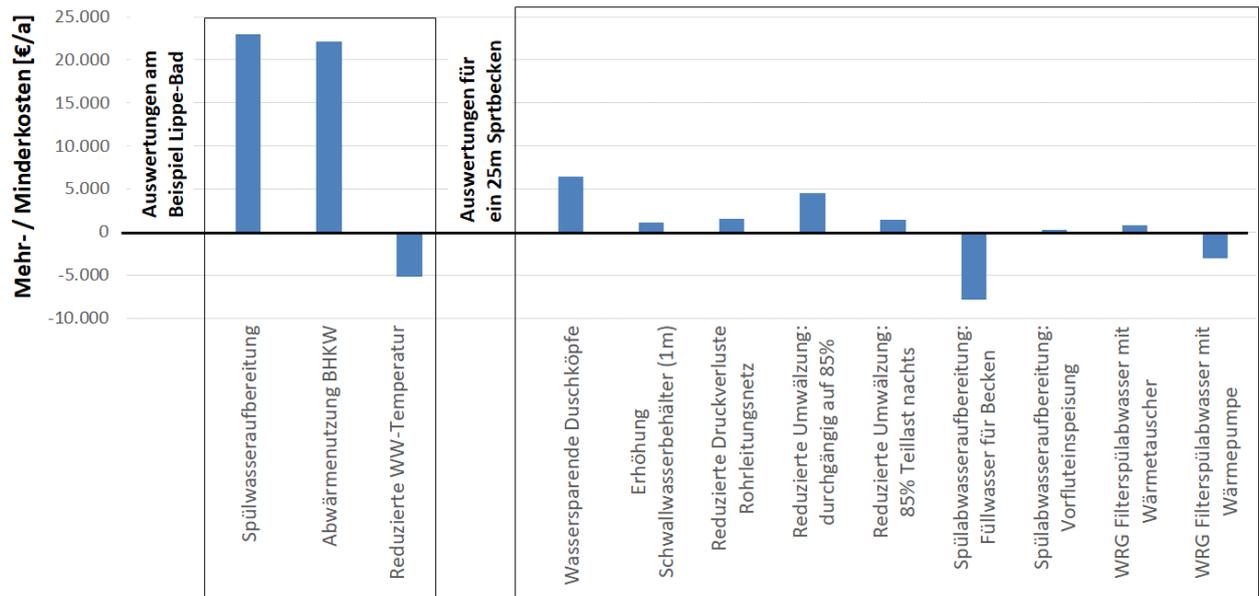


Abb. 97: Ergebnisübersicht der Kosten-Nutzen-Analyse: Eingesparte Kosten pro Jahr. Je höher der Wert, desto mehr lohnt sich die Maßnahme aus wirtschaftlicher Sicht. Negative Werte entsprechen jährlichen Mehrkosten, d.h. die Maßnahme ist nicht wirtschaftlich.

Randbedingungen

Es werden folgende Energiepreise angenommen:

Strom [€/kWh]	Wasser [€/m ³]	Abwasser [€/m ³]	Gas [€/kWh]	Wärme [€/kWh]
0,25	1,5	2,45	0,09	0,05

Den Berechnungen liegt ein Zinssatz von 3% zugrunde. Die Nutzungsdauer wird für die einzelnen Maßnahmen unterschiedlich angesetzt, gemäß VDI 2067. Als Unterhaltungskosten werden, wenn nicht anders vermerkt, 1% der Investitionskosten angesetzt.

Eckdaten zum verwendeten Referenzbecken:

- Sportbecken: 25 m x 12,5 m, 28°C
- Nutzungszeit: 14 h/Tag, 365 Tage im Jahr
- Jahresmittlere Kaltwassertemperatur = 10 °C
- 140 m³/h Umwälzvolumen (Aufbereitungsfaktor 0,5 & Nennbelastung 0,222 P/h) mit 5 840 h/Jahr Vollastbetrieb
- Teillastreduktion der Umwälzung auf 75 m³/h außerhalb der Öffnungszeiten
- Pumpenwirkungsgrad 68% (gesamt inkl. Motor & FU)
- Niederdruckfiltration mit insgesamt 3,4 mWS Druckverlusten für die Rohwasserpumpe und 8,1 mWS für die Filtratpumpe

9.1 Spülabwasseraufbereitung

Spülabwasseraufbereitung im Lippe-Bad

Die im Lippe-Bad installierte Spülabwasseraufbereitungs-Anlage ist mit einer jährlichen Kosteneinsparung von ca. 23.000 €/a wirtschaftlich sehr attraktiv (siehe Abb. 98). Für die monetäre Auswertung wurden die Gesamt-Investitionskosten von 65.000 € mit den Betriebskostensparnissen gegen gerechnet. Hierfür wurden Messdaten aus dem Jahr 2016 heran gezogen (siehe Kapitel 8.3 "Lippe-Bad: Spülwasseraufbereitung"). Die Hauptersparnisse werden durch die Vermeidung von Abwasserkosten erzielt, mit einer Einsparung von ca. 9.500 m³ bzw. 23.400 € im Jahr 2016. Hinzu kommen Kostenersparnisse durch a) die Einsparung von 4.410 m³/a Frischwasser, dank der Nutzung des aufbereiteten Wassers als Brauchwasser und als Füllwasser für die Beckenkreisläufe und b) 74 MWh/a Heizwärmeeinsparung durch teilweise Wärmerückgewinnung und teilweise Wiederverwendung als Füllwasser. Der benötigte Stromeinsatz um die Anlage zu betreiben fällt kaum ins Gewicht.

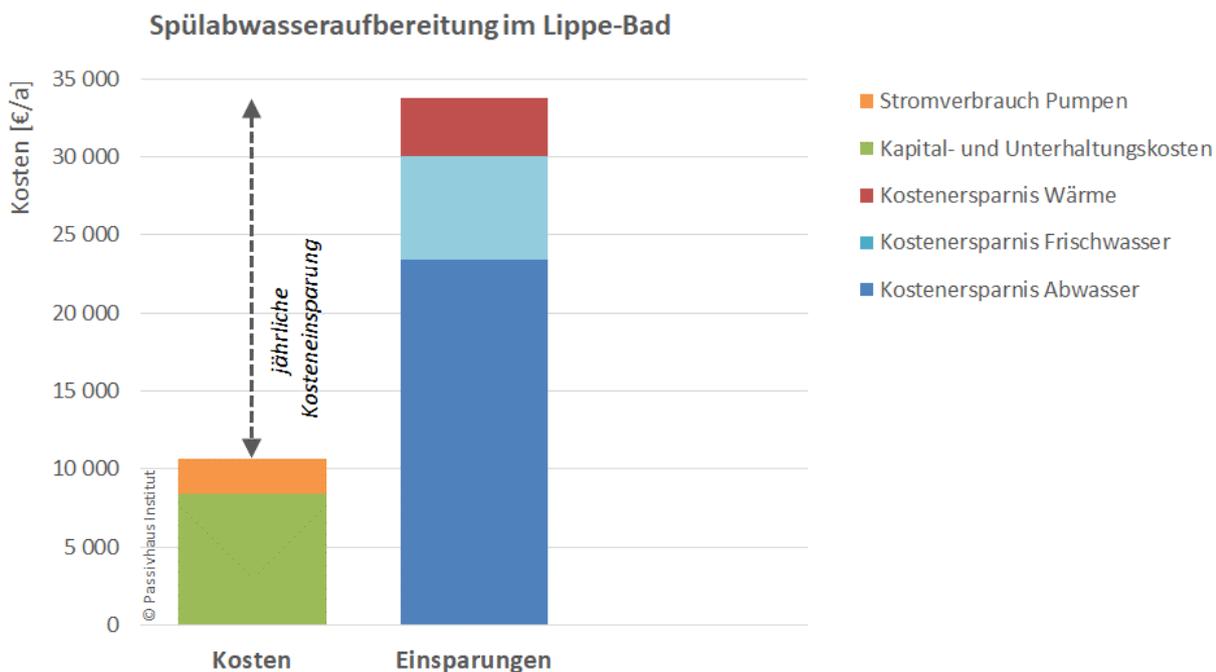


Abb. 98: Kosten-Nutzen-Analyse der Spülwasseraufbereitungsanlage im Lippe-Bad.

Ein wesentlicher Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit einer Spülabwasseraufbereitungsanlage ist die gewählte Filter- und Desinfektionstechnologie. Diese beeinflussen nicht nur die Menge an anfallendem Spülwasser, sondern auch die Konfiguration der Spülabwasseraufbereitungsanlage an sich. Zum Beispiel ist durch die Ultrafiltration im Lippe-Bad keine zweite Virenbarriere notwendig, um das aufbereitete Wasser als Füllwasser wieder in die Beckenkreisläufe einspeisen zu können. Ist diese zusätzliche Barriere aus hygienischer Sicht erforderlich, so fallen die Investitionskosten für die Spülabwasseraufbereitung deutlich höher aus und somit verschiebt sich die Wirtschaftlichkeit der Gesamtmaßnahme.

Bedingt durch die Einsparung der vergleichbar hohen Abwasserkosten lässt sich eine Wasseraufbereitungsanlage zur Direkteinspeisung in ein Gewässer in der Regel wirtschaftlich gut darstellen (z.B. in Vorflut im Lippe-Bad). Eine Aufbereitung zur Nutzung als Füllwasser für die Beckenkreisläufe hingegen, ist technisch aufwändiger und teurer (höhere Ansprüche an die Wasserqualität). Als Ausblick für die Wirtschaftlichkeit unter anderen Randbedingungen wurden zwei ergänzende theoretische Berechnungen für das Referenz-Sportbecken durchgeführt.

Typ 1: Beckenfüllwasser, Beispiel-Sportbecken

Im Referenzfall fallen für das 25 m Sportbecken jährlich ca. 2.200 m³ Abwasser durch die Filterspülungen an (zwei Filter mit 11 m³ je Spülung und zwei wöchentlichen Spülungen). Es wird angenommen, dass 70% dieses Filterwassers aufbereitet und als Füllwasser wieder dem Beckenkreislauf zugeführt werden können. Dadurch können ca. 33 MWh/a Heizenergie eingespart werden, sowie ca. 1.600 m³/a an Frischwassernachspeisung und Abwasser. Diesen Einsparungen stehen jedoch hohe Investitionskosten für die notwendige technische Ausstattung der Aufbereitungsanlage gegenüber, um die notwendige Füllwasserqualität sicherstellen zu können. Dies beinhaltet u.A. Druckerhöhungspumpen, Vorfilter, Ultrafiltration, Umkehrosmose, sowie ergänzende Auffangbehälter und wurde insgesamt mit einer Investition von 111.500 € abgeschätzt. Unter diesen Randbedingungen ist der Ansatz einer Spülabwasseraufbereitung zur ausschließlichen Nutzung als Beckenfüllwasser für ein einzelnes Sportbecken nicht wirtschaftlich (siehe Abb. 99). Hinweis: Im Lippe-Bad waren die hohen zusätzlichen Investitionen nicht nötig, daher ist keine Vergleichbarkeit mit der vorherigen Untersuchung gegeben.

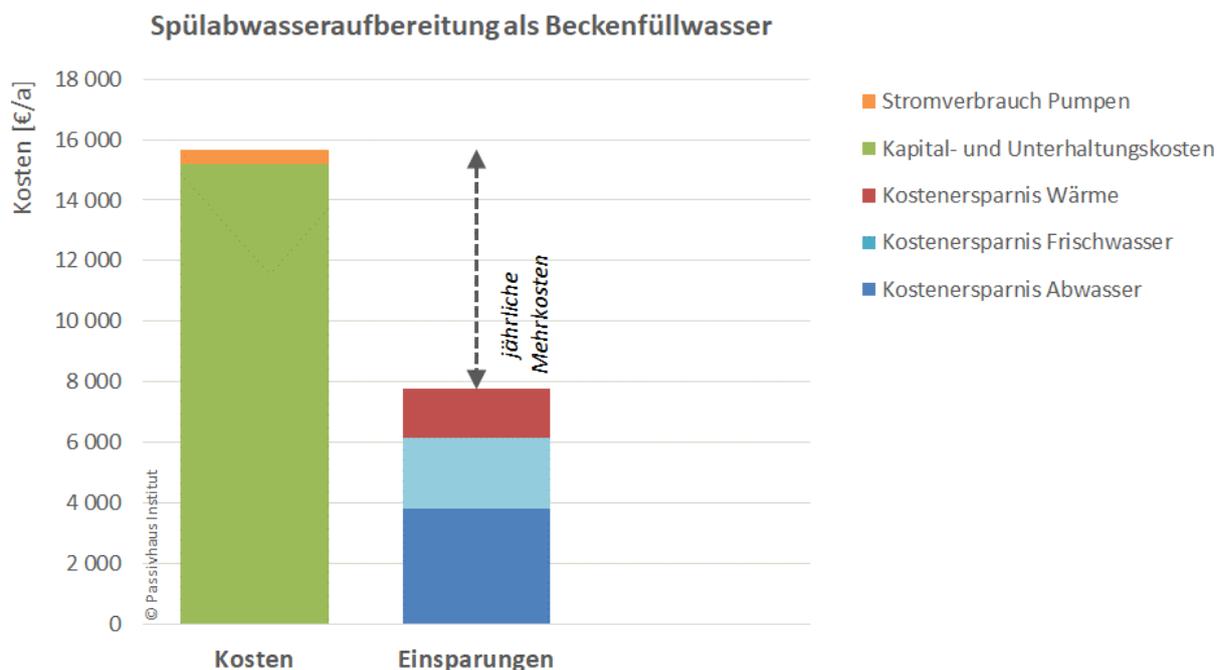


Abb. 99: Beispiel einer Kosten-Nutzen-Analyse einer Filterspülabwasseraufbereitung mit Nutzung als Füllwasser für den Beckenkreislauf (25m Sportbecken).

Typ 2: Vorfluteinspeisung, Beispiel-Sportbecken

Alternativ wurde eine Variante betrachtet in der das Spülabwasser zur Vorfluteinspeisung aufbereitet wird. Die Investitionskosten sind in diesem Fall mit ca. 30.500 € deutlich geringer, da keine Ultrafiltration, Umkehrosmose und keine zusätzliche Einrichtung zur Nachspeisung in den Beckenkreislauf benötigt wird. Als Einsparung wird angenommen, dass 80% des Spülwassers für die Vorflut genutzt werden können (und die entsprechenden Abwasserkosten eingespart werden). Es wird mit diesem System keine Wärme und auch kein Frischwasser eingespart. Mit ca. 300 €/a Kosteneinsparungen im Beispiel ist dieses System aus wirtschaftlicher Sicht durchaus interessant.

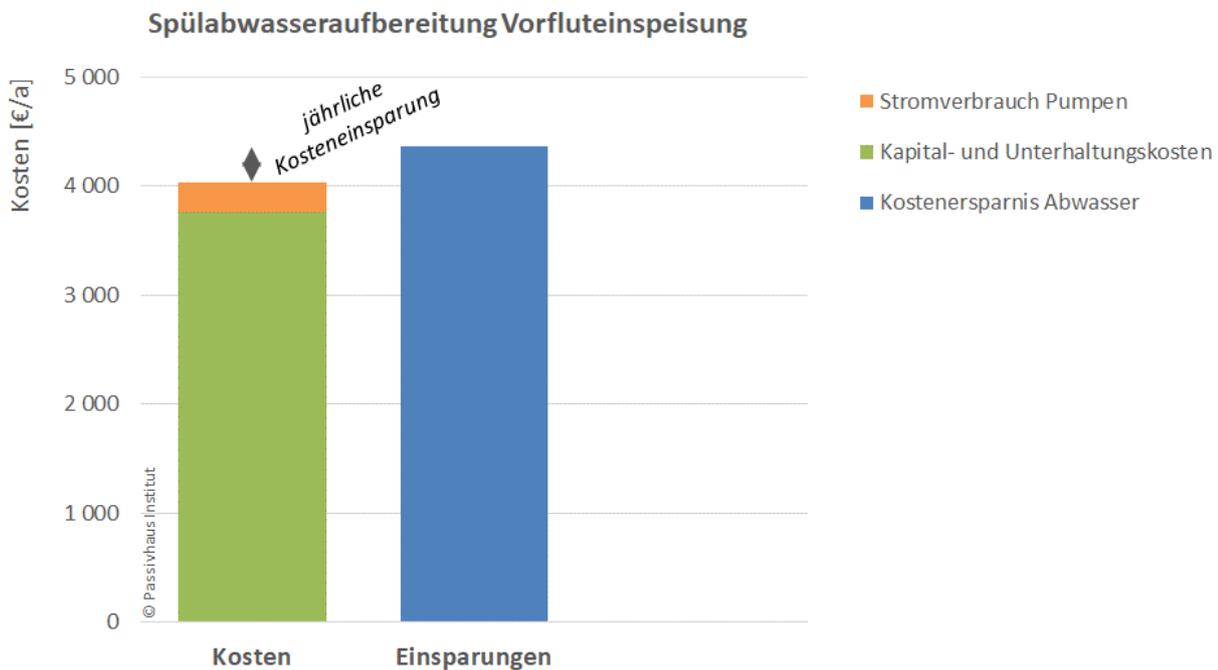


Abb. 100: Beispiel einer Kosten-Nutzen-Analyse einer Spülabwasseraufbereitung mit Aufbereitung zur Einspeisung in die Vorflut (25m Sportbecken).

9.2 Abwärmenutzung BHKW

Neben der Spülabwasseraufbereitung hat sich die Abwärmenutzung des BHKWs im Lippe-Bad als eine sehr wirtschaftliche Maßnahme heraus gestellt (Gehäuseabwärme und Brennwertnutzung, siehe [BGL 2011] und [Peper/Grove-Smith 2013] für Systembeschreibung). Den Investitionskosten von insgesamt ca. 47.000 € für zusätzliche Wärmetauscher, Pumpen, Rohre und Armaturen (HAT und NT Kreislauf) stehen die eingesparten Fernwärmemengen gegenüber (540 MWh/a, siehe Kapitel 3.1). Wie auch im Falle der Spülwasseraufbereitung, spielt der zusätzliche Hilfsstrom für den Pumpenbetrieb eine untergeordnete Rolle. Die berechnete jährliche Kostenersparnis liegt bei ca. 22.100 €/a.

Die Konfiguration zur Abwärmenutzung ist eine Sonderlösung speziell für das Lippe-Bad, die sich durch die Lage der Fernwärme-BHKWs im Gebäude ergeben hat. Es ist ein gelungenes Beispiel

dafür, wie lokale Randbedingungen im Sinne von Energie- und Kosteneinsparungen ausgenutzt werden können.

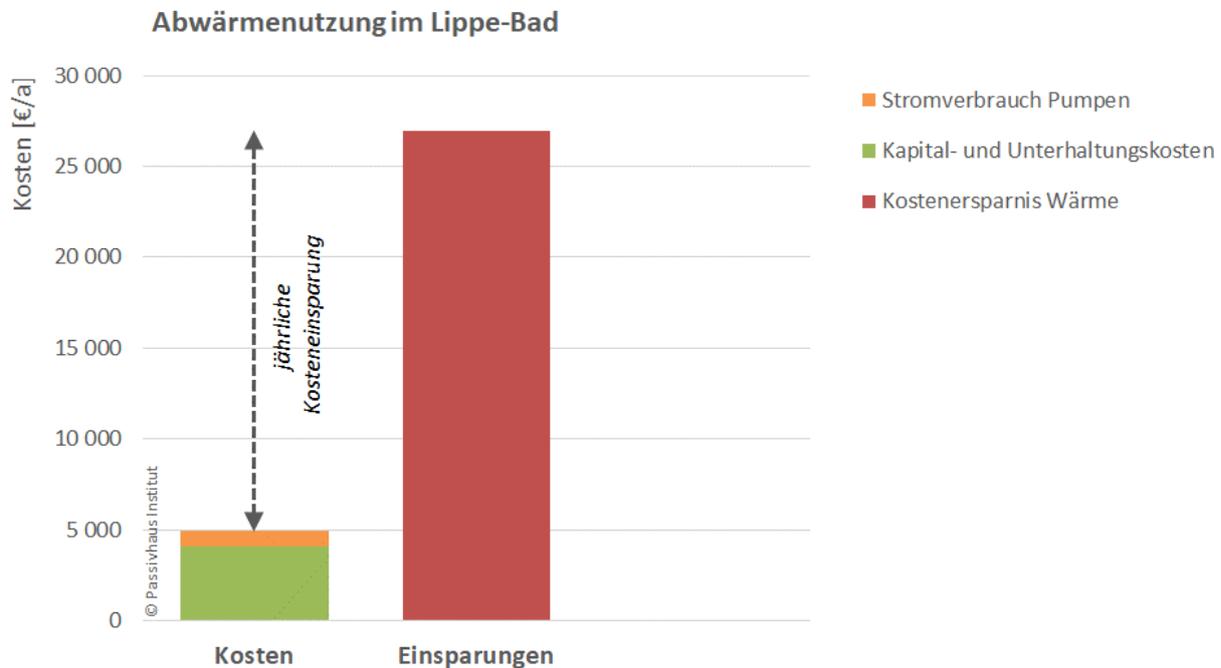


Abb. 101: Kosten-Nutzen-Analyse der BHKW Abwärmenutzung im Lippe-Bad.

9.3 Temperatursenkung der Warmwasserzirkulation

Eine weitere Speziallösung im Lippe-Bad ist die Senkung der Warmwassertemperatur von 60°C auf 40°C ohne dauerhafte Zirkulation, mit der Intention Verteil- und Speicherverluste zu reduzieren. Die technische Umsetzung besteht darin, dass direkt am Hauswasseranschluss im Gebäude eine zusätzliche Ultrafiltrations-Anlage installiert ist, um Keimeintrag in das Gebäude zu vermeiden (Systembeschreibung siehe [BGL 2011]).

Für die Kosten-Nutzen-Analyse wurden die tatsächlichen Mehrinvestitionen im Lippe-Bad einer Abschätzung der eingesparten Heizkosten gegenüber gestellt. Es entstehen Mehrkosten von ca. 5.200 €/a (siehe Abb. 102), d.h. die in Lünen umgesetzte Maßnahme ist bedingt durch die hohen Investitionskosten (ca. 44.800 € inkl. Minderkosten für eingesparte Zirkulationsleitungen) gegenüber vergleichbar niedrigen Heizkosten-Einsparungen nicht wirtschaftlich darstellbar.

In Hallenbädern verlaufen die Verteilleitungen üblicherweise innerhalb der thermischen Hülle, im warmen Technikeller (typisch ca. 28-30°C, ähnlich der Beckenwassertemperatur). Die Abwärme der Verteilleitungen ist zum Teil nutzbar. Dennoch ist auf eine ausreichende Dämmung der warmen Rohre und auf kurze Leitungsführung zu achten. Durch kompakte Rohrverlegung können unnötige Kosten (Material, Installation, Energie) vermieden werden. Die Dämmung ermöglicht eine

effektive und kontrollierte Verteilung der Wärme an den Abnehmer (Duschen) mit geringen Wärmeverlusten an unerwünschte Bereiche (lokale Überhitzung in Technikräumen). Leitungen außerhalb der thermischen Hülle sollten prioritär vermieden werden. Falls dies unumgänglich ist, sollten sie mit einer Größenordnung von einem 2-fachen Nenndurchmesser gedämmt werden, um Wärmeverluste zu reduzieren.

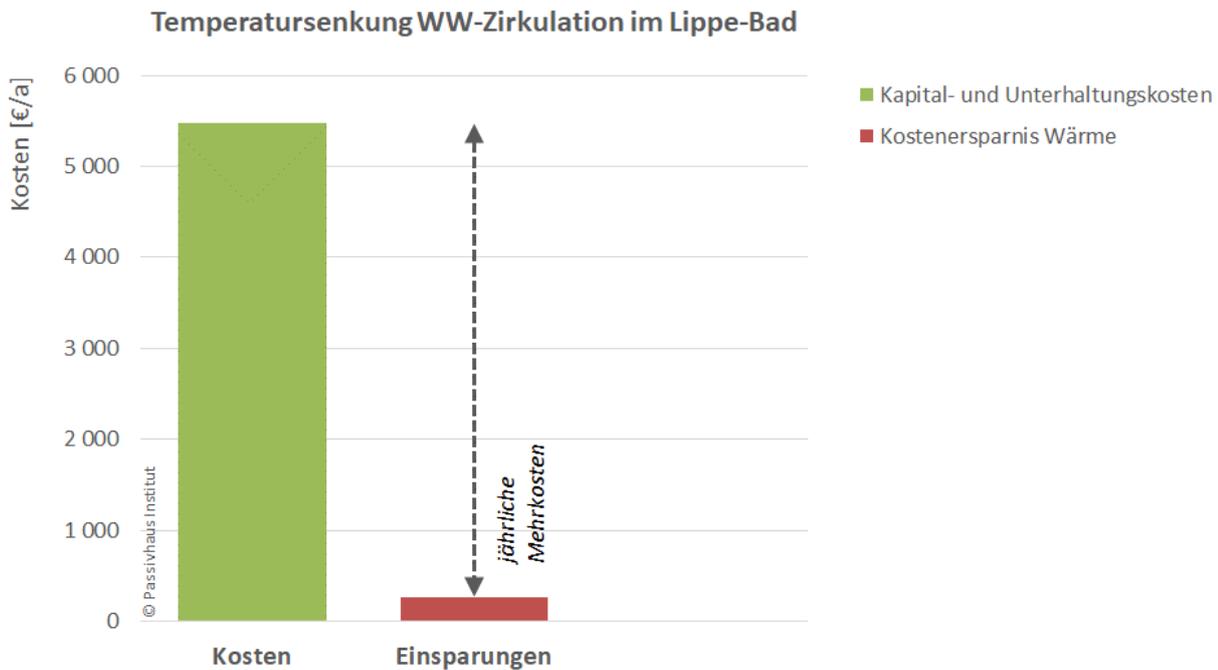


Abb. 102: Kosten-Nutzen-Analyse der Temperaturabsenkung für die Warmwasser-Zirkulation im Lippe-Bad mittels Ultrafiltration am Kaltwasseranschluss.

9.4 Reduktion der Druckverluste im Beckenkreislauf

Geringere Druckverluste ermöglichen Einsparungen des Pumpenstromverbrauchs. Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Druckverluste im Beckenkreislauf zu reduzieren, was im Wesentlichen eine Planungsaufgabe ist. Als orientierende Kosten-Nutzen-Analyse wurde anhand des Beispielbeckens betrachtet, wie sich eine Erhöhung des Schwallwasserbehälters auswirkt, sowie eine Verbesserung des Rohrleitungsnetzes.

Randbedingungen: Das reguläre Umwälzvolumen für das 25 m Sportbecken mit Niederdruckfiltration beträgt 140 m³/h. Für den Ausgangsfall (System ist nicht optimiert) werden Druckverluste von insgesamt 3,4 mWS für die Rohwasserpumpe und 8,1 mWS für die Filtratpumpe angesetzt, wovon jeweils 0,4 mWS bzw. 1,1 mWS durch Rohre und Armaturen anfallen.

Hinweis: Die Stromaufnahme der Pumpen kommt zum Teil dem Beckenwasser als Heizwärme zu Gute. Bei reduzierter Stromaufnahme steigt entsprechend der Heizwärmebedarf für das Becken. Dieser Effekt wurde in den folgenden Berechnungen nicht berücksichtigt.

Maßnahme 1: Erhöhung des Schwallwasserbehälters

Eine bauliche Erhöhung des Schwallwasserbehälters geht mit einer Reduktion der Förderhöhe einher und somit potentiellen Stromeinsparungen der Rohwasserpumpe (bzw. Umwälzpumpe im Falle einer Druckfiltration). Für die Kosten-Nutzen-Analyse wird ein gleichbleibender Wirkungsgrad für die Pumpe angesetzt, unter der Annahme, dass die Pumpe jeweils passend für den entsprechenden Betriebspunkt ausgewählt wird. An Mehrinvestitionen fallen lediglich die Kosten für eine zusätzliche bzw. aufgeständerte Unterkonstruktion des Schwallwasserbehälters an. Als Nutzungsdauer werden 30 Jahre angenommen, ohne zusätzliche Wartungskosten. Den Ergebnissen zufolge ist eine Erhöhung des Schwallwasserbehälters wirtschaftlich, mit jährlichen Einsparungen von ca. 1.100 € bei einer Erhöhung um einen Meter (siehe Abb. 103). Die Haupteinflussfaktoren für die erzielten Einsparungen sind die Effizienz der Förderpumpe, sowie deren Betriebszeit und -punkte. Je länger die zu erwartenden Vollast-Laufzeiten, je schlechter der Wirkungsgrad der Pumpe und je höher die Druckverluste im Gesamtsystem, desto wirksamer ist eine Erhöhung des Schwallwasserbehälters. Die zu erwartenden Ersparnisse sind finanziell überschaubar, daher ist dies eine empfehlenswerte, einfache und günstige Maßnahme, die zu Strom- und Kosteneinsparungen (teilweise auch zu zusätzlicher Lagerfläche im Keller) führt. Außerdem bietet diese Maßnahme Robustheit falls andere Randbedingungen schlechter ausfallen als geplant (z.B. schlechterer Wirkungsgrad der Pumpe durch Verschiebung des Betriebspunkts wegen Systemveränderungen gegenüber der ursprünglichen Auslegung).

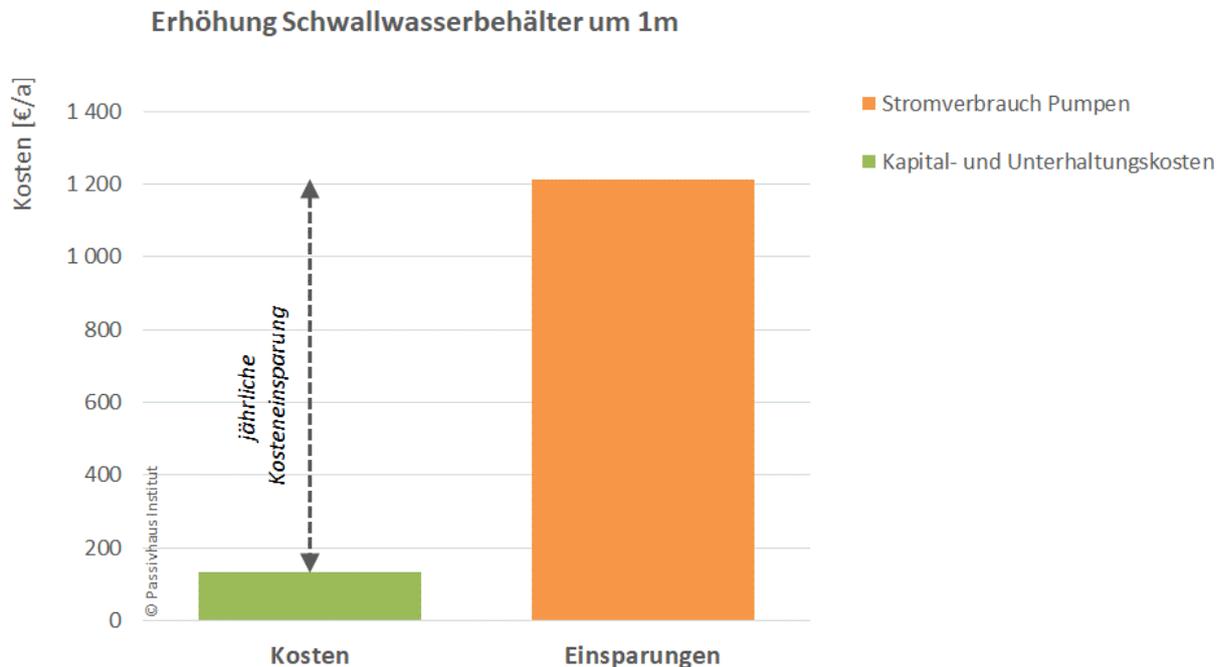


Abb. 103: Beispiel einer Kosten-Nutzen-Analyse für die Erhöhung des Schwallwasserbehälters um 1 m.

Maßnahme 2: Verbessertes Rohrleitungsnetz

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Druckverluste im Rohrleitungsnetz zu reduzieren. Für diese beispielhafte Kosten-Nutzen-Berechnung wurden folgende Maßnahmen berücksichtigt: Größere Nennweite des Leitungsnetzes (Rohwasser DN200 auf DN250, Reinwasser DN150 auf DN200), Einsatz einer federkraft-schließenden Absperrklappe (FW-Klappe) anstelle einer konventionellen Rückschlagklappe, sowie 45°-Abzweiger anstelle von 90°-T-Stücken. Die Druckverluste für das konkrete Beispiel reduzieren sich hierbei von 11,5 mWS auf 9,8 mWS (um 0,4 mWS für die Rohwasserpumpe und 1,2 mWS für die Filtratpumpe). Für sehr effiziente Lösungen ist eine weitere Reduktion der Druckverluste durchaus möglich. Die entsprechenden Mehrkosten für dieses Beispiel wurden insgesamt auf ca. 5.400 € abgeschätzt (inkl. Montagekosten). Gemäß VDI 2067 wurden für Rohrleitungen eine Nutzungsdauer von 30 Jahren angesetzt und für Armaturen 15 Jahre. Bei einem Zinssatz von 3% ergeben sich somit Kapitalkosten von 350 €/a. Die Stromeinsparung hängt von der Pumpeneffizienz und der Betriebsweise ab. Im betrachteten Beispiel (Pumpeneffizienz von 68%, inklusive Motor & Frequenzumformer) liegen die Kosteneinsparungen bei ca. 1.500 €/a (siehe Abb. 104), wenn die Pumpe des Sportbeckens ganzjährig mit voller Umwälzleistung betrieben wird.

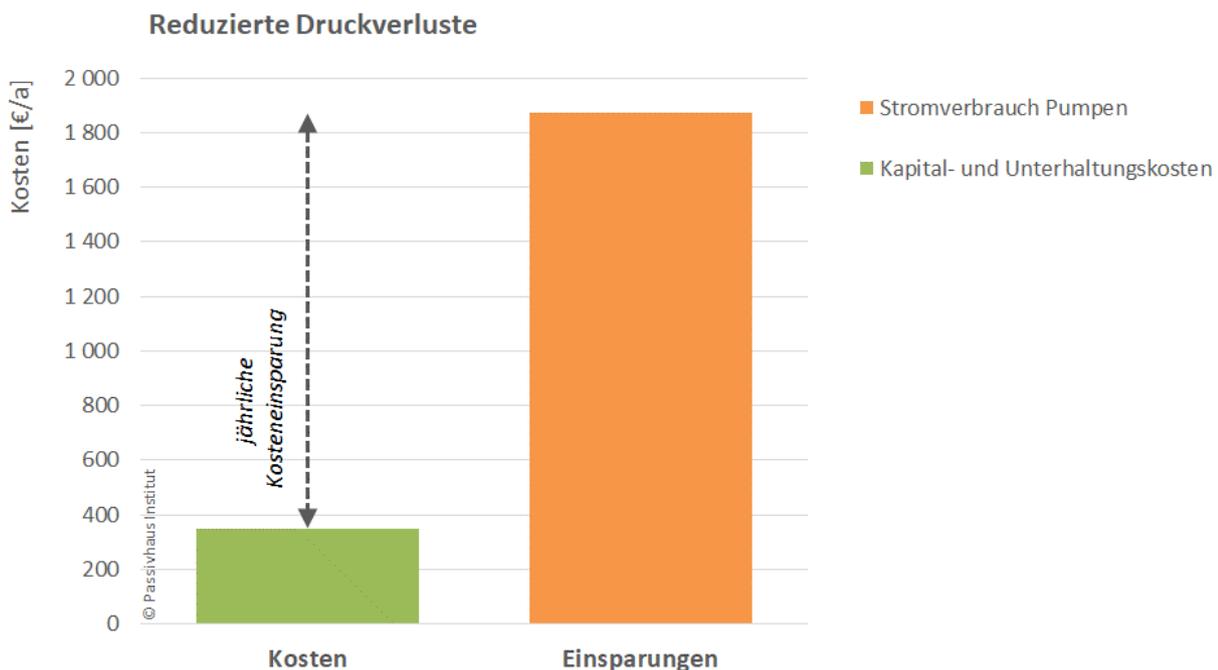


Abb. 104: Beispielhafte Kosten-Nutzen-Analyse eines verbesserten Rohrleitungsnetzes mit reduzierten Druckverlusten bei durchgängigem Vollast-Umwälzvolumenstrom.

Ähnlich wie im Falle des Schwallwasserbehälters ist ein verbessertes Rohrleitungsnetz generell empfehlenswert, um Stromverbrauch und Kosten zu senken. Es sind noch weitere Maßnahmen über die hier genannten Beispiele möglich z.B. hinsichtlich der Beckeneinströmung, Verwendung von Diffusoren, teil- oder zeitweise interne Umwälzung ohne Schwallwasserbehälter etc. welche im Einzelfall geprüft werden sollten (siehe auch Kapitel 7 "Schwimmbadtechnik").

9.5 Bedarfsgeregelte Beckenumwälzung

Die Umwälzmengen für Becken werden nach Norm berechnet, je nach Beckenart und Filtertechnologie mit einer vorgegebenen Beckenauslastung. Je nach tatsächlicher Beckennutzung kann durchaus mit niedrigeren Volumenströmen und reduziertem Stromeinsatz eine hohe Wasserqualität gewährleistet werden. Dies gilt insbesondere für Nichtschwimmerbecken, die mit einer höheren Belastung ausgelegt werden (siehe Kapitel 8.1 "Stromverbrauch Umwälzpumpen"). Nach DIN 19643 ist eine maximale Absenkung des Volumenstroms Q in Abhängigkeit der Rinnenlänge l zulässig: $Q_{Teillast} \geq l_{Rinne}$. In diesem Beispielfall entspricht das einer maximalen Absenkung um 46% auf 75 m³/a. Bei starken Absenkungen müssen sekundäre Auswirkungen bedacht werden, wie z.B. die Sicherstellung einer ausreichenden Durchströmung. Wichtig: Ein Betrieb mit reduziertem Umwälzvolumen ist nur dann möglich, wenn die Wasserqualität sichergestellt werden kann.

Für die beispielhafte Kosten-Nutzen-Analyse wird hier das Einsparpotential durch Teillastbetrieb gegenüber einem üblichen durchgängigen Vollastbetrieb berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass Frequenzumformer bereits vorhanden sind, da diese im Neubau ohnehin für eine effiziente Betriebsweise empfohlen werden. Da die notwendige Messung der Beckenhygieneparameter zur Überwachung der Beckenwasserqualität ohnehin vorhanden sein muss, entstehen hierfür auch keine Mehrkosten. In Abb. 105 ist die Kosten-Nutzen-Analyse für den Beispielfall einer Absenkung auf 85% dargestellt. Bei einer Nachtabsenkung (10h/Tag) ergeben sich Kosteneinsparungen von ca. 1.400 €/a. Bei durchgängiger Absenkung, auch tagsüber, erhöhen sich die Einsparungen auf ca. 4.500 €/a. In Abb. 106 sind die Einsparungen bei unterschiedlichen Reduktionsfaktoren aufgeführt. Hier ist deutlich erkennbar, dass eine geringe durchgängige Reduktion (z.B. auf 90%) genauso effektiv ist wie eine stärkere Absenkung (z.B. 50%) nur während der Nachtstunden.

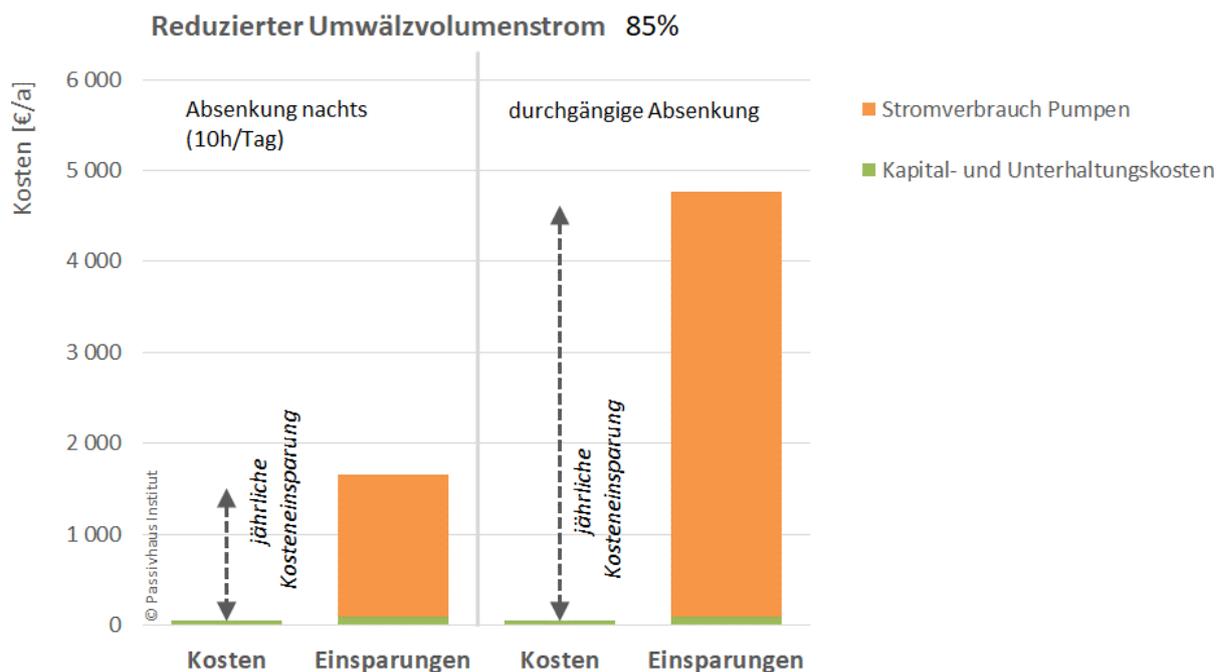


Abb. 105: Beispielhafte Kosten-Nutzen-Analyse für reduzierte Beckenumwälzung außerhalb der Nutzungszeiten (links) bzw. durchgehend (rechts).

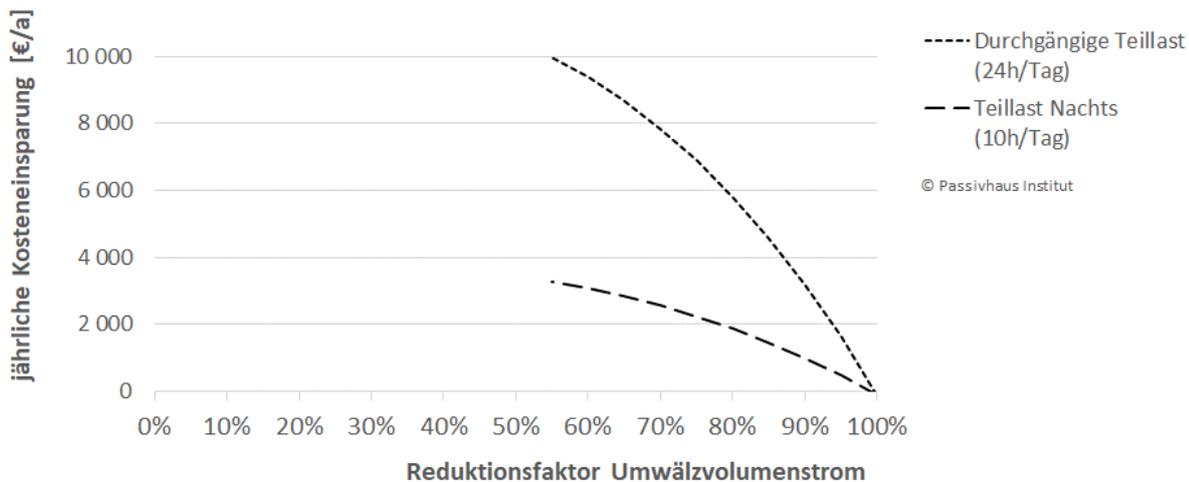


Abb. 106: Beispielhafte Kosten-Nutzen-Analyse für reduzierte Beckenumwälzung außerhalb der Nutzungszeiten (links) bzw. durchgehend (rechts).

9.6 Wassersparende Duschköpfe

Der Einsatz von wassersparenden Duschköpfen führt in dreierlei Hinsicht zu Einsparungen: Reduzierte Trinkwasser- und Abwassermengen, sowie eingesparte Warmwasser-Heizwärme. Für die Nutzerakzeptanz bzw. den Komfort der Badegäste ist bei der Auswahl auf hochwertige Produkte zu achten (genügend Druck, nicht zu laut, gebündelter Strahl). Für die wassersparenden Armaturen wurde ein Durchfluss von 6 l/min angenommen, gegenüber dem üblichen von 12 l/min. Die Anzahl der Duschköpfe für das 25 m Sportbecken wurde nach Richtlinien für den Bäderbau ermittelt (insgesamt 18 Duschköpfe). Der Einkaufspreis für wassersparende Armaturen und konventionelle Duschköpfe ist vergleichbar, daher stehen bei einem Neubau den potentiellen Ersparnissen keine erhöhten Investitionskosten gegenüber. Für eventuell erhöhte Wartungskosten (z.B. Entkalkung) wurden konservative 5 €/a pro Duschkopf angesetzt. Die bei einer Sanierung anfallenden Kosten für neue Duschköpfe (ca. 90 €/Stück) und Montagearbeiten fallen gegenüber der Einsparpotentiale nicht ins Gewicht und beeinträchtigen nicht die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme.

Die Besucherzahlen und deren Gewohnheiten (Duschzeit und -temperatur) sind ausschlaggebend für den Wasserverbrauch und somit für das Einsparpotential. Abb. 108 zeigt ein Beispiel einer Kosten-Nutzen-Analyse im Falle von 18 Besuchern/m² pro Monat und 3 Minuten durchschnittlicher Duschzeit pro Badegast bei 38°C Duschtemperatur. Die Kostenersparnis liegt hier bei ca. 6.500 €/a. Ergänzend wurden Varianten mit unterschiedlichen Besucherzahlen und Duschzeiten betrachtet (siehe Abb. 108). Je nach Besucherzahl fallen die jährlichen Kosteneinsparungen höher oder niedriger aus. Der Einsatz von wassersparenden Duschköpfen ist aber in jedem Fall wirtschaftlich - sowohl im Neubau als auch im Sanierungsfall.

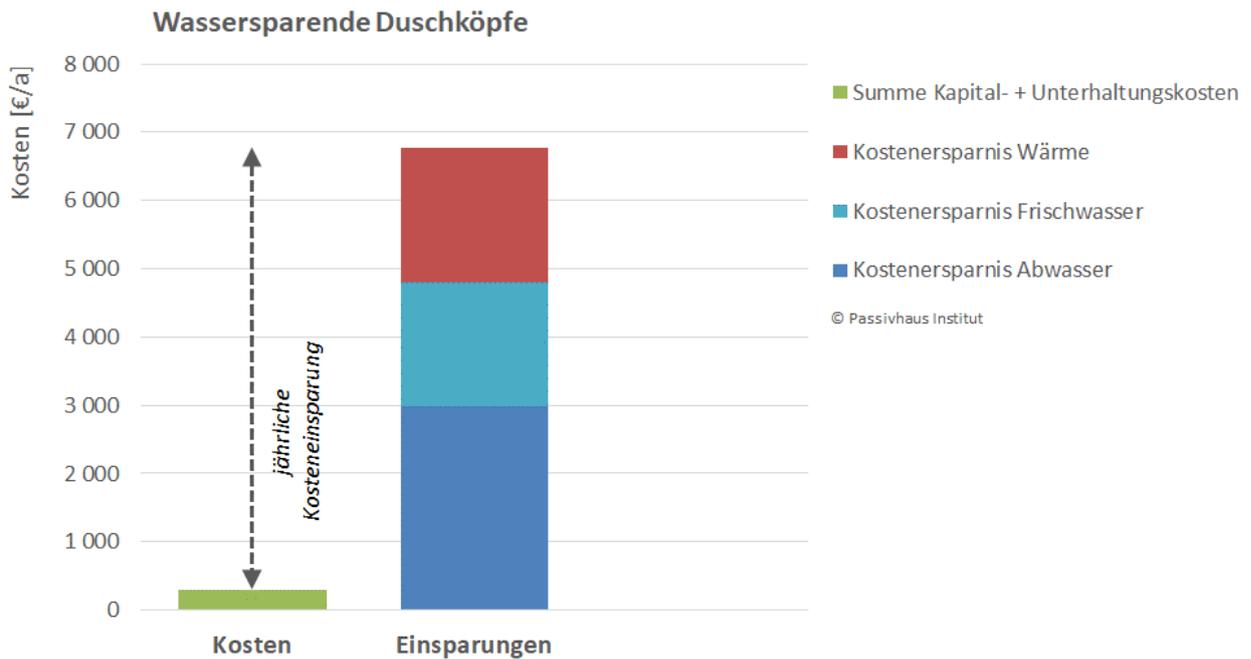


Abb. 107: Beispiel einer Kosten-Nutzen-Analyse für wassersparende Duscharmaturen mit 6 l/min Durchfluss bei 5.000 Besuchern pro Monat und je 3 Minuten Duschzeit.

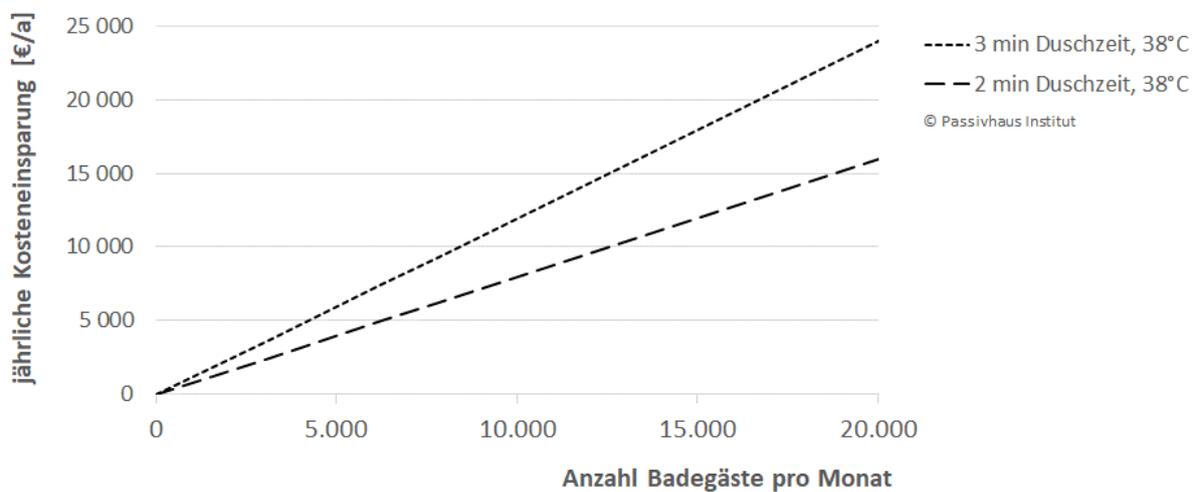


Abb. 108: Jährliche Kosteneinsparung in Abhängigkeit der Besucherzahlen bei unterschiedlichen mittleren Duschzeiten je Badegast (Berechnungsgrundlage: 18 Duschen, entspricht typischer Anzahl eines 25m Sportbeckens).

9.7 Wärmerückgewinnung aus Beckenabwasser

Aus hygienischen Gründen muss das Beckenwasser regelmäßig mit Frischwasser erneuert werden und damit fällt entsprechend Abwasser an. Als hygienische Richtlinie gelten mindestens 30 Liter Frischwasser pro Badegast. In der Praxis wird die Wassermenge oft durch die benötigte Wassermenge zur Filterspülung bestimmt. Als Alternative oder Ergänzung zur Spülabwasseraufbereitung können durch Wärmerückgewinnung aus dem warmen Beckenabwasser (typisch ca. 28°C) Heizenergie eingespart werden.

Für diese Studie wurden für das beispielhafte Referenz-25 m-Becken zwei unterschiedliche Methoden der Wärmerückgewinnung aus Beckenwasser betrachtet (siehe Abb. 109): Ein passives System mit Wärmetauscher zwischen Ab- und Frischwasser, sowie ein aktives System, in welchem dem Abwasser mittels Wärmepumpe Energie entzogen und dem Frischwasser zugeführt wird. Die beiden Varianten unterscheiden sich hinsichtlich der benötigten Technik und Investitionen, aber auch hinsichtlich der erzielten Effizienz. In beiden Fällen ist zu beachten, dass eine hohe Effizienz nur erreicht werden kann, wenn Abwasser und Frischwasser zur gleichen Zeit (und bevorzugt in ähnlichen Durchflussmengen) anfallen, so dass ggf. zusätzliche Zwischenbehälter und entsprechende Regelelemente gebraucht werden. Die Analysen gelten als Beispiele. Eine Wärmerückgewinnung wird bei höheren Abwassermengen und/oder hohen Beckentemperaturen attraktiver (ähnliche Investitionen, aber höheres energetisches Einsparpotential), z.B. in Bädern mit mehreren Beckenkreisläufen.

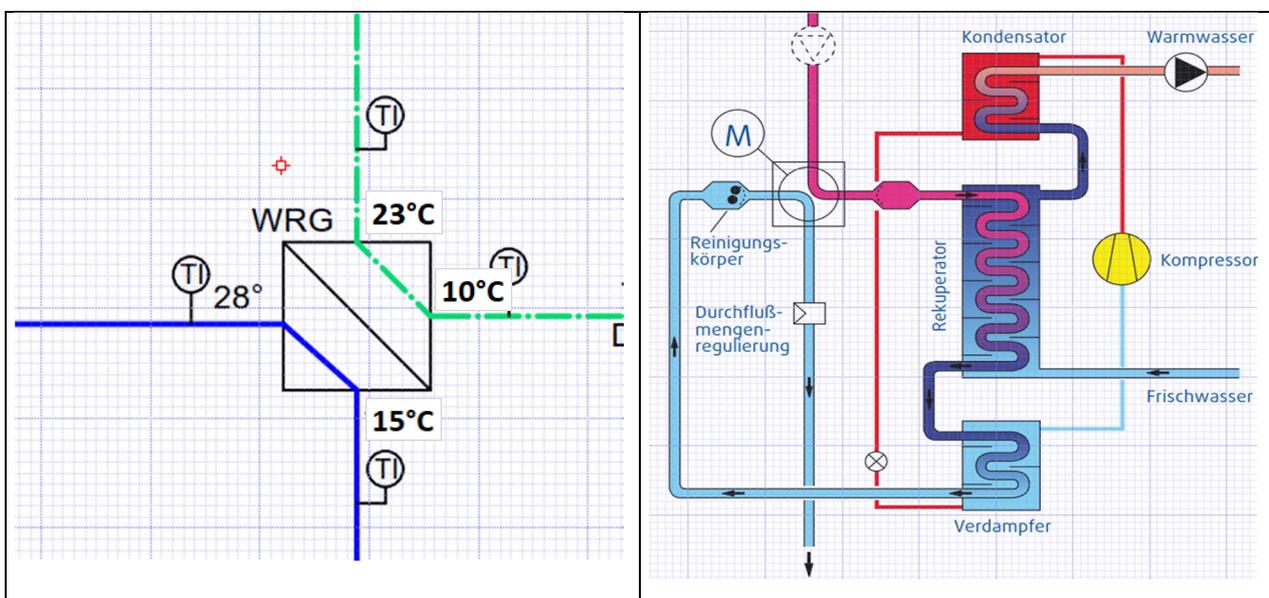


Abb. 109: Schematische Darstellung zur Wärmerückgewinnung aus Beckenabwasser. Links: Passive Methode mittels Wärmetauscher. Rechts: Aktives System mit Wärmepumpe. Quellen: Eneratio (links) und Menerga (rechts)

Als ergänzende Information und Anregung: Ähnlich zur Abwärmenutzung aus dem Beckenwasser besteht auch energetisches Einsparpotential bei Wärmerückgewinnung aus Duschatwasser. Diese Möglichkeit wurde im Rahmen dieses Berichts nicht näher untersucht, lohnt im Einzelfall

aber durchaus näher betrachtet zu werden. Durch die hohe Abwassertemperatur (ca. 35°C) und regelmäßige Nutzung im Hallenbad sollte durch einfache passive Maßnahmen (Gegenstrom-Wärmetauscher) eine hohe Effizienz der Wärmerückgewinnung erreicht werden können.

Maßnahme 1: Passives System mit Wärmetauscher

Angenommen wurde ein Wärmetauscher mit 70% effektiver Effizienz zur Wärmerückgewinnung. Bei 28°C Abwassertemperatur wird das durchschnittlich 10°C kalte Frischwasser also auf ca. 23°C vorerwärmt. Im Referenzfall fallen für das 25 m Sportbecken jährlich ca. 2.200 m³ Abwasser durch die Filterspülung an und es werden 33 MWh/a Heizenergie eingespart. Die Investitionskosten wurden zu 10.100 € abgeschätzt (Wärmetauscher, zusätzliche Rohrleitungen und Armaturen, sowie Zwischenbehälter für Gleichzeitigkeit der Abwasser-Abspeisung und Frischwassernachspeisung), zzgl. 1% Wartungskosten. Mit Kosteneinsparungen von 800 €/a fällt die Maßnahmen für das konkrete Beispiel wirtschaftlich aus. Im Rahmen der Ungenauigkeiten dieser Abschätzung (Wärmebereitstellungsgrad, Wassermenge, Investitionskosten) ist das System ein "Nullsummenspiel" mit geringen Mehr- oder Minderkosten und daher im Sinne der Energieeinsparung durchaus empfehlenswert.

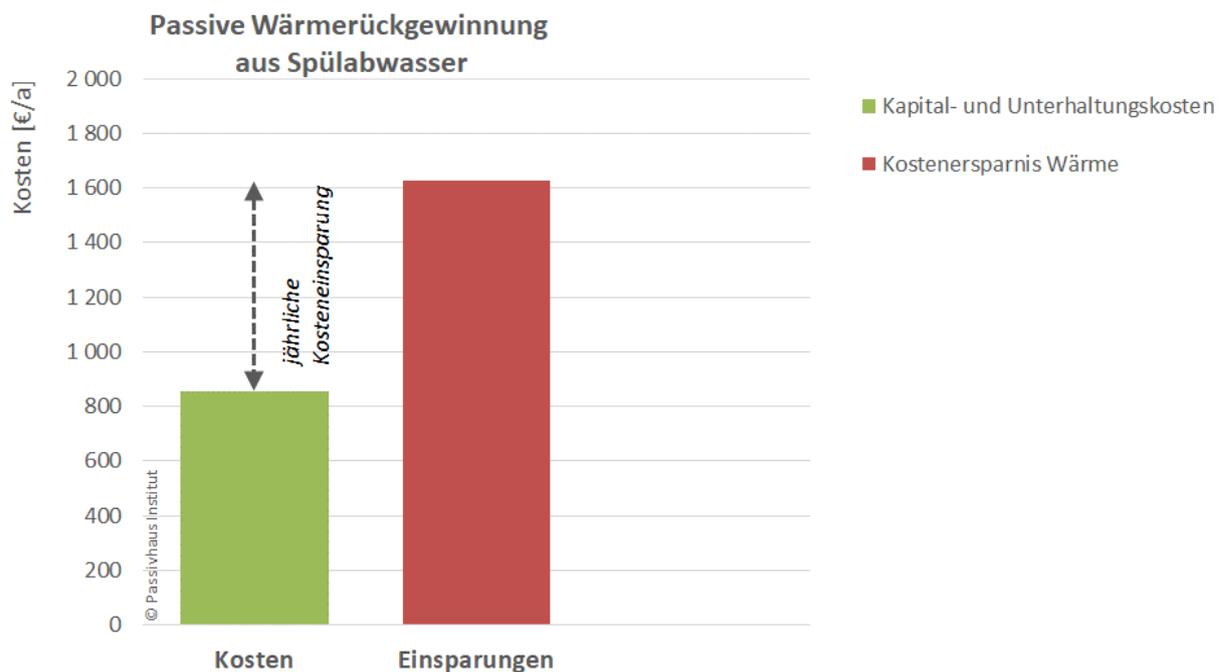


Abb. 110: Beispiel einer Kosten-Nutzen-Analyse für Wärmerückgewinnung aus Spülabwasser mittels Wärmetauscher.

Maßnahme 2: Aktives System mit Wärmepumpe

Einige Hersteller bieten speziell für den Schwimmbadbereich fertige Systeme zur Wärmerückgewinnung aus Abwasser mittels Wärmepumpe an. Es gibt prinzipiell verschiedene Anschlussmöglichkeiten (Beckenabwasser, Duschabwasser oder Kombination). Für eine Vergleichbarkeit mit dem passiven System wird nur die Abwärme aus dem Beckenwasser betrachtet mit denselben Randbedingungen (ca. 2.200 m³ Abwasser pro Jahr mit 28°C). Basierend auf Herstellerangaben wird für das System vereinfacht eine effektive Wärmerückgewinnung von pauschal 90% angenommen mit einer Jahresarbeitszahl von 11. Bei vergleichbar hohen Investitionskosten mit Kapitalkosten von ca. 3.800 €/a plus Wartungskosten (geschätzt als 1% der Investitionskosten) gegenüber einer Heizwärmeinsparung von ca. 42 MWh/a und zusätzlichem Stromeinsatz für die WP von ca. 4 MWh/a ist das System für das betrachtete Referenzbecken nicht wirtschaftlich: Im betrachteten Referenzfall entstehen Mehrkosten von jährlich ca. 3.100 € (siehe Abb. 111).

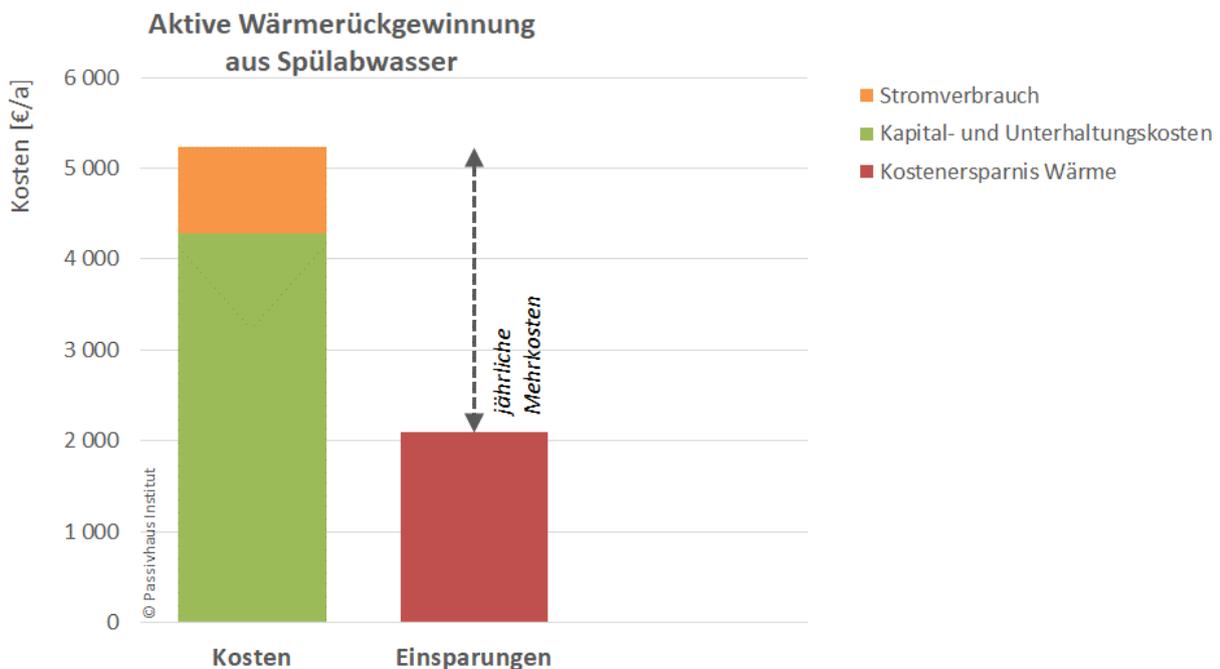


Abb. 111: Beispiel einer Kosten-Nutzen-Analyse für Wärmerückgewinnung aus Spülabwasser mittels Wärmepumpe.

10 Inbetriebnahme und Betriebsführung

10.1 Messtechnik und GLT

Üblicherweise verfügt jedes Hallenbad über eine zentrale Gebäudeleittechnik (GLT), um diverse Prozesse und Regelungen der Haus- und Anlagentechnik zentral zu steuern. Die Aufgaben und Ausbaugrößen der Anlagen können dabei sehr unterschiedlich ausfallen. Generell lassen sich die auf solchen Anlagen erfassten, gespeicherten und ggf. visualisierten Messdaten auch zur Kontrolle, Dokumentation und Betriebsoptimierung nutzen. Nach Ausbauzustand und Funktion der Anlage sowie der Qualität der Sensoren und Zähler ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten: Je mehr Zähler und Messpunkte installiert werden, desto detaillierter sind die Möglichkeiten der Betriebsüberwachung. Allerdings sinkt auch die Übersichtlichkeit: Welcher Zähler erfasst welchen Verbrauch? Aus diesem Grund sollte für und mit dem Betreiber ein passender Mittelweg ausgelotet werden, indem schon während der Planungsphase die späteren Betriebskontrollen geplant werden. Es sollte vorab geklärt werden, welche Messgrößen überwacht werden sollen. Dabei sollten auch die Darstellungsmöglichkeiten auf der GLT mit einbezogen werden, denn Messwerte sind nur von Nutzen, wenn Sie übersichtlich dargestellt und einfach ausgewertet werden können.

Die Strom- und Wärmemengenzähler sollten als Verbrauchswerte (z.B. kWh/Monat) auf der GLT sichtbar sein. Wichtige Darstellungen sind die Monatsvergleiche (als Balkendiagramme im Jahresverlauf, siehe Abb. 112), aber auch Mittelwerte über verschiedene Zeiträume (Stunden-, Tages-, Wochenmittelwerte), damit bei stark schwankenden Werten auch für größere Zeiträume die Diagramme lesbar sind. Sind Unterschiede im Tag-/Nachtbetrieb vorhanden, ist eine Darstellung mit Nacht- bzw. Tagesmittelwerten sehr hilfreich, bei frei definierbaren Tag-/ Nachtstunden oder nach der eingestellten Betriebsweise (Tag/Nacht).

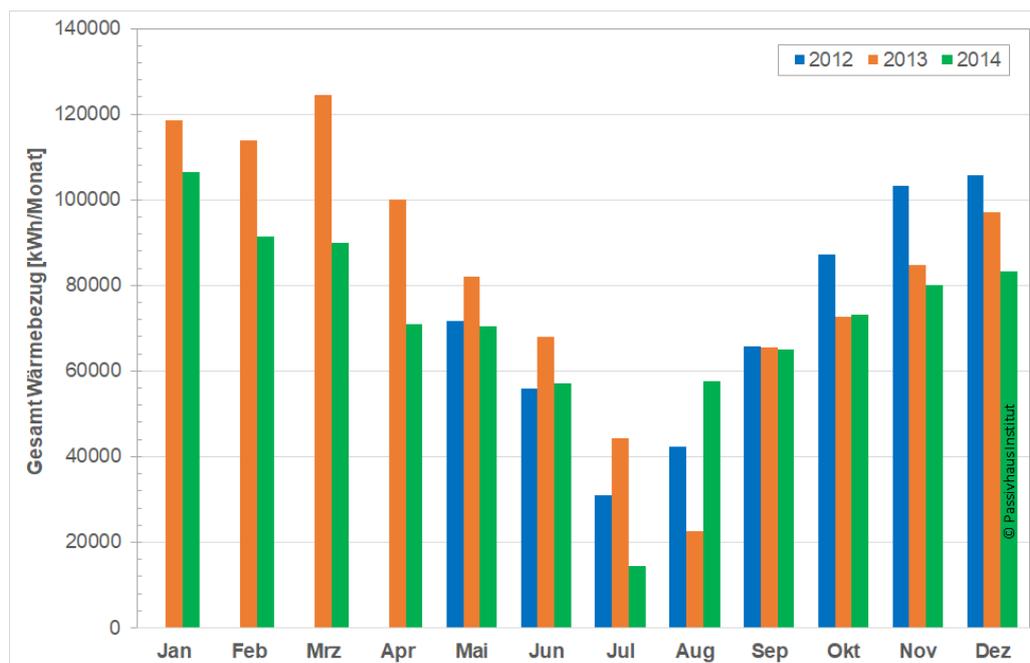


Abb. 112: Monatliche Verbrauchsdaten vom gesamten Wärmebezug des Lippe-Bades von Mai 2012 bis Dezember 2014. Die sortierte Darstellung nach Monaten erleichtert es Schwankungen besser zu erkennen und dann ggf. bewerten zu können (Die Grafik ist identisch mit Abb. 7).

Aufteilung der Zähler

Als grundlegende Verbrauchsgrößen sollten die Gesamtbezugszähler für Wärme bzw. Gas, Strom und Wasser an der Gebäudegrenze gemessen werden. Aus Gründen der Abrechnung sind diese in der Regel sowieso vorhanden. Es ist zu prüfen, ob diese mit vertretbarem Aufwand auf die GLT aufgeschaltet werden können.

Um einen Überblick bekommen zu können, welche Funktionen im Gebäude wieviel Energie benötigen, ist es sinnvoll Unterzähler für Wärme und Strom zu installieren (siehe Abb. 113: 2. Ebene). Beim Strom sollten vor allem die großen Verbraucher einzeln gemessen werden (Lüftung, Schwimmbadtechnik, evtl. Beleuchtung). Der restliche Stromverbrauch könnte aufgeteilt nach Zonen (Umkleiden, Büro usw.) erfasst werden. In den meisten Fällen wird es aufwendig sein, die Beleuchtung des Gesamtgebäudes zentral zu messen. Dann ist der Stromverbrauch für die Beleuchtung bei den Verbrauchswerten der einzelnen Zonen enthalten und es können keine gesonderten Aussagen zum Beleuchtungsstrom gemacht werden.

In Einzelfällen ist es nicht möglich einen Bereich der 2. Ebene mit einem Zähler zu erfassen. In solchen Fällen können mehrere parallel angeordnete Zähler verwendet werden, deren Summe wiederum den Gesamtverbrauch abbildet.

Für eine erfolgreiche Betriebsoptimierung und Fehlersuche im laufenden Betrieb empfiehlt es sich häufig noch weitere Unterzähler zu installieren, z.B. für den Stromverbrauch der einzelnen Lüftungsgeräte. Vorschläge hierzu sind in Abb. 113 in der 3. Ebene aufgeführt. Die Stadt Frankfurt empfiehlt in ihren Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen [Stadt Frankfurt 2014] generell alle Verbraucher, welche Jahreskosten von über 2.500,- € erwarten lassen, mit Unterzählern auszustatten. Alternativ zu fest installierten Stromzählern in der 3. Ebene, kann bei der Inbetriebnahme und später in regelmäßigen Abständen eine Strommessung mit Hilfe einer Stromzange erfolgen. Dazu sollte geklärt werden, wer eine solche temporäre Messung durchführen kann.

Insbesondere beim Stromverbrauch gibt es in der 2. Ebene meist noch diverse Verbraucher, welche nicht gesondert gemessen werden. Es ist sinnvoll und hilfreich, spätestens während der Inbetriebnahme genau zu dokumentieren, um welche Verbraucher es sich dabei handelt.

Im Idealfall kann also der Gesamtverbrauch eines Energieträgers direkt über einen Zähler und als Summe von mehreren Zählern ausgewertet und verglichen werden.

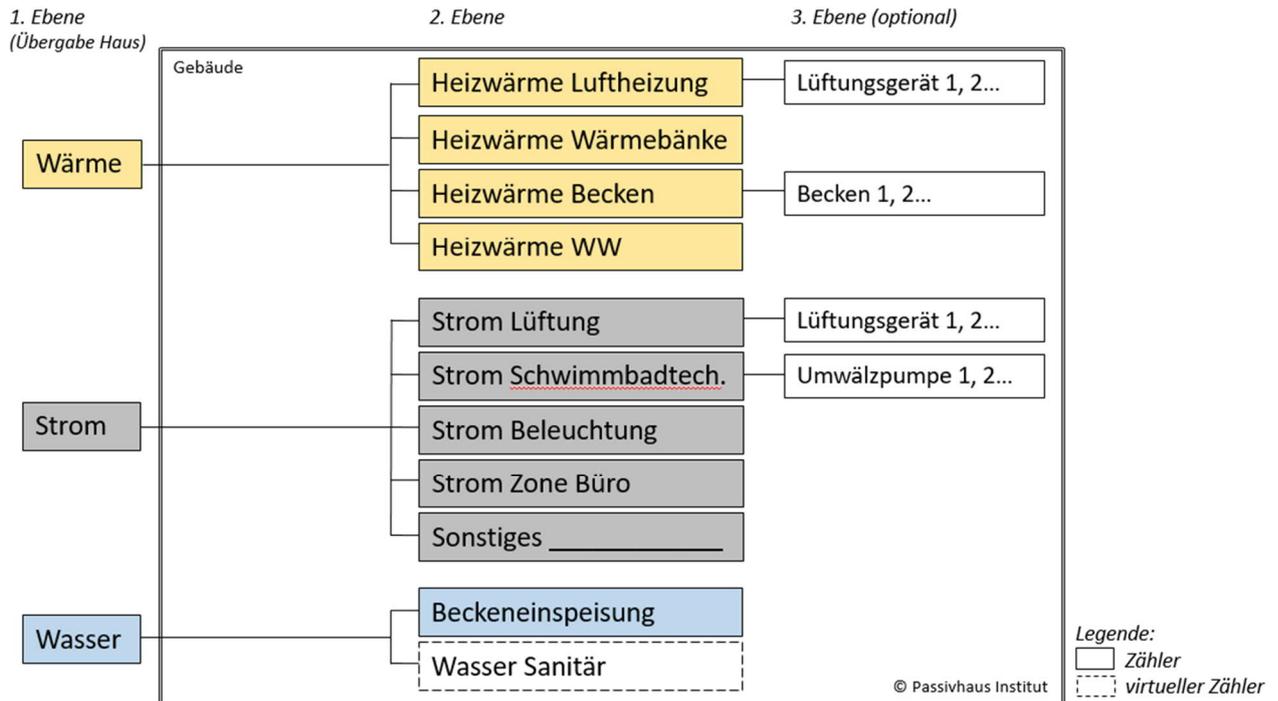


Abb. 113: Vorschlag eines Zählerkonzeptes (Beispiel mit Fern-/Nahwärmeanschluss). Als "virtueller Zähler" wird hier ein berechneter Zählerwert bezeichnet: Z.B. die Differenz verschiedener Zähler.

Wird die Wärme im Gebäude selbst erzeugt (z.B. durch einen Gaskessel oder Wärmepumpe) sollte geklärt werden, ob der Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung während des Betriebs gemessen werden soll. Dementsprechend müssen weitere Zähler installiert werden (in Abb. 114 und Abb. 115 in Rot dargestellt). Mit Hilfe dieser Zähler kann die Performance des Gaskessels, der WP o.ä. kontinuierlich überprüft werden. Zur energetischen Optimierung des Badbetriebes sind dagegen die Zähler in der 2. Und 3. Ebene hilfreich.

Für die Aufstellung eines Zählerkonzeptes ist es wichtig, vorab zu klären, welche Ziele mit den Messungen verfolgt werden sollen.

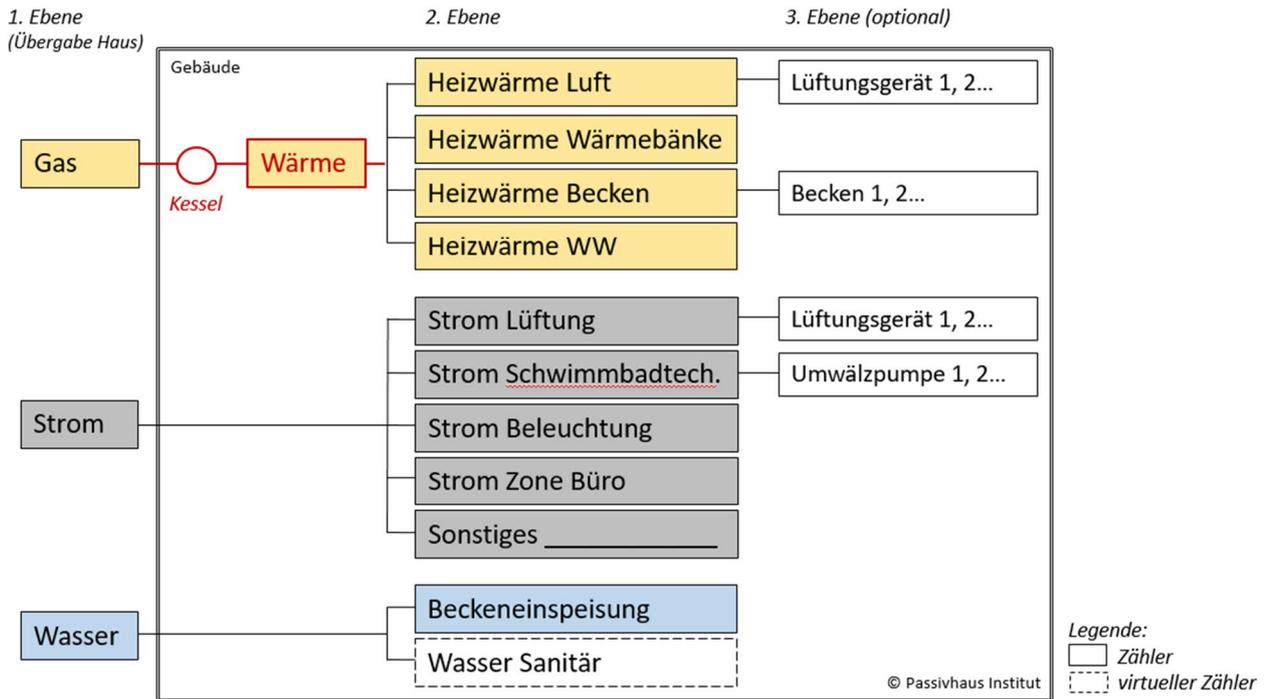


Abb. 114: Vorschlag eines Zählerkonzeptes (Beispiel mit Gaskessel); mit Hilfe eines weiteren Zählers (in Rot) kann der Wirkungsgrad des Kessels überwacht werden.

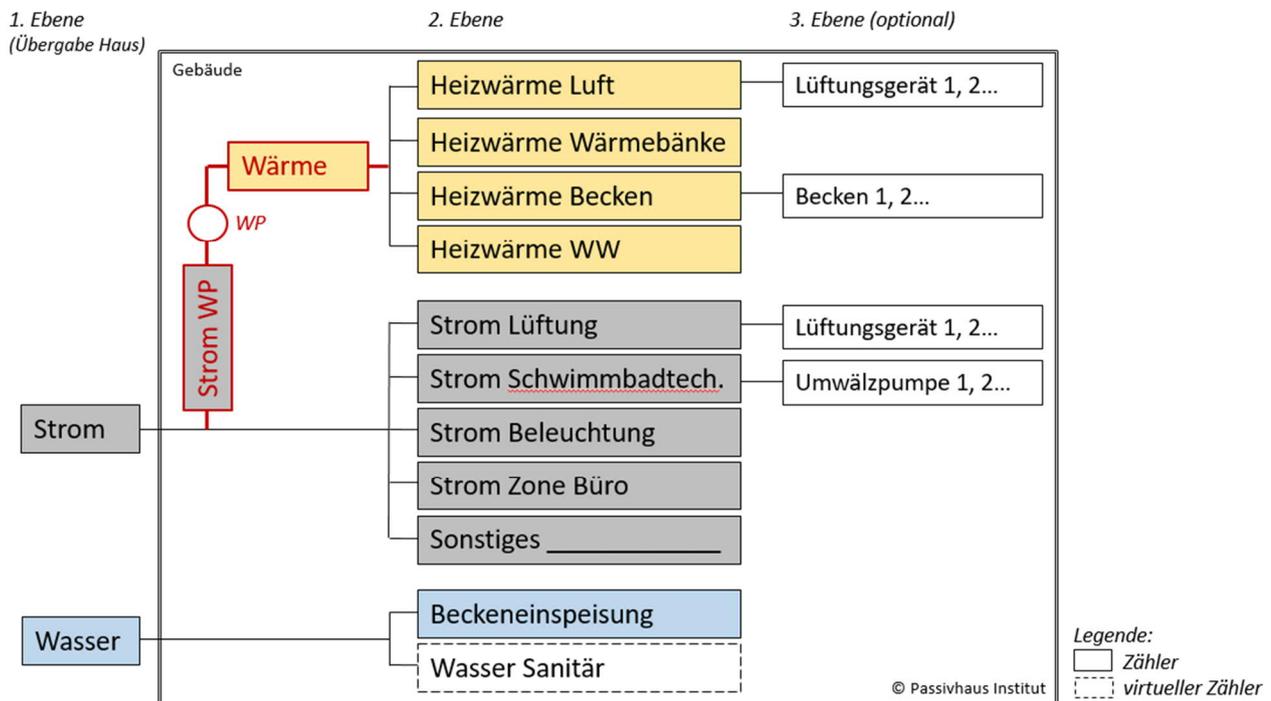


Abb. 115: Vorschlag eines Zählerkonzeptes (Beispiel mit Wärmepumpe "WP"); mit Hilfe zwei weiterer Zähler (in Rot) kann die Arbeitszahl (AZ) der Wärmepumpe überwacht werden.

Benötigte Sensoren

Für eine bedarfsgerechte Regelung eines Hallenbades sind unterschiedliche Sensoren notwendig. Neben der Notwendigkeit der Sensoren für die Steuerung und Regelung können mit Sensoren Randbedingungen des Hallenbadbetriebes erfasst werden. Diese Randbedingungen sind grundlegend für die spätere Auswertung der gemessenen Energieverbräuche, weshalb der Auswahl der notwendigen Sensoren eine wichtige Aufgabe zukommt. Die folgende Tabelle zeigt eine Auflistung empfehlenswerter Messpunkte.

Tab. 19: Empfehlung für Sensoren

Sensoren	<ul style="list-style-type: none"> - außen: Temperatur + Feuchte - Solarstrahlung - Raumtemperatur + -feuchte (falls als Regelgröße benötigt) - Wassertemperatur - CO₂ (falls als Regelgröße benötigt) - Präsenzmelder (falls als Regelgröße benötigt) - Tageslichtsensor (falls als Regelgröße benötigt) - Lüftungsgeräte: Volumenströme (AB, ZU; ggf. zusätzlich Umluft oder FO) - Lüftungsgeräte: Temperatur + Feuchte (AB, ZU; wenn Frostschutz erforderlich, dann FO)
Besucherzahlen	- tagesweise erfassen

Anforderungen an Zähler und Sensoren

Nach der Festlegung der benötigten Sensoren und Zähler sollte zusätzlich die jeweilige Qualität festgelegt werden. Dazu ist die Überlegung, welches Ziel mit der Messung mittels des Sensors bzw. Zählers erreicht werden soll, grundlegend: Sind relativ grobe Auflösungen und Genauigkeiten ausreichend oder sollen z.B. Verbrauchswerte (wie Heizwärme) anhand der Messdaten (z.B. Lufttemperatur und -feuchte) bewertet werden? Danach richten sich die Anforderungen an die Qualität der Sensoren und Zähler. Üblicherweise sind die Standardsensoren von GLT-Anlagen nicht ausreichend für weitergehende Fragestellungen und Bewertungen. Die Hersteller verfügen häufig aber auch über Sensoren mit höheren Qualitäten, die dann gefordert werden können.

Werden höhere Genauigkeiten von Sensoren benötigt, ist nicht nur die Qualität des Sensors entscheidend sondern auch die Montageposition und -art (z.B. Höhe und Aufputz oder Unterputz) sowie ggf. die Kabellänge (bei Spannungssignalen z.B. 0...10 V). Diese Punkte müssen mit dem Fachplaner und Hersteller besprochen werden.

Während der gesamten Betriebsphase müssen die Sensoren und Zähler regelmäßig auf ihre Funktion hin überprüft werden. Bei Abrechnungszählern sorgt der Versorger oder Netzbetreiber für die Einhaltung der Eichfristen der Messgeräte. Aber auch die internen Unterzähler sollten diesbezüglich betreut und ggf. ausgetauscht werden. Für Sensoren ist es sinnvoll bei der Wartung der GLT-Anlage eine Funktionskontrolle der Sensoren durchführen zu lassen. Bei gewünscht höheren Anforderungen ist ggf. auch eine Kalibrierung der Sensoren notwendig (Abgleich mit einem höherwertigem Messgerät). Dies ist nicht bei allen Sensoren mit vertretbarem Aufwand möglich. Bei CO₂-Sensoren sind dazu Prüfgase notwendig, was einen sehr hohen Aufwand darstellt. Auf der anderen Seite ist bei zahlreichen dieser Sensoren eine starke zeitliche Drift

feststellbar. Werden mit dem Signal die Lüftungsgeräte gesteuert, führt dies ggf. zu abweichenden Luftqualitäten oder zu hohen Luftwechselraten und damit verbunden zu unnötig höheren Stromkosten. Bei CO₂-Sensoren ist es daher angeraten sog. "selbstkalibrierende" Sensoren (mit interner doppelter Messstrecke) zu verwenden.

Tab. 20: Übersicht zu Anforderungen und Empfehlungen an Zähler und Sensoren

Messgröße	Einheit	Spezifikation	Auflösung (Anzeige)	Empfehlung Messgenauigkeit
Wärmemenge	kWh	Wärmemengenzähler (Datenausgabe von Wärmemenge möglichst auch VL- & RL-Temp. sowie Volumen) (Abrechnungszähler)	max. 1 kWh	Klasse C
Stromverbrauch	kWh	Keine gesonderte Anforderung (Abrechnungszähler)	max. 0,1 kWh	Klasse 2
Gaszähler	m ³	Keine gesonderte Anforderung (Abrechnungszähler)	max. 10 Liter/ Impuls	< 0,5%
Volumen (Wasser)	Liter	Keine gesonderte Anforderung (Abrechnungszähler)	je nach Baugröße	je nach Baugröße
Volumenstrom (Luft)	m ³ /h	Von der Messung im Lüftungsgerät (AU/FO Ventilatoren) Über ReKu -> vom Lüftungsgerät gemessen, regelmäßige „Nullung“ (täglich für Detailmonitoring, sonst wöchentlich)	angepasst an Messaufgabe	angepasst an Messaufgabe
Lufttemperatur	°C	Sensor-Typ: PT 100 (bevorzugt, altert nicht) Kalibrierung angeraten	max. 0,05 K	max. +/- 0,2 K
Oberflächentemperatur	°C	Sensor-Typ: PT 100 (bevorzugt, altert nicht) Kalibrierung angeraten	max. 0,05 K	max. +/- 0,2 K
Rel. Luftfeuchte	%	Empfehlung: Kapazitiv Kalibrierung angeraten	0,10%	max. +/- 3 % (bei 23°C)

Gebäudeleittechnik (GLT)

Im Hinblick auf die spätere Betriebskontrolle sollte in der Planungsphase bereits abgewogen werden welche Messpunkte/Informationen auf der GLT aufgeschaltet werden, welche aufgezeichnet werden und welche davon vom Nutzer geändert werden können. Für spätere Auswertungen und Bewertungen von Verbrauchsdaten sollten viele Messwerte nicht nur als Momentanwert erscheinen sondern auch deren zeitlicher Verlauf abrufbar sein. Als Hilfestellung werden hier einige Größen aufgelistet, die häufig nicht als Zeitverlauf erfasst werden, was für eine Auswertung aber hilfreich wäre:

- Umwälzvolumenstrom
- Frischwasserzugabe Becken
- Wassertemperatur
- Klappenstellung der Lüftungsgeräte
- Reglervorgabe aus der Lüftungsgeräteprogrammierung (z.B. Heizen, Entfeuchten)

Dabei ist es zentral und unerlässlich, die diversen eingestellten Sollwerte zu dokumentieren. Nur so ist eine Betriebsoptimierung überhaupt möglich. Die Sollwerte müssen nicht zwingend im zeitlichen Verlauf festgehalten werden. Die Dokumentation in zumindest gesicherter Protokollform

ist allerdings auf jeden Fall notwendig. Dies gilt für jede durchgeführten Änderungen eines Sollwertes. Werden die Werte digital in der GLT dokumentiert, ist darauf zu achten, dass die Werte z.B. bei Updates des GLT-Programms nicht gelöscht werden können.

Für die spätere Nutzung der GLT zur Betriebsführung sowie zur energetischen Betriebskontrolle sind unmissverständliche und prägnante Bezeichnungen der Messpunkte essentiell. Bei der Wahl der Bezeichnungen ist es hilfreich, wenn alle Seiten (TGA-Planer, Fachfirma, GLT-Programmierer und Betreiber) dabei zusammenwirken und sich auf eindeutige gleiche Bezeichnungen verständigen.

Voreingestellte Diagramme, die im Betrieb immer wieder für neue Zeiträume aufgerufen werden können, erleichtern die regelmäßige Kontrolle des Energieverbrauchs durch den Betreiber. Dies wird vielleicht sogar ausschlaggebend sein, ob solch eine Kontrolle überhaupt durchgeführt wird. Beispiele für Diagramme sind in Kap. 3 Lippe-Bad: Langzeitauswertung Energieverbrauch zu finden.

10.2 Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme der Gebäudetechnik des Hallenbades dient dazu, zu prüfen, ob die geplanten Funktionen in der Realität funktionieren und die entsprechende Leistung erbringen. Durch unterschiedliche Tests wird die Technik im Betrieb mit allen Wechselwirkungen innerhalb des kompletten Bades überprüft. Darüber hinaus müssen bei der Inbetriebnahme konkrete Einstellungen für das Bad vorgenommen und justiert werden. Dabei werden die Sollwerte festgelegt bzw. angepasst.

Für den Bauherrn ist die Inbetriebnahme wichtig, um zu überprüfen, ob alle beauftragten und notwendigen Funktionen vorhanden und anwendbar sind. Dies ist auch genau der Zeitpunkt, das Wissen zur Technik und zu allen Einstellungen, die von den Fachfirmen vorgenommen wurden, an den Betreiber weiter zu geben. Diese Wissensvermittlung spielt für den Betrieb, die Betriebsoptimierung und damit für die zukünftigen Betriebskosten (Energie, Wartung usw.) sowie für die Behaglichkeit eine entscheidende Rolle! Wichtig ist, dass die ausführenden Firmen (mit Wissen über die eingebaute Technik inkl. der Programme), die Planer (mit Wissen über die geplanten Betriebszustände/Regelungen) und die Betreiber (zukünftige Verantwortung für den Betrieb) bei der Inbetriebnahme gut zusammen arbeiten. Ausreichend Zeit für die Inbetriebnahme sollte deswegen auf allen Seiten von vornherein eingeplant werden. Diese Zeit zahlt sich durch einen reibungslosen Betrieb und der dann möglichen Betriebsoptimierung mehrfach aus. Empfehlenswert ist die Bedeutung der Inbetriebnahme bereits in der Ausschreibung zu betonen und kostenseitig angemessen zu berücksichtigen. Dabei kann es helfen die Anforderungen und den Ablauf genau zu beschreiben (z.B. Forderungen von mehreren Terminen).

Im Folgenden sind Punkte zur Abnahme und Inbetriebnahme hinsichtlich des Energieverbrauchs und eines energieeffizienten Betriebes aufgeführt. Die Prüfung hinsichtlich anderer Bereiche wie Sicherheit, Wasserhygiene, Arbeitsschutz usw. sind nicht Bestandteil dieser hier zusammengestellten Auflistung.

Vorbereitung

Alle drei beteiligte Parteien (Planer, Ausführende, Betreiber) sollten die Inbetriebnahme gut vorbereiten. Die Inhalte und die Aufgabenverteilung sollten dabei vorher abgesprochen werden.

- Planer: Technische Beschreibungen, Vorgaben aus der Ausschreibung, Sollwerte, Regelkonzepte, Listen für Einregulierung, Revisionspläne, Checkliste für die Inbetriebnahme
- Fachfirmen: Betriebsanleitungen, technische Datenblätter, Revisionspläne, voreingestellte Diagramme auf der GLT
- Betreiber: Sollwerte, Betriebszeiten, notwendiges Personal

Schwimmbadtechnik

- Wasseranschluss am Hauseingang erstmal frei laufen lassen und das Wasser beproben. Erst wenn die Wasserqualität gut ist, die Leitungen des Gebäudes mit dem Wasseranschluss verbinden.
- Die Regelung der bedarfsgeführten Umwälzmenge überprüfen
- Falls vorhanden, den Betrieb und die Regelung der Internumwälzung prüfen
- Die Beckendurchströmung mit Hilfe von Färbeversuchen überprüfen. Den Versuch sowohl bei Voll- als auch bei Teillast der Umwälzung durchführen (Einsparpotential sichern).
- Das Zeitprogramm und die händische Schaltung von Attraktionen überprüfen
- Wenn möglich die Leistung der Umwälzpumpen mit den Pumpenkennlinien bei geplanten Förderhöhen, Umwälzmengen abgleichen. (Falls die tatsächliche Leistung wesentlich größer ist als die auf der Pumpenkennlinie, könnte die Ursache in zu großen Druckverlusten im Rohrnetz liegen)
- Der Stromverbrauch der Schwimmbadtechnik oder der Umwälzpumpen sollten separat erfasst werden. Dazu sollten geeignete Diagramme auf der GLT zur Visualisierung voreingestellt werden. Diese dienen dann zur kontinuierlichen Überwachung des Stromverbrauchs der Schwimmbadtechnik im Betrieb. Der Betreiber sollte bei der Inbetriebnahme in Funktion, Aussage und Eingriffsmöglichkeiten unterrichtet werden.
- Sollwerte dokumentieren.

Lüftung

- Einregulierung der Lüftungsgeräte; sind die Geräte in Balance (Außen- und Fortluft)? (Die Hallen können auch mit leichtem Unterdruck betrieben werden).
- Sind die geplanten Filterqualitäten eingebaut und sauber? Passen die Filterstufen?
- Sind die Luftkanäle (Fort- und Außenluft) zwischen Lüftungsgerät und thermischer Hülle lückenlos gedämmt?
- Sind die Zuluft- und Abluftkanäle entsprechend der Planung gedämmt?
- Sind die Fort- und Abluftgitter entsprechend der Planung ausgeführt?
- Dichtheit der Klappen für die Außen- und Fortluftkanäle prüfen
- Einregulierung des Kanalnetzes und der Zu- und Abluftventile: Ziel ist es, die Luftmengen entsprechend der Planung zu verteilen, d.h. in der Regel sind mehrere Messreihen notwendig (iteratives Vorgehen). Wenn bei großen Kanalnetzen nicht jedes Ventil gemessen werden kann, sollten strangweise Messungen gemacht werden, um zu überprüfen, ob die einzelnen Bereiche mit den geplanten Luftmengen durchströmt werden. Die Einregulierung sollte nicht

mit den maximalen sondern den mittleren Volumenströmen durchgeführt werden. Dazu müssen Listen mit entsprechenden Angaben von den Planern vorbereitet sein.

- Geeignete Diagramme auf der GLT erstellen (Volumenströme, Regler Heizen, Entfeuchten, Kühlen, Regelgrößen wie Feuchte und Temperatur, Stromverbrauch). Diese dienen zur kontinuierlichen Betriebsüberwachung der Lüftung.
- Überprüfen der eingestellten Sollwerte: Temperatur, Feuchte, Mindestluftwechsel
- Sollwerte dokumentieren
- Überprüfen des Zeitprogramms nach Absprache zwischen Planer und Betreiber
- Überprüfen der Grenzwerte für den Frostschutz. (Dies ist vor allem interessant für kältere Nebenzonen. Beispiel: Wenn statt + 3 °C eine Grenztemperatur von - 3 °C gewählt wird, kann die Stundenanzahl des Frostschutzbetriebes auf ca. ein Viertel reduziert werden) [AkkP 52]
- Da die Regelung der Lüftung komplex ist und von verschiedenen Nutzungen des Bades beeinflusst wird, sollte ein zweiter zusätzlicher Inbetriebnahmetermin eingeplant werden, um den Betrieb anhand der zurückliegenden Zeitspanne zu überprüfen und ggf. anzupassen. Der Termin sollte so angesetzt werden, dass die Filtertechnik bereits eine kontinuierlich gute Wasserqualität liefert und das Bad mindestens ein oder zwei Monate normal genutzt wurde.
- Messung der Luftdichtheit des Kanalnetzes
- Stromeffizienz kann ermittelt werden, wenn die Möglichkeit besteht bei Nennvolumenstrom die Leistungsaufnahme des Lüftungsgerätes abzugreifen. Die so errechenbare Stromeffizienz (Leistung geteilt durch Nennvolumenstrom) gibt Hinweise zur Effizienz des Lüftungsgerätes und zu den Druckverlusten.

Beleuchtung

- Wurden die Leuchtmittel (LEDs) passend zu den Raumtemperaturen eingesetzt? Die Lebensdauer von LEDs ist temperaturabhängig.
- Präsenzmelder o.ä. mit eingestellte Nachlaufzeiten und Empfindlichkeiten prüfen
- Gruppenschaltungen zur optimalen Tageslichtausnutzung prüfen (Abgleich mit der Planung)
- Eingestellte Beleuchtungsszenarien (z.B. Standardbetrieb, Wettkampfbeleuchtung, Putzbeleuchtung) durchgehen und überprüfen
- Passen die eingestellten Zeitprogramme zu den tatsächlichen Nutzungszeiten?
- Einweisung des Betriebsleiters durch die ausführenden Firmen in die Bedienung der Beleuchtungsregelung auf der GLT bzw. in das Beleuchtungsprogramm
- Wenn der Stromverbrauch der Beleuchtung separat erfasst wird, sollten geeignete Diagramme auf der GLT voreingestellt sein. Diese dienen zur kontinuierlichen Überwachung des Stromverbrauchs der Beleuchtung im Betrieb.

Warmwasser Duschen

- Ist die Dämmung der Speicher lückenlos? Auch am Fußpunkt und Anschlußstellen sollten Wärmeverluste vermieden werden. Zur Überprüfung eignet sich ggf. eine Thermografieaufnahme.
- Ist die Dämmung der Wasserleitungen lückenlos? Auch kalte Leitungen müssen in warmen Bereichen zum Schutz vor Legionellen gedämmt sein. Bei kälteren Leitungen diffusionsdichte Dämmung verwenden um Kondensat zu vermeiden.
- Eventuell den Durchfluss der Duschen kontrollieren (Wasser in Eimer auffangen, Zeit stoppen).

- Ist eine geeignete Zeit für die selbstschließenden Armaturen eingestellt?
- Wenn intermittierender oder bedarfsgerechter Betrieb geplant ist, die Regelung der Pumpen und Frischwasserstationen überprüfen

Heizen und Kühlen

- Zeitprogramm und Regelung überprüfen
- Hydraulischen Abgleich durchführen
- Geeignete Diagramme auf der GLT erstellen (Heizung Becken, Heizung Räume, ggf. Kühlung Becken, ggf. Kühlung Räume). Diese dienen zur kontinuierlichen Überwachung des Heizwärmeverbrauchs im Betrieb. Es sollte leicht zu erkennen sein, wenn gleichzeitig geheizt und gekühlt wird, ausgenommen davon sind Kaltbecken oder kritische Serverräume o.ä. Diese sollten dennoch in einem (separaten) Diagramm für die kontinuierliche Überwachung dargestellt werden.
- Überprüfen, dass der Sonnenschutz hochgefahren wird bzw. entsprechende Meldung erscheint, wenn in den Gebäudeteilen geheizt wird.
- Ggf. Regelungen zur Nachtauskühlung von kälteren Nebenzonen (über Fenster oder Lüftungsgerät) überprüfen und mit Zeitsperren für den Winter belegen
- Sind die Pumpen im Teillastbetrieb geregelt ohne Drosselung durch Klappen?
- Ist das Heizregister im Lüftungsgerät ausreichend dimensioniert?
- Heizungsvorlauftemperatur nicht nach Außentemperatur regeln (Notfalls die Heizkurve extrem flach einstellen)
- Sollwerte dokumentieren

Passive Kühlung für kältere Nebenzonen

- Beschreibung der Funktionsweise: Fensterlüftung (manuell oder motorisch), Abluftbetrieb, Lüftungsanlage mit Sommerbypass, geöffnete Zwischentüren
- Beschreiben der Regelstrategie; bei manuellen Maßnahmen sicherstellen, dass diese durchgeführt werden
- Festlegen von begrenzten Zeiträumen (nur im Sommer)

Dokumentation der Inbetriebnahme

- Dokumentation was bei Inbetriebnahme geprüft wurde (z.B. Checkliste anhand der Punkte in diesem Kapitel)
- Einregulierungsprotokolle
- Sammlung aller Betriebsanleitungen und Produktdatenblätter
- Dokumentation von Programmierungen (textliche Erklärung des Programms und Flussdiagramme, so dass für den Betreiber, die Regelungen nachvollzogen werden können) inklusive eingestellten Sollwerten im Programmcode
- Eingestellte Sollwerte auf der GLT oder sonstigen Geräten
- Dokumentation, welche Diagramme/Listen bei der Inbetriebnahme voreingestellt wurden und zur kontinuierlichen Betriebsüberwachung benutzt werden sollen (Beispiele für Diagramme sind in Kap. 3 Lippe-Bad: Langzeitauswertung Energieverbrauch zu finden)
- Schulungsmaterial für das Personal vorbereiten

Liste für Datenblätter

- Lüftungsgeräte, Ventilatoren, Frequenzumrichter, Filter
- Nachheizregister
- Pumpen (z.B. Heizung, Warmwasser, Speicherladepumpen, Umwälzpumpen, Attraktionspumpen)
- Frequenzumrichter
- Motor für RWAs
- Wasserfilter
- Fensterrahmen, Türrahmen, Pfosten-Riegel, RWA, Verglasung
- Sensoren (Temperatur, Feuchte, CO₂)
- Leuchtmittel, Lampen
- GLT-Programm
- Zähler
- Speicher
- Wärmetauscher
- Messstation Beckenwasser
- Saunaofen

10.3 Betriebsführung und Betriebsoptimierung

Hallenbäder sind komplexe technische Gebäude, deren Betrieb von Fachleuten geführt werden muss. Es sollte einen verantwortlichen Betriebsleiter geben, der den Gesamtüberblick und die Befugnis hat, Betriebsanpassungen umzusetzen. Ob und wie weitere Verantwortlichkeiten delegiert werden hängt u.a. von der Größe des Bades ab. In jedem Fall ist es sinnvoll, Einführungsschulungen für das Personal durchzuführen. Neben dem Betriebsleiter können dazu auch die ausführenden Fachfirmen hinzugezogen werden. Dies könnte bereits in der Ausschreibung berücksichtigt werden.

Für einen erfolgreichen Betrieb müssen verschiedene Ziele kombiniert werden: z.B. Sicherheit, Kundenzufriedenheit, Dauerhaftigkeit und niedrige Betriebskosten (Energie + Personal). Schwerpunkt dieses Kapitels ist die Kontrolle des Energieverbrauchs. Diese sollte in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden, damit eine Zunahme des Energieverbrauchs ohne erwünschten zusätzlichen Nutzen schnell erkannt und Abhilfe geschaffen werden kann. Darüber hinaus sollte (gerade in den ersten Jahren) die Betriebsführung eine Betriebsoptimierung zum Ziel haben. Die gewünschte Nutzung sollte bei möglichst niedrigem Energieverbrauch erfüllt werden. Das Potential einer Betriebsoptimierung kann mit geringem monetärem Einsatz genutzt werden und zu großer Betriebskosteneinsparung über Jahre hinweg führen. Der Einsatz besteht meistens aus Arbeitsstunden des Betriebsleiters und ggf. kleinen investiven Verbesserungen. Im Hallenbad Bambados konnte z.B. nur durch Änderungen in der Regelung der Stromverbrauch aller Lüftungsgeräte signifikant um ca. 60 % reduziert werden (siehe Abb. 116).

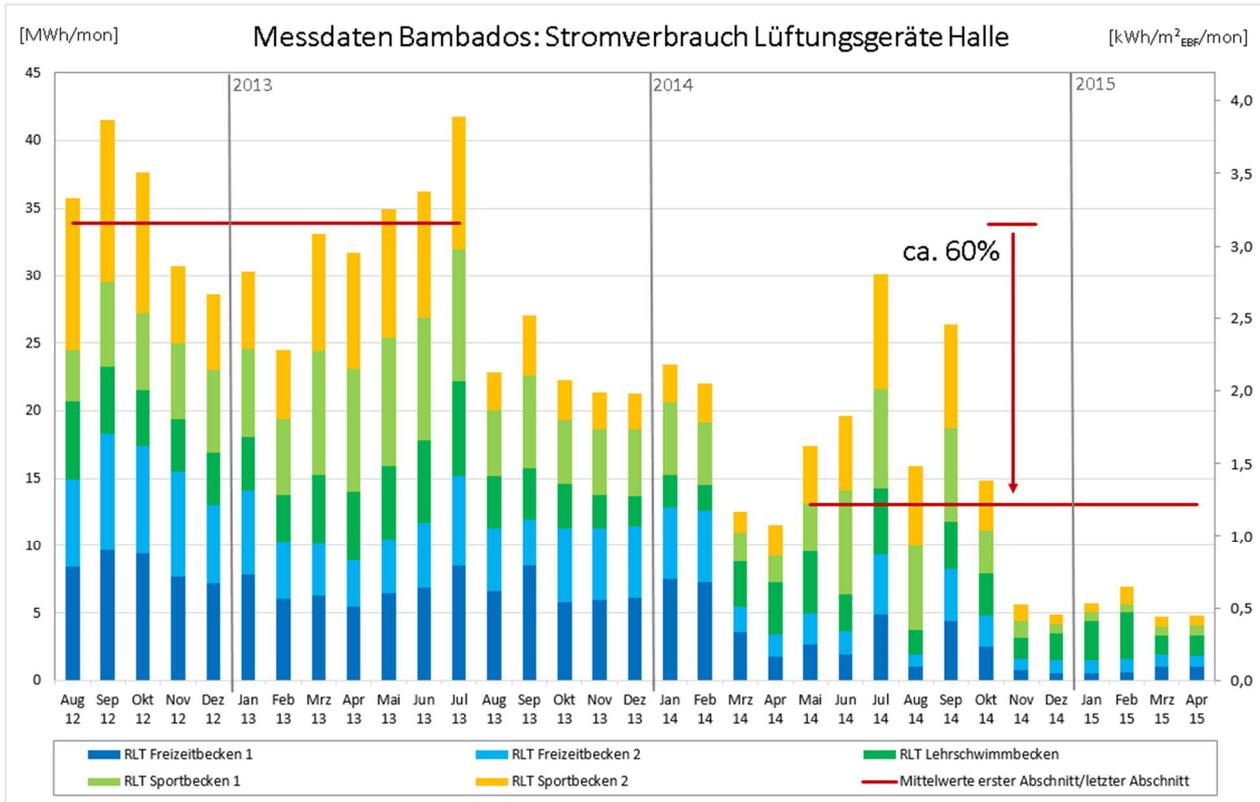


Abb. 116: Beispiel Hallenbad Bambados: Reduzierung des Stromverbrauchs durch Betriebsoptimierung (ohne zusätzliche Investitionen)

Die Betriebsoptimierung ist sehr wirtschaftlich, da sie oft ohne weitere Investitionen (bauliche Maßnahmen) auskommt. Die notwendige Technik ist meist schon vorhanden, wird aber nicht richtig genutzt. Trotzdem ist die Optimierung kein Selbstläufer, da die Betriebsleiter in der Regel viele andere, zum Teil prioritäre Aufgaben erfüllen müssen (Einhaltung der hygienischen Anforderungen, Organisation des Personals). Ansätze, die bei der Betriebsoptimierung helfen, sind z.B.:

- Schulung des Personals
- Hilfsmittel wie z.B. voreingestellte Kontrolldiagramme auf der GLT (Beispiel siehe Abb. 117), Checkliste (siehe Abb. 118 und Abb. 119)
- feste oder zusätzliche Zeit/Personal für die energetische Betriebskontrolle (inkl. Dokumentation)
- evtl. Motivation durch Teilhabe an der Kosteneinsparung
- Festlegung von Kontrollrhythmen
- regelmäßiger Austausch im Team und Abfragen von Ideen zur Optimierung

Vorrausschauende Betriebsführung

Um eine vorrausschauende Betriebsführung zu realisieren ist es grundlegend, Zusammenhänge zu verstehen und ein Verständnis zu entwickeln, welche Betriebsweisen/Ereignisse zu erhöhtem Energieverbrauch führen. Dabei ist es hilfreich auch die Größenordnung des Energieverbrauchs durch eine Änderung einschätzen zu können, um Aufwand und Nutzen einer Maßnahme abwägen zu können.

Folgende Beispiele tragen in der Regel zu einem erhöhten Energieverbrauch bei:

- Wärmeverluste nach außen (z.B. geöffnetes Tor des Technikellers)
- Wärmeverluste zu kälteren Temperaturzonen (z.B. dauerhaft offene Tür zwischen warmen Bereich und kälterem Büroteil oder zu gekühltem Küchen- oder Sportbereich)
- Verschattung bei gleichzeitigem Heizbedarf (z.B. heruntergefahrener Sonnenschutz)
- Erhöhte Druckverluste in Lüftungskanälen (z.B. halbverschlossene Außenluftklappen, verschmutzte Filter)
- Erhöhte Druckverluste in Wasserkreisläufen (z.B. Drosselklappen, verschmutzte Filter)
- Verdunstung (z.B. Schwallduschen und Sprudelliegen ohne Nutzer)
- Strombedarf (z.B. Betrieb der Rutschenpumpen ohne Nutzer)
- Unnötig hohe Lüftungsvolumenströme
- Zu häufige Rückspülungen der Filter
- Hohe Temperatursollwerte und niedrige Feuchtesollwerte

Hilfreich ist es, wenn Mitarbeiter immer wieder sensibilisiert werden, so dass alle mit einem wachen Auge den täglichen Betrieb begleiten und Auffälligkeiten melden können.

Kontrolle des Energieverbrauchs

Durch regelmäßige Kontrolle des Energieverbrauchs können ungewollte Veränderungen und ggf. damit verbundene Kostenzunahmen aufgedeckt werden. Die Kontrolle kann unterschiedlich detailliert ausgeführt werden. Am Wichtigsten ist ein Überblick über den Gesamtenergieverbrauch. Deswegen beginnt die Analyse mit den großen Verbrauchszählern am Hausanschluss. Anschließend kann man bei unerwünschten Veränderungen Schritt für Schritt weiter ins Detail gehen und die Verbräuche und Zusammenhänge analysieren.

Zunächst sollte der Energiebezug (Strom, Wärme, Gas, Wasser) ausgewertet werden. Dazu eignet sich eine Darstellung von Monatsverbräuchen im Jahresverlauf, so dass der Stromverbrauch im Januar mit dem Stromverbrauch des Januars im Vorjahr verglichen werden kann (siehe Abb. 117 als Beispiel). Auf diese Weise kann leicht gesehen werden, ob es wesentliche Abweichungen gibt. Außerdem kann beurteilt werden, ob der Verbrauch im Jahr konstant ist oder eine jahreszeitliche Schwankung aufweist (z.B. geringerer Raumheizwärmeverbrauch im Sommer als im Winter).

Eine genauere Beurteilung ist möglich, wenn Strom- und Wärmeverbrauch nach Nutzungsbereichen aufgeteilt erfasst werden (z.B. Schwimmhalle, Umkleiden usw.). Auch hier empfiehlt sich eine Darstellung wie oben beschrieben. Gibt es Auffälligkeiten oder Abweichungen sollte zu genaueren Darstellungen, wie Wochen- oder Tagesverläufen gewechselt werden. So kann man sich bei Auffälligkeiten in den einzelnen Bereichen Schritt für Schritt in die Tiefe vorarbeiten.

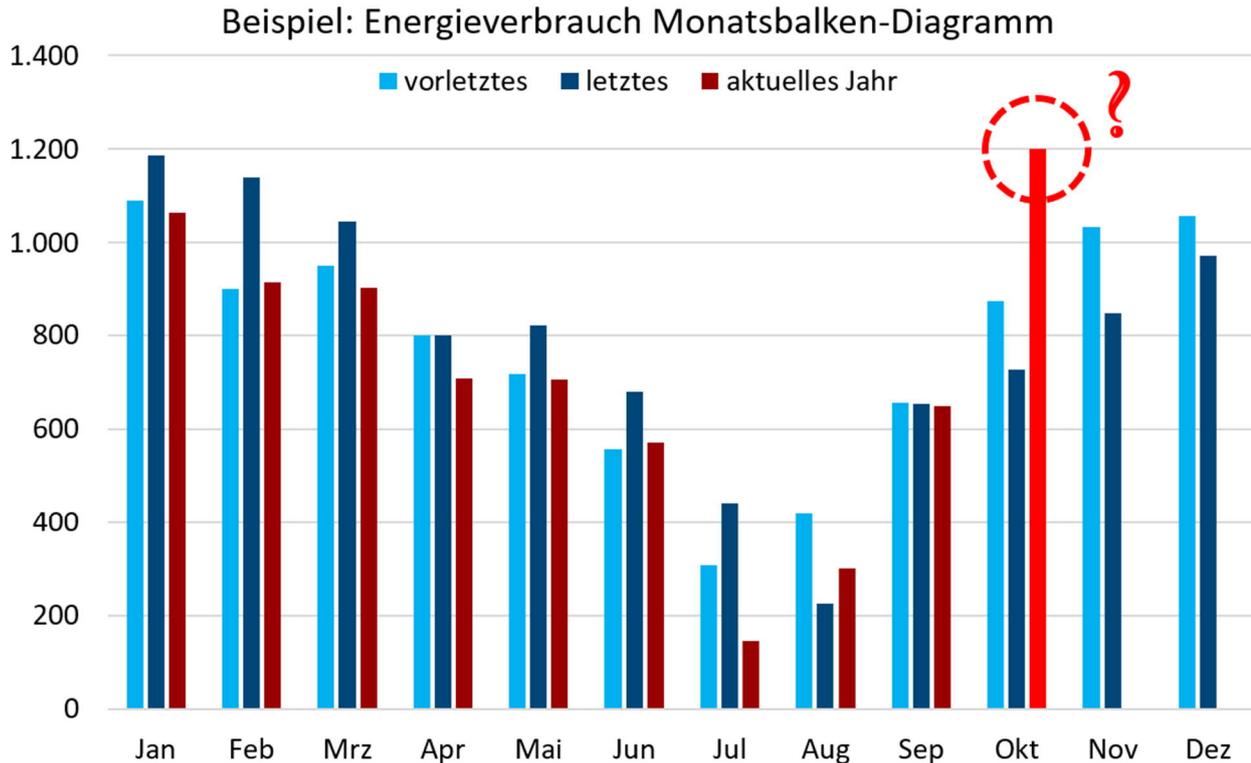


Abb. 117: In einer beispielhaften Darstellung von Monatsverbräuchen (Strom oder Wärme) im Jahresverlauf sind Änderungen leicht zu erkennen; Auswertung: Alle drei Jahre weisen jahreszeitliche Schwankung auf; der aktuelle Monat (Okt.) zeigt eine deutliche Auffälligkeit. Hier lohnt es sich nach der Ursache zu suchen.

Für die eigentliche Analyse des Energieverbrauchs und der Zusammenhänge können dann weitere Messwerte hilfreich sein. Wenn man sich z.B. für ein Lüftungsgerät die Regler (Entfeuchten, Heizen usw.) aus der Programmierung anzeigen lässt, kann leicht nachvollzogen werden, welche "Aufgabe" das Gerät zu einem bestimmten Zeitpunkt hatte. So kann z.B. nachvollzogen werden, wie häufig der Regler Heizen im Tagesverlauf aktiv ist, ob er an einem warmen Frühlingstag überhaupt aktiv wird. Unerwünscht wäre beispielsweise eine Heiz- und Kühlanforderung in kurzem zeitlichem Abstand (Takten) oder in zwei benachbarten Bereichen ohne ausreichende thermische Trennung. Auch Temperatur- oder Feuchteverläufe sowohl im Inneren des Gebäudes als auch außen können für die Auswertung hilfreiche Grundlage sein.

Nach der Inbetriebnahme eines Hallenbades, sollten die Daten für mindestens ein Jahr (nach Abschluss der Restarbeiten) im Detail analysiert werden, um Wechselwirkungen im Betrieb zu verstehen und Optimierungsmöglichkeiten aufzudecken. Nach erfolgreich abgeschlossener Betriebsoptimierung reicht es, mit wenig Aufwand monatliche Vergleiche zu ziehen. Um Abweichungen beurteilen zu können, ist es wichtig einen Betriebskalender zu führen, in dem Änderungen, Wartungen, besondere Nutzungen usw. dokumentiert werden. Zeigen sich bei der Kontrolle der monatlichen Energieverbräuche Abweichungen, kann im Betriebskalender nachgesehen werden, ob es nachvollziehbare Ursachen für diese Abweichungen gibt. Das erspart Zeit bei der Suche nach möglichen Fehlern, falls z.B. bei einer Wartung ungewollte Einstellungen vorgenommen wurden.

Sehr effektiv ist es, Zeiträume festzulegen, in denen die anfängliche Betriebsoptimierung in kleinerem Umfang wiederholt wird. Dies dient dazu, den Istzustand zu hinterfragen und weiteres Optimierungspotential zu identifizieren. Eventuell sind festgelegte Zeiten oder Sollwerte überholt. Wenn das gesamte Personal miteingebunden wird, können zusätzliche Rückmeldungen aus dem alltäglichen Betrieb berücksichtigt und weitere Ideen integriert werden, die dem Optimierungsprozess dienen. Durch diese Einbindung steigt die Motivation des Personals, bei der Umsetzung und Kontrolle von Maßnahmen zusammen zu wirken.

Die energetische Kontrolle deckt nicht nur höhere Energiekosten auf, sondern kann auch weitere positive Effekte auf den Betrieb haben. Es kommt immer wieder vor, dass Auffälligkeiten im Energieverbrauch auch auf Störungen im Betrieb hinweisen, die z.B. Folgen bzgl. Hygiene oder Dauerhaftigkeit haben können. Z.B. gibt ein hoher Stromverbrauch auf Grund verschmutzter Filter Hinweise auf evtl. verminderte Reinigungsleistung.

Checkliste

Die zur Verfügung gestellte Checkliste (auch als Exceldatei auf www.passiv.de verfügbar) dient als Hilfsmittel zur Betriebskontrolle und -optimierung. Sie kann an das jeweilige Bad angepasst und ergänzt werden. Sie könnte auch für ein Energieaudit hilfreich sein.

Die Liste gliedert sich in drei Teile:

- **A: Energiemanagement** (siehe Abb. 118): Klärung des allgemeinen Ablaufs sowie Festlegung von Terminen und Zuständigkeiten
- **B: Energieverbrauchskontrolle und Betriebsoptimierung** in 2 Stufen (siehe Abb. 119): Dieser Teil der Checkliste eignet sich für eine monatliche Kontrolle, wenn das Bad schon länger in Betrieb ist und Verbrauchswerte zum Vergleich vorliegen.
- **C: Detaillierte Analyse in Teilbereichen:** Zeigt die monatliche Kontrolle Auffälligkeiten, kann im Teil C der entsprechende Bereich für eine genauere Untersuchung zu Hilfe genommen werden. Teil C eignet sich auch für eine Betriebsoptimierung.

Die Checkliste geht davon aus, dass viele Zähler und Messpunkte auf die GLT aufgeschaltet und im Zeitverlauf analysiert werden können. Ist das nicht der Fall, können händische Ablesungen von Zählern weiterhelfen. Bleibt die Ursache eines Energieanstieges dennoch unerklärbar, können weitere temporäre Messungen in dem Bereich veranlasst, eine Aufschaltung von weiteren Messpunkten auf die GLT überlegt oder genauere Untersuchungen an Fachfirmen vergeben werden. Nicht alle Fragen der Checkliste können vom Betriebsleiter sofort beantwortet werden. Wenn sie aber relevant erscheinen, kann eine genauere Überprüfung in die Wege geleitet werden.

A Energiemanagement		Checkliste Hallenbad: jährlich
Schulung Personal		
		wann? Welche Schwerpunkte? Teilnehmer?
	- Regelmäßige Schulungen des Personals (Um eine vorrausschauende Betriebsführung zu realisieren ist es grundlegend, Zusammenhänge zu verstehen und ein Verständnis zu entwickeln, welche Betriebsweisen/Ereignisse zu erhöhtem Energieverbrauch führen)	
Führung eines Betriebskalenders		
		Wer führt? Wer meldet? Wer kann einsehen?
	- Betriebsänderungen, geänderte Sollwerte, besondere Nutzung, Reparaturen, Wartungen, Ausfälle/Stillstandszeiten, Schäden, neue Geräte, Änderung von Sollwerten/Zeiten	
	- Gründe der Änderungen notieren	
	- Notieren, ob dadurch Änderungen im Energieverbrauch zu erwarten sind (Strom, Wärme, Tag, Nacht, Mehrverbrauch, Minderverbrauch?)	
Zeitpläne		
		Termine, Zeitbedarf, Zuständigkeit?
	- regelmäßige Energieverbrauchskontrolle (Strom, Wärme, Wasser, Gas)	
	- Optimierungszyklen (Einholen von Ideen, Austausch im Team, genaue Analyse des Betriebs und des Energieverbrauchs)	
	- Filterwechsel Lüftungsgeräte	
	- Schwimmbadtechnik: Spülzeiten, -menge und -intervall kontrollieren	
	- Haar- und Faserfänger reinigen	
	- Sensoren (Temperatur, Feuchte, Präsenz) warten/kalibrieren	
	- selbstkalibrierende CO2-Sensoren regelmäßig über GLT prüfen (Funktionsprüfung)	

Abb. 118: Teil A der Checkliste dient der Festlegung von Terminen und Zuständigkeiten

B Energieverbrauchskontrolle und Betriebsoptimierung

**Checkliste Hallenbad:
monatliche Kontrolle**

Name: _____

betrachteter Zeitraum: _____

→	↑	↓	↗	↘
in Ordnung	Anstieg	Verringerung	Anstieg, aber Ursache behoben	Verringerung, aber Ursache behoben

Stufe 1

Energiebezug gesamt

*Ungewöhnliche Abweichungen? (Vergleich des Monatsverbrauchs mit dem Vormonat bzw. mit dem entsprechenden Monat der Vorjahre)
Zusammenhang mit durchgeführten Änderungen (siehe Betriebskalender)?*

	→	↑	↓	↗	↘	Warum? (erste Hinweise)
- Strom	<input type="checkbox"/>					
- Wärme	<input type="checkbox"/>					
- Gas	<input type="checkbox"/>					
- Wasser	<input type="checkbox"/>					
- _____	<input type="checkbox"/>					

nächste Stufe

Stufe 2

Wärme- und Stromverbrauch nach Nutzungen

Vergleich des Monatsverbrauchs mit dem Vormonat und mit dem entsprechenden Monat der Vorjahre: ungewöhnliche Abweichungen? Zusammenhang mit durchgeführten Änderungen (siehe Betriebskalender)? Jahreszeitliche Schwankungen wie erwartet/plausibel? Hilfreich für weitere Analysen ist es, wenn man sich notiert, wie der Verlauf des Verbrauchs aussehen soll (z.B. jahreszeitlicher Verlauf: Winter niedrig, Sommer hoch, aber niedrige Werte zu Schließzeiten)

Bei Abweichungen genauere Kontrolle der Verbrauchswerte (Wochen- und Tagesgänge) und dann weiter mit der nächsten Stufe.

Wärmemengenzähler:

	→	↑	↓	↗	↘	Veränderung langsam/schnell? Zeitpunkt? Warum? (erste Hinweise)
- Heizwärmeverbrauch Luftnacherhitzung	<input type="checkbox"/>					
- Heizwärmeverbrauch Wärmebänke etc.	<input type="checkbox"/>					
- Heizwärmeverbrauch Beckenwasser	<input type="checkbox"/>					
- Heizwärmeverbrauch WW	<input type="checkbox"/>					
- Heizwärmeverbrauch Sauna	<input type="checkbox"/>					
- _____	<input type="checkbox"/>					

Abb. 119: Teil B der Checkliste dient zur monatlichen Energieverbrauchskontrolle. Die gesamte Checkliste ist als Exceldatei auf www.passiv.de verfügbar.

11 Zusammenfassung

In Kürze die wichtigsten Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit zusammengefasst, mit Verweis auf die jeweiligen Kapitel.

Langzeitverbrauch

Die Langzeit-Analysen für das Lippe-Bad zeigen, dass der Wärme- und Stromverbrauch auch über lange Zeit überwiegend konstant bleiben und den Ergebnissen aus [Peper/Grove-Smith 2013] entsprechen. Der Gesamtverbrauch des Bades für Wärme beträgt gut 900 MWh/a und der Stromverbrauch liegt zwischen 700 und 800 MWh/a. Der Anteil der Abwärme-Nutzung (BHKW Gehäuseabwärme + Abgaswärmetauscher) liegt in beiden Jahren im Mittel bei 60% und trägt somit ganz erheblich zur Deckung des Heizwärmebedarfs bei.

Mit diesen Ergebnissen zeigt sich, dass das niedrige Verbrauchsniveau des Bades mit üblichen Schwankungen über die insgesamt 69 Monate gehalten wird. Es ist davon auszugehen, dass dieses Niveau im Normalbetrieb dauerhaft eingehalten werden kann.

Lüftungskonzept Schwimmhalle

Die Lüftung von Schwimmhallen hat zwei Hauptaufgaben: Die Sicherstellung guter Luftqualität (hygienische Lüftung zur Abfuhr vor allem von Desinfektionsnebenprodukten), sowie die Entfeuchtung der Hallenluft. Um die Lüftungs-Energieverluste gering zu halten, sollte auf eine hohe Effizienz der Wärmerückgewinnung geachtet werden.

Die bisherige zusätzliche Aufgabe der Lüftung, die Fassade kondensatfrei zu halten, indem die Verglasung mit trockener Luft angeblasen wird, entfällt in der Regel im Passivhaus auf Grund der hohen thermischen Qualität. Dies ermöglicht es, die Lüftungsgeräte nur mit Außenluft zu betreiben und die Geräte ggf. kleiner zu dimensionieren (siehe Kapitel 6.1 "Auslegung der Schwimmhallen-Lüftungsgeräte"). Der übliche Umluftanteil nach VDI 2089 kann im Passivhaus-Hallenbad entfallen oder zumindest deutlich reduziert werden, wodurch signifikante Stromeinsparungen erreicht werden. Dies wurde durch Versuchsreihen im Lippe-Bad in der Praxis bestätigt (siehe Kapitel 6.2.2 "Versuch zur Reduzierung des Umluftvolumenstroms" und 6.2.3 "Stromeinsparung durch reduzierte Umluft"). Der Außenluftvolumenstrom wird nach dem Entfeuchtungsbedarf geregelt, sollte aber einen Mindestvolumenstrom zur hygienischen Lüftung nicht unterschreiten. Die Verdunstung des Beckenwassers kann durch verschiedene Maßnahmen verringert werden, wodurch die benötigte Entfeuchtungsleistung der Lüftung sinkt. Effiziente Maßnahmen sind höhere Luftfeuchten und verdunstungsarme Überlaufrinnen, das Abschalten von nichtgenutzten Attraktionen und das Ausschalten der Überlaufrinne im Ruhebetrieb. Temporäre Versuchsreihen im Lippe-Bad bestätigten die Auswirkung erhöhter Raumluftfeuchte im Betrieb (siehe Kapitel 6.2.1 "Versuche mit geänderter Hallenfeuchte").

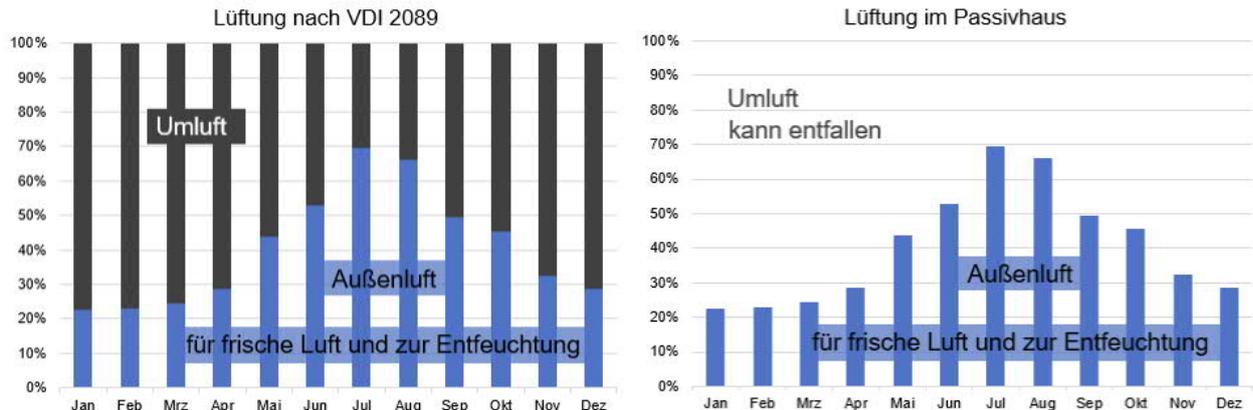


Abb. 120: Vergleich des Volumenstroms zwischen Lüftung nach VDI 2089 und nach Passivhaus-Konzept. (Dargestellt sind Monatsmittelwerte)

Um das oben beschriebene Lüftungskonzept ohne Umluft umzusetzen, hat das Passivhaus Institut als Hilfestellung für weitere Projekte eine exemplarische Lüftungsregelung ausgearbeitet (siehe 6.6 "Programmierung Lüftungsgerät Schwimmhalle").

Luftschadstoffe und Luftführung in Schwimmhalle

Ein zentraler Punkt zur Realisierung eines Hallenbades nach dem Passivhauskonzept ist die energetisch motivierte Reduzierung des Umluftanteils. Dabei sind die entscheidenden Parameter der Luftqualität zwingend zu berücksichtigen. Bei Bädern entstehen durch Chlorung zur Sicherstellung der Beckenwasserhygiene sogenannte Desinfektionsnebenprodukte (DNP). Im Fokus der Gesundheitsbewertung sind insbesondere die entstehende Gruppe der Trihalogenmethane (THM). Bei unzureichender Hallenlüftung kann sich THM in der Hallenluft anreichern. Im Beckenwasser dient das THM als Indikatorsubstanz für die Beurteilung der Badewasser-Qualität. Der Zusammenhang zwischen der Schadstoffkonzentration und dem Außenluftanteil sowie dem Wegfall bzw. der Reduktion der Umluft wurde mit den, in drei Hallenbädern (Lippe-Bad, Bambados und Familienbad Niederheid) durchgeführten Messkampagnen, systematisch untersucht (siehe Kapitel 6.5 "Schadstoffmessungen (THM)").

Es zeigt sich, dass im Vergleich zu den in der Literatur angegebenen Durchschnittswerten die Messwerte in den drei Bädern als gut zu bewerten sind. Die gemessenen THM-Konzentrationen im Bambados liegen niedrig mit den Mittelwerten der Hallen zwischen 14 und maximal 64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Im Sportbereich wird allerdings erkennbar, dass die Luftführung noch nicht optimal gelöst ist (Kurzschlussströmung). Insgesamt wird aber für das Bambados mit der Lüftung ohne Umluft gemäß dem Passivhaus-Konzept eine gute Lufthygiene mit niedrigen THM-Werten erreicht. Die Reduktion bzw. der Wegfall der Umluft kann in diesem Rahmen bedenkenlos durchgeführt und empfohlen werden.

Im Lippe-Bad liegen die gemessenen THM-Konzentrationen etwas höher als im Bambados. Dies liegt einerseits daran, dass bereits die Konzentrationen im Beckenwasser (Quelle der Luftbelastung) höher sind (Mittelwerte aller Wassermessungen 14 gegenüber 24 $\mu\text{g}/\text{l}$ im Bambados)

und andererseits, vermutlich, an der Art der Hallendurchströmung (Anordnung Zu- und Abluft). Die versuchsweise Absenkung der Umluftvolumenströme führt in den Hallen zu einer Erhöhung der THM-Konzentrationen. Absolut sind die neun Messwerte im Lippe-Bad ohne die Umluftreduktion (Gesamtmittelwert über Wasseroberfläche: $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$) mit den aus der Literatur angegebenen Werten vergleichbar. Auch bei der Umluftverringerung liegen die gemessenen Spitzenwerte mit maximal $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich unter den in der Literatur beschriebenen Spitzenwert-Konzentrationen (453 bzw. $219 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [Jentsch/ Matthiessen 1998] [GSF 1997]. Da die Luftführung im Lippe-Bad nicht ohne großen Aufwand verändert werden kann, wird eine Umluftreduktion nur moderat und in den Nachtstunden empfohlen.

Die geringste Belastung in der Hallenluft wurde in Niederheid erreicht ($8 - 31 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Das Bad wird mit einem reduzierten Umluftanteil betrieben. Die sehr niedrigen Konzentrationen sind an erster Stelle Folge der geringen THM-Konzentrationen im Beckenwasser. Die Messwerte in der Luft zeigen eindeutig, dass das Prinzip der "Schichtlüftung" eine gute Hallendurchströmung selbst bei verringertem Volumenstrom bewirkt. Die THM-Belastung im Umgang und damit die Belastung für das Badpersonal sind nochmal eindeutig reduziert. Die Messung zeigt, dass die "Schichtlüftung" auch in Bezug auf die Schadstoffabfuhr für Hallenbäder zu empfehlen ist. Diese Ergebnisse werden auch durch die durchgeführten Strömungssimulationen bestätigt. Im Vergleich mit den besten aufgeführten Literaturwerten ($8 - 28 \mu\text{g}/\text{m}^3$) aus [Junek et al. 2017] können die Messwerte vom Sportbad Niederheid sehr gut mithalten.

Insgesamt kann damit belegt werden, dass bei einer angepassten Luftführung (optimal sind: Schichtlüftung, Absaugung auf Niveau Badeplatte) ein Hallenbad sehr gut mit reduziertem bzw. komplett ohne Umluftanteil betrieben werden kann, ohne dass dies die Luftqualität beeinträchtigt. Damit sind dauerhaft deutliche Stromeinsparungen realisierbar.

Die Messreihen zur Luftqualität in den drei Hallenbädern wurden durch CFD-Simulationen ergänzt, mit denen unterschiedliche Luftführungskonzepte hinsichtlich einer effektiven Schadstoffabfuhr verglichen; Mit dem Ziel, konkrete Hilfestellungen für die Planung und Auslegung der Luftführung anbieten zu können (siehe Kapitel 6.4 "Luftführung in der Schwimmhalle (CFD Simulationen)". In der Gesamtanalyse zeigen die Simulationsergebnisse eine deutliche Tendenz: Bei Positionierung der Abluft in Bodennähe werden höhere Schadstoffabfuhr-Effizienzen erzielt. Dabei scheint die genaue Anordnung keinen sehr großen Unterschied zu machen. Diese Ergebnisse sind im Einklang mit den energetischen Vorteilen einer Schichtlüftung, bei der sich durch die Abluftabsaugung in Bodennähe eine vorteilhafte Schichtung bildet mit hoher Feuchte direkt über der Wasseroberfläche. Eine unten positionierte, nach oben gerichtete Zuluft einbringung entlang der Innen- oder Außenwand kann eine zusätzliche leichte Verbesserung gegenüber einer Einbringung von oben ermöglichen; scheint aber nicht ausschlaggebend für die Lüftungseffizienz. Selbstverständlich sind bei der Planung die Randbedingungen im Einzelfall zu berücksichtigen.

Lüftungskonzept Nebenzonen

In Hallenbädern gibt es außer der Schwimmhalle immer verschiedene Nebenzonen mit anderen Temperatur- und Feuchteverhältnissen. Es ist hilfreich, schon im Entwurf die Anforderungen der

Räume abzuklären und entsprechend zu Zonen gleicher Temperatur- und/oder Feuchteanforderungen zusammenfassen. Zonen mit sehr unterschiedlichen Lufttemperaturen sollten thermisch getrennt werden. Für die Wahl der Lüftungszonen sollten folgende Faktoren berücksichtigt werden: Solltemperatur, maximale Temperaturen, Entfeuchtungsbedarf, Nutzungszeiten und Nutzungsschwankungen. Es muss festgelegt werden, welche Räume zusammen von einem Lüftungsgerät versorgt werden und wie viele Lüftungsgeräte insgesamt geplant werden. Es hat Vorteile wenn sich die Temperatur- und Lüftungszonen decken. Mit vielen kleinen Lüftungsgeräten kann am besten nach dem tatsächlichen Bedarf geregelt und so die Energie- und Komfortziele erreicht werden. Gleichzeitig sollen natürlich die Investitionskosten gering und die Regelung einfach gehalten werden, so dass es sinnvoll ist, einen praktikablen Mittelweg zu wählen und Bereiche zusammenzufassen. Grundlegende Aufgabe der Lüftung ist es für einen hygienischen Luftwechsel zu sorgen; gleichzeitig kann die Lüftung aber auch zur Beheizung der Nebenräume dienen, so dass separate Heizkörper entfallen können.

Bei der Umsetzung sind die folgenden Maßnahmen zielführend: Druckverlustarmes Kanalnetz, effiziente Ventilatoren, guter Wärmebereitstellungsgrad, bedarfsgerechte Regelung des Volumenstroms.

Schwimmbadtechnik

Ein Großteil des Energieverbrauchs in Schwimmbädern wird für die Bereitstellung des warmen hygienischen Beckenwassers benötigt. Zum einen fällt Heizbedarf zur Erwärmung des Beckenwassers an und zum anderen wird elektrische Energie zur Reinigung und Beförderung des Beckenwassers benötigt (Umwälzung, sowie Betrieb von Attraktionen). Mit einer wohlgedachten Planung der Schwimmbadtechnik inkl. Komponentenauswahl und Optimierung der Betriebsweise kann der Energiebedarf erheblich gesenkt werden. Aufgrund der meist höheren Temperaturen und Belastung (mehr Badende) bei Nichtschwimmer- und Freizeitbecken gegenüber Schwimmerbecken, ist dort das Einsparpotential höher und besonders auf hohe Effizienz zu achten.

Durch Aufbereitung der Messdaten aus dem Lippe-Bad und dem Bambados, sowie ergänzende Berechnungen wurden im Rahmen dieser Studie Referenzwerte für den Strom- und Heizwärmebedarf für Schwimmer- und Nichtschwimmerbecken abgeleitet und konkrete Planungsempfehlungen dokumentiert (siehe Kapitel 7 "Schwimmbadtechnik: Leitfaden").

Elektrische Energie: Beim Strombedarf der Wasseraufbereitungsanlage stehen die Pumpen zur Beckenwasserumwälzung im Vordergrund. Durch deren lange Laufzeiten und vergleichbar hohe Leistungen machen sich selbst kleine Verbesserungen energetisch und kostenseitig stark bemerkbar. Insbesondere durch eine Auslegung des Rohrleitungsnetzes mit reduzierten Druckverlusten (ca. 5-10 mWS sollten im Betriebspunkt angestrebt werden), die Pumpenauswahl (Gesamtwirkungsgrad > 70%, optimiert auf die Druckverluste im Betriebspunkt), sowie eine bedarfsgeregelte Betriebsweise mit zeitweise Absenkung des Umwälzvolumenstroms, kann der Stromverbrauch langfristig reduziert werden. Für den Teillastbetrieb sind geringe Absenkungen

über einen langen Zeitraum gegenüber starken kurzzeitigen Absenkungen vorzuziehen. Bei effizienten Systemen kann ein Stromverbrauch von 25-40 W je m³/h Umwälzvolumenstrom erreicht werden (bezogen auf den Aufbereitungs-Volumenstrom bei Nennbelastung und mit Belastbarkeitsfaktor $k = 0,5 \text{ m}^{-3}$). Dies entspricht bei Sportbecken einer mittleren Heizleistung von ca. 10-17 W/m² und bei Nichtschwimmer- und Variobecken ca. 17-29 W/m² (bezogen auf die Beckenfläche).

Heizwärme: Es ist zu erwarten, dass der Heizwärmebedarf für Beckenwasser bei effizienten Lösungsansätzen im Bereich von ca. 400-700 kWh/(m²Wfa) liegt (siehe Kapitel 8.5 "Energieverbrauch Erwärmung Beckenwasser"). Allerdings gibt es hier viele Einflussfaktoren, die starke Abweichungen verursachen können und einen Vergleich ohne weitere Informationen erschweren (z.B. Wechselwirkung mit Effizienz der Schwimmbadtechnik und Wärmeeintrag durch Badende). Um die Einflüsse bereits während der Planungsphase besser beurteilen zu können und als Grundlage für die energetische Optimierung, wurde im Rahmen dieses Projektes ein Tool zur Berechnung der Energiebilanz von Schwimmbecken erstellt und mit Messdaten aus dem Lippe-Bad abgeglichen. Generell gilt: Je niedriger die Wassertemperatur, desto niedriger der Heizwärmebedarf. Die Temperatur sollte also entsprechend der vorgesehenen Nutzung und des Besucherkomforts möglichst niedrig gehalten werden. Zudem ist die benötigte Menge an täglichem Beckenfrischwasser ausschlaggebend für den Heizwärmebedarf. Deswegen sollte bei der Planung bei der Wahl der Schwimmbadtechnik darauf geachtet werden, dass die benötigten Frischwassermengen nicht unnötig höher ausfallen als hygienisch notwendig und sinnvoll (30 Liter pro Badegast). Systeme zur Wärmerückgewinnung und/oder Spülabwasseraufbereitung können, insbesondere bei hohem Frischwasserbedarf, effektiv dazu beitragen den Heizbedarf zu senken. Maßnahmen zur Reduktion der Verdunstung sind sehr förderlich (wie z.B. eine erhöhte Hallenluftfeuchte oder ein bedarfsgeregelter Betrieb der Wasserattraktionen), da die Verdunstung i.d.R den Hauptanteil der Wärmeverluste ausmacht.

Kosten-Nutzen-Analyse

Die Möglichkeiten zur Energie- und Wassereinsparung in Hallenbädern sind vielseitig und mit unterschiedlichem Kosten- und Arbeitsaufwand verbunden. Während einige Maßnahmen im Wesentlichen in nur einer Anpassung der Regelungsstrategie bestehen (z.B. bedarfsgerechte Lüftung), erfordern andere Maßnahmen eine Anpassung der Komponenten mit z.T. erhöhten Investitionskosten. Für die Entscheidungsfindung ist für den Bauherren oft ausschlaggebend, ob diese zusätzlichen Investitionskosten wirtschaftlich sind. Als Hilfestellung für die Planung wurden für den vorliegenden Bericht einige Maßnahmen im Bereich der Gebäudetechnik ausgewählt und hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit analysiert (siehe Kapitel 9 "Kosten-Nutzen-Analyse"). Für die Analyse wurden zum Teil Erfahrungswerte und konkrete Maßnahmen des Lippe-Bades verwendet und zum Teil Referenzmaßnahmen anhand eines typischen 25 m Sportbeckens. Die Ergebnisse dieser Analysen sind als Beispiele und Richtwerte anzusehen. Da die Randbedingungen und tatsächlichen Maßnahmen sich im Detail bei jedem Projekt unterscheiden, sind diese Ergebnisse nicht direkt übertragbar und eine Einzelfallbetrachtung ist notwendig.

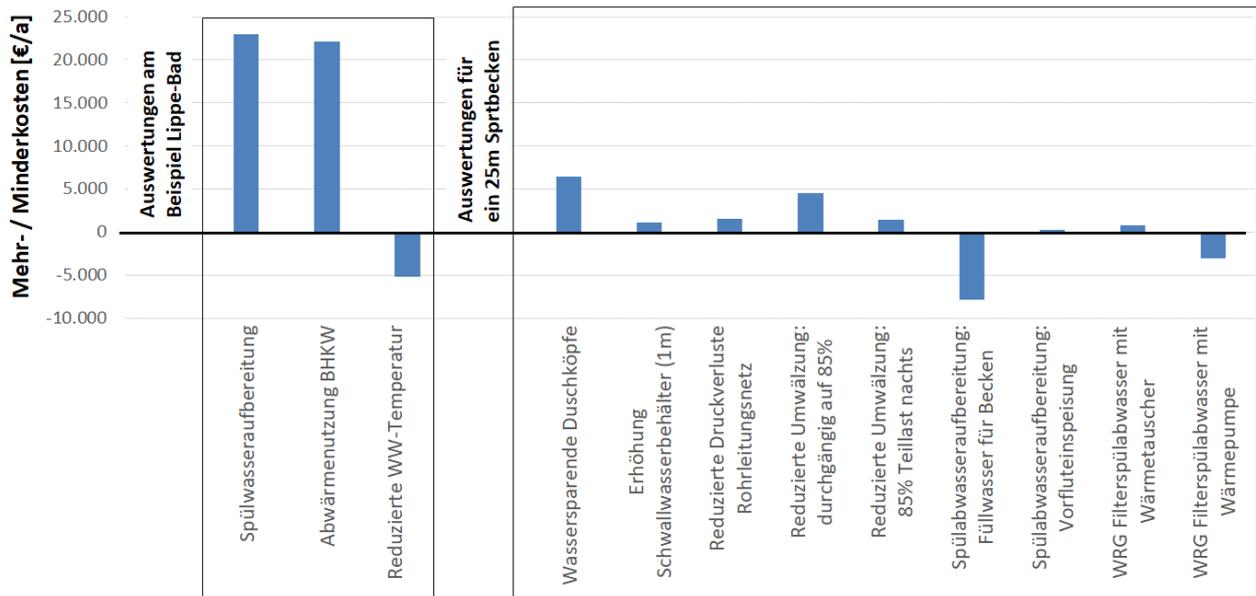


Abb. 121: Ergebnisübersicht der Kosten-Nutzen-Analyse: Eingesparte Kosten pro Jahr. Je höher der Wert, desto mehr lohnt sich die Maßnahme aus wirtschaftlicher Sicht. Negative Werte entsprechen jährlichen Mehrkosten, d.h. die Maßnahme ist nicht wirtschaftlich, kann aus anderen Gründen aber dennoch sinnvoll sein.

Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung

Mit der Inbetriebnahme eines Hallenbades wird sichergestellt, dass die geplanten Funktionen der Gebäudetechnik in der Realität funktionieren und die entsprechende Leistung erbringen. Durch unterschiedliche Tests wird die Technik im Betrieb mit allen Wechselwirkungen innerhalb des kompletten Bades überprüft. Darüber hinaus müssen bei der Inbetriebnahme konkrete Einstellungen für das Bad vorgenommen und justiert werden. Dabei werden die Sollwerte festgelegt bzw. angepasst.

Für den Bauherrn ist die Inbetriebnahme wichtig, um zu überprüfen, ob alle beauftragten und notwendigen Funktionen vorhanden und anwendbar sind. Dies ist auch genau der Zeitpunkt, zu dem das Wissen zur Technik und zu allen Einstellungen, die von den Fachfirmen vorgenommen wurden, an den Betreiber weiter gegeben wird. Diese Wissensvermittlung ist eine entscheidende Grundlage für einen funktionalen Betrieb, die Betriebsoptimierung und damit für die zukünftigen Betriebskosten (Energie, Wartung usw.)

Hallenbäder sind komplexe technische Gebäude, die von Fachpersonal betrieben werden müssen. Ein verantwortlicher Betriebsleiter sollte den Gesamtüberblick haben und die Befugnis Betriebsanpassungen umzusetzen. Ob und wie weitere Verantwortlichkeiten delegiert werden hängt u.a. von der Größe des Bades ab. In jedem Fall ist es sinnvoll, Einführungsschulungen für das Personal durchzuführen. Neben dem Betriebsleiter können dazu auch die ausführenden Fachfirmen einbezogen werden, was bereits in der Ausschreibung berücksichtigt werden könnte.

Für einen erfolgreichen Betrieb müssen verschiedene Ziele kombiniert werden: z.B. Sicherheit, Kundenzufriedenheit, Dauerhaftigkeit und niedrige Betriebskosten (Energie + Personal). Eine Kontrolle des Energieverbrauchs sollte in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden, damit eine Zunahme des Energieverbrauchs ohne erwünschten zusätzlichen Nutzen schnell erkannt und Abhilfe geschaffen werden kann. Hierzu wird eine Checkliste auf www.passiv.de zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus sollte (gerade in den ersten Jahren) die Betriebsführung immer auch eine Betriebsoptimierung umfassen und zum Ziel haben. Die gewünschte Nutzung sollte mit möglichst niedrigem Energieverbrauch realisiert werden. Das Potential einer Betriebsoptimierung kann mit geringem monetärem Einsatz genutzt werden und zu großer Betriebskosteneinsparung über Jahre hinweg führen. Der Einsatz besteht meistens aus Arbeitsstunden des Betriebsleiters und ggf. kleinen investiven Verbesserungen. Im Hallenbad Bambados konnte z.B. nur durch Änderungen in der Regelung der Stromverbrauch aller Lüftungsgeräte signifikant um ca. 60 % reduziert werden.

Fazit/Ausblick

Passivhaus-Schwimmbäder funktionieren, sparen in erheblichem Umfang Betriebskosten, und sind damit in der Lage kommunale Haushalte deutlich zu entlasten. Dies ist vielleicht das entscheidende Argument, um ein solches Angebot auch bei steigenden Energiepreisen für Bürger aufrecht zu erhalten. Mit den hier entwickelten Empfehlungen und Tools werden wichtige Hilfestellungen gegeben, die in eine sorgfältige Planung einfließen müssen. Die gewonnen Erkenntnisse und Planungswerte erleichtern es, die wesentlichen Einflussfaktoren für die Planung, den Bau und den Betrieb von energieeffizienten Hallenbädern zu identifizieren und zu optimieren.

Ergänzend zu diesem ausführlichen Bericht werden weitere Dokumente als Zusammenfassung und Planungshilfe über die Homepage des Passivhaus Instituts veröffentlicht:

http://passiv.de/de/05_service/03_fachliteratur/030306_hallenbad.htm

- Kurzleitfaden
- Ausführlicher Leitfaden mit konkreten Handlungsempfehlungen
- Checkliste zur Betriebskontrolle und -optimierung

12 Literaturverzeichnis

[AkkP 52]	Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase V, Protokollband Nr. 52: Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung als Erfolgsfaktoren für energieeffiziente Gebäude. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2017.
[Bay. Landesamt 2012]	Energieeffizienz in Schwimmbädern, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg, 2012
[BGL 2011]	Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie, Bädergesellschaft Lünen, Lünen 2011.
[Biasin/Krumme 1974]	Biasin, K., Krumme, W.: Die Wasserverdunstung in einem Innenschwimmbad, Elektrowaerme International 32 (A3) A115-A129, 1974.
[CLG 2014]	Vogt, T.: Abschlussberichte 14/02/1402976s: Beurteilung der Analysenergebnisse zu den Prüfberichten 14/02/1402976 und 14/03/1406004, Projekt: Bambados Bamberg; Raumluft- und Beckenwasseruntersuchungen auf Trihalogenmethane Chemisches Labor Dr. Graser CLG, Schonungen 2014.
[CLG 2017-A]	Prüfbericht 17/02/1702476 Bambados Bamberg Beckenwasser und Prüfbericht 17/02/1702482 Bambados Bamberg Hallenluft; Analysenergebnisse der Raumluft- und Beckenwasseruntersuchungen auf Trihalogenmethane; Chemisches Labor Dr. Graser CLG, Schonungen 07.02.2017
[CLG 2017-B]	Prüfbericht 17/02/1703913 Lippe-Bad Lünen Beckenwasser und Prüfbericht 17/02/1703883 Lippe-Bad Lünen Hallenluft; Analysenergebnisse der Raumluft- und Beckenwasseruntersuchungen auf Trihalogenmethane; Chemisches Labor Dr. Graser CLG, Schonungen 27.02.2017
[CLG 2017-C]	Prüfbericht 17/02/1705701 Sportbad Niederheid/Düsseldorf Beckenwasser und Prüfbericht 17/02/1705683 Sportbad Niederheid/Düsseldorf Hallenluft; Analysenergebnisse der Raumluft- und Beckenwasseruntersuchungen auf Trihalogenmethane; Chemisches Labor Dr. Graser CLG, Schonungen 13.03.2017
[DIN 19643]	DIN 19643-1: Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser, Teil 1: Allgemeine Anforderungen, November 2012.
[GesAmtBW 2015]	http://www.gesundheitsamt-bw.de/oegd/Gesundheitsthemen/UmweltGesundheit/Chemische-Risiken/Desinfektionsnebenprodukte , abgerufen am 23.01.2015.
[Gollwitzer 2011]	Gollwitzer, E., Grove-Smith, J., 15. Internationale Passivhaus Tagung in Innsbruck, AG Nichtwohngebäude im Passivhaus

	Standard; Planungsaspekte für öffentliche Hallenbäder, Darmstadt 2011.
[Gollwitzer 2014]	Gollwitzer, E., Schnieders, J., Fachzeitschrift „Gebäude Energie Berater“, Ausgabe 7/8 2014: „Passivhaus-Standard für Supermärkte und Hallenbäder, Versteckte Potenziale“.
[Gollwitzer et al. 2015]	Gollwitzer, E., Gressier, F., Peper, S.: Passivhaus Hallenbad Bambados: Monitoring, Passivhaus Institut, August 2015
[GSF 1997]	Koller, U.: http://www.gesundheitsamt.de/alle/umwelt/wasser/allg/beck_bw.htm , GSF-Forschungszentrum und Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, abgerufen am 23.01.2015.
[Huyeng 2015]	Huyeng, T.: Untersuchung der Temperatur- und Feuchteverteilung in der Luft des Passivhaus-Hallenbades „Bambados“ zur Beurteilung der Verdunstungsmengen des Beckenwassers, Darmstadt 2015.
[Jentsch/Matthiessen 1998]	Jentsch, Dr. F; Matthiessen, Dr. A.: Trihalogenmethane in Hallenbädern mit Meerwasser- und Sole-Becken. In: AB Archiv des Badewesens 03/1998, Deutsche Gesellschaft für das Badewesen, 1998
[Jovanovic et al. 1993]	Jovanovic, S.; Wallner, T.; Gabrio, T.: Haloform-Belastungen des Badewassers, der Luft und von Schwimmern und Schwimmeister in Frei- und Hallenbädern. Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg, 1993
[Junek et al. 2017]	Junek, R.; Stottmeister, Dr. E.; Voigt, K.; Grummt, Dr. T; Rosbach, J.: Desinfektionsnebenprodukte in einem Hallenbad und deren toxikologisches Gefährdungspotenzial. In: AB Archiv des Badewesens 03/2017, Deutsche Gesellschaft für das Badewesen, 2017
[Kaluza 2014]	Kaluza, J.: Interner Bericht der Vorortmessungen am 20.10.2014, Ingenieurbüro inco GmbH, Aachen 2014.
[Kaluza 2014a]	Kaluza, J.: Verbesserung der Stromeffizienz von Schwimmbädern. In: Feist, W. (Hrsg.): Tagungsband der 18. Internationalen Passivhaus Tagung 2014 in Aachen. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2014
[Kaluza 2016]	Kaluza, J.: Aktuelle Versuche: Luftführung abwärts! In: Dr.Jentsch Schwimmbadseminare "Energieeffizienz", Nürnberg, 2016.
[Kaluza 2018]	Private Mitteilung J. Kaluza an das Passivhaus Institut, Mai 2018.
[KOK 2002]	Koordinierungskreis Bäder: Richtlinien für den Bäderbau, Essen 2002.
[KOK 2013]	Koordinierungskreis Bäder: Richtlinien für den Bäderbau, Essen 2013.
[Krieger 2015]	Krieger, M.: Energetische Optimierung des Beckenwasserkreislaufs in einem Passivhaus-Schwimmbad, Darmstadt 2015.

[Peper/Grove-Smith 2013]	Peper, S; Grove-Smith, J.: Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen, Passivhaus Institut, Darmstadt 2013.
[Rojas 2017]	Rojas, G.: CFD-Simulation für Lüftung in Schwimmhallen. Universität Innsbruck, Innsbruck, 2017.
[Sacré et al. 1993]	Sacré, C.; Schwenk, M.; Jovanovic, S.; Wallner, T.; Gabrio, T.: Haloform-Belastung des Badewassers, der Luft und von Schwimmern und Schwimmeister in Frei- und Hallenbädern. Kurzbericht. Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg.
[SBFBauten 2012]	Fachzeitschrift „Sport Bäder Freizeitbauten Ausgabe“ 2/2012: „Energieverbrauch Vergleich Freizeitbäder Norddeutscher Raum“.
[Schulz et al. 2009]	Schulz, T.; Pfluger, R.; Grove-Smith, J.; Kah, K.; Krick, B.: Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad. Veröffentlicht: Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.
[Shah 2014]	Shah, M.M.: Methods for Calculation of Evaporation from Swimming Pools and Other Pater Surfaces. ASHRAE Transactions, vol. 120, part 2, 2014.
[Stadt Frankfurt 2014]	Magistrat der Stadt Frankfurt am Main, Dezernat Planen, Bauen, Wohnen und Grundbesitz, Hochbauamt, Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen 2014
[Tardif et al. 2016]	Tardif, R.; Catto C.; Haddad, S.; Simard, S.; Rodriguez, M.: Assessment of air and water contamination by disinfection by-products at 41 indoor swimming pools. Environmental Research 148, (411-420), 2016
[ÜÖBV]	ÜÖBV 2011, 2012, 2013: Überörtlicher Betriebsvergleich Bäderbetrieb (ÜÖBV 2011, 2012, 2013) der deutschen Gesellschaft für das Badewesen
[VDI 2089]	VDI-Richtlinien. VDI 2089-1 Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern, Hallenbäder. Hrsg. Von Verein Deutscher Ingenieure. Verein Deutscher Ingenieure, 2009.