

1

43. Jahrgang
Februar 2021, S. 1-11
ISSN 0171-5445

Sonderdruck

Bauphysik

Wärme | Feuchte | Schall | Brand | Licht | Energie



Luftbrunnenanlage des Burgtheaters Wien: Nachhaltige Klimatisierungsstrategien

Günther Kain
Friedrich Idam
Alfons Huber
Markus Goldsteiner

Luftbrunnenanlage des Burgtheaters Wien: Nachhaltige Klimatisierungsstrategien

Das Ende des 19. Jahrhunderts errichtete Burgtheater in Wien ist eines der bedeutendsten Sprechtheater Europas. Es verfügt über eine aus der Errichtungszeit stammende Luftbrunnenanlage zur Frischluftversorgung und Konditionierung des Zuschauerhauses. Dabei wird Frischluft im nahegelegenen Volksgarten angesaugt und über einen unterirdischen Gang und Bodenauslässe in den Zuschauerraum geführt. Warme, verbrauchte Luft wird über die Decke des Zuschauerhauses und eine drehbare Öffnung auf dem Dach des Theaters abgeführt. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden an maßgeblichen Stellen des Belüftungssystems Sensoren zur Überwachung von Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit platziert. Schließlich wurden Optimierungspotenziale in der Betriebssteuerung und eine adiabate Luftkühlung durch Wasservernebelung evaluiert. Es konnten dabei erfolgsversprechende Handlungsoptionen zur nachhaltigen Konditionierung des Burgtheaters formuliert werden.

Stichworte Luftbrunnenanlage; Simple Smart Buildings; nachhaltige Klimatisierung; Bauforschung

1 Einleitung

In der aktuellen Krisensituation (Covid 2019), in der mit begrenzten finanziellen Mitteln und begrenzten energetischen Ressourcen die ständig wachsenden Anforderungen der Gebäudekühlung bewältigt werden sollten, stellt die Suche nach langjährig bewährten „best practice“-Beispielen eine erfolgsversprechende Problemlösungsstrategie dar. Historische Gebäudekonditionierungsanlagen, die seit über 100 Jahren in Betrieb sind, haben einen harten Evolutionsprozess überstanden; es sind die besten Systeme, die weder in Funktion noch bei den Betriebskosten zu schlagen waren. Sie sind aber auch Teil unseres baukulturellen Erbes, und in ihnen steckt ein Schatz an Erfahrungswissen, den es zu heben gilt. Der hier als Simple Smart Systems vorgestellte Ansatz basiert einerseits auf praktischem Erfahrungswissen, andererseits auf den Ergebnissen der Bauforschung, die in einem multidisziplinären Team erarbeitet wurden.

An der Errichtung des Burgtheaters in Wien wirkten zu Ende des 19. Jahrhunderts nicht nur die besten Architekten wie Gottfried Semper und Carl Hasenauer, die erstklassigsten Künstler wie Gustav Klimt sondern auch der innovativste Haustechniker dieser Zeit: der Militärarzt Dr. Carl Böhm und sein technischer Berater Professor Eduard Meter. Die in ihren Grundzügen erhaltene und

Air well system of the Burgtheater Vienna: sustainable cooling strategies

The Burgtheater Vienna was built at the end of the 19th century and it is one of the most important straight theatres in Europe. It is equipped with an air well system for the fresh air supply and conditioning of the auditorium. The air is drawn in at the Volksgarten nearby and led to the auditorium via an underground tunnel. Warm and used air is dissipated through the ceiling and the roof of the theatre. The original dimensions of the facilities are still apparent.

In the framework of this study, temperature, humidity and air velocity sensors were positioned at significant places along the ventilation system and the data was evaluated over the summer 2019. As a result, optimization potentials regarding operation control and air cooling using water atomization were evaluated. Finally, it was shown that the air well system can be used to sustainably condition the theatre in a time of rising temperatures.

Keywords air well system; simple smart buildings; sustainable air conditioning; building history

zum überwiegenden Teil immer noch in Funktion stehende Luftbrunnenanlage ist nicht nur ein herausragendes technisches Denkmal, sondern darüber hinaus ein instruktives Beispiel für nachhaltige, energieeffiziente Gebäudekühlung mit beachtlichem Zukunftspotenzial.

Die Frage nach der Belüftung („Ventilation“) und/oder Beheizung von großen Räumen und öffentlichen Gebäuden wurde in Wien bereits in der 1. Hälfte des 19. Jahrhunderts ausführlich diskutiert. Die Thematik einer hygienisch notwendigen und krankheitspräventiven Lüftungs- und Heizungstechnik hat vom (Militär-)Spitalswesen ihren Ausgang genommen. Eine zentrale Rolle bei deren Erforschung hat dabei das dem „Josephinum“ angeschlossene ehemalige Garnisonsspital gespielt. Dort führte der Militärchirurg Dr. Carl Böhm (1827–1901) ab 1860 Experimente und vergleichende Untersuchungen auf dem Gebiet der Beleuchtung, Beheizung und Belüftung durch. So setzte er beispielsweise den aus England kommenden, wegen seines weißen Lichtes „Sonnenbrenner“ (sunburner) genannten Gasluster gleichzeitig zur Beleuchtung und Entlüftung des Operationssaales ein – eine Beleuchtungs- und Auftriebstechnik, die auch im Wiener Burgtheater 20 Jahre später Anwendung finden sollte. Carl Böhm war zunächst als Chirurg an der Rudolfstiftung tätig, die er 1870 bis 1887 leitete. Ab dieser Zeit galt er im Wien der Gründerzeit aber auch im süddeutschen Raum

auf dem Gebiet der „Gesundheitstechnik“ – der Krankheitsprophylaxe durch Lufthygiene – als Autorität [1; 2]. Das Burgtheater war nach der Hofoper der zweite große Ringstraßenbau, dessen Luftheizung und Belüftung nach den Plänen Böhms ausgestattet wurde. Zahlreiche weitere Projekte (Hofmuseen, Börse, Parlament, Universitätsbibliothek u.a.) und zuletzt die Neue Hofburg – der Wohntrakt der kaiserlichen Familie – folgten. Böhms Maximen waren (abgesehen von der durch die Dampf-Zentralheizung verdrängten Warmluftheizung) bis nach dem 1. Weltkrieg in Wien „State of the Art“.

Der in 8–10 Meter Tiefe angelegte Luftbrunnen ist von seinem Wirkprinzip ein Luft-Erdwärmetauscher. Dabei wird die Außenluft im Winter vorgewärmt und im Sommer gekühlt. Gleichzeitig erfolgt auch innerhalb gewisser Grenzen eine gepufferte Regulierung der relativen Luftfeuchte: Beim Abkühlen feuchtschwüler Sommerluft kondensiert ein Teil des Wasserdampfes am offenporigen Putz der kühlen Mauerflächen und wird dort gespeichert. Im günstigsten Fall wird schwüle Luft auf die Behaglichkeitsgrenze von 11 g/m^3 (bei 20°C) Wasserdampfgehalt entfeuchtet. Mit dem steigenden Feuchtigkeitsgehalt im Porenraum steigt die Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmauerwerks, wodurch der Temperaturabfluss ins kühle Umgebungserdreich forciert und die Kühlleistung gesteigert wird. Mit großer Wahrscheinlichkeit war der Boden mit gestampftem Lehm, der ebenfalls ein guter Feuchtepuffer ist, bedeckt. Teilweise war der Boden vermutlich mit Steinbelägen (eventuell steinernen Rinnen versehen), um den Ablauf des für die Luftwäscheeinrichtung (im Folgenden beschrieben) erforderlichen Wassers zu ermöglichen.

Die einmalige Konstruktion des Burgtheaters bestand darin, dass die Luft in drei Ebenen aufbereitet wird. Die Einströmung der Luft erfolgte in der kühlen Nordwestecke des Volksgartens über ein von Rosen, Büschen und Bäumen umstandenes, vor Vandalismus geschütztes Einlaufwerk in das unterste 3. Kellergeschoß. Als erste Drosselklappe an der Mündung fungiert eine 4 Meter hohe Drehtür, die über Kettenzüge gesteuert wurde und im Winter bei tiefem Frost geschlossen werden konnte. Unmittelbar danach wird (durch Klappen gesteuert) der Luftstrom geteilt, wobei die Außenluft entweder über einen Luftwäscher zur Reinigung der Luft geführt oder im südlichen Gang direkt weitergeleitet wurde. Unterhalb des Ganges befinden sich bis heute zwei Grundwasserbrunnen, deren Wasser für die Luftreinigung genutzt wurde. Weiters findet sich ein Sedimentationsbecken in dem das zur Luftreinigung genutzte Wasser gesammelt und nach der Schmutzabscheidung über einen Überlauf wieder dem Brunnen zugeführt wurde. Nochmals teilt sich der Luftstrom, wobei in der Mitte der ganze Querschnitt von einem Ventilator eingenommen wird. Der linke Lüftungsgang dient bis heute der Umluftbeimischung und der rechte Lüftungsgang diente bis vor kurzem dem Motor eines riesigen Langsamläuferventilators als Aufstellungsort. Die großen strömungsoptimierten Luftgänge dienten der widerstandsarmen Luftfeinbrin-

gung. Es ist offenkundig, dass man daran dachte, solange wie möglich die Luft als Schwerkraftlüftung selbsttätig strömen zu lassen. Lediglich bei zu geringen Druckunterschieden, etwa bei Aufführungen an heißen Sommerabenden, konnte der Ventilator zugeschaltet werden. Ein Luftfilter und eine wasserberieselte Befeuchterstrecke (die aus hygienischen Gründen heute stillgelegt ist) sorgte vor allem im Winter für eine physiologisch adäquate Nachbefeuchtung der trockenen Außenluft. Vermutlich haben diese Anlagenteile bei der Eröffnung des Hauses noch nicht bestanden. Haustechnikpläne aus der Bauzeit stützen die These, dass man nach dem Krieg die Luftwäschanlage bei der Luftbrunnengabelung stillgelegt und als Ersatz die damals gängige Ölfilteranlage und die Luftbefeuchtungsanlage eingebaut hat.

In der Mitte des Gebäudes, direkt unter dem Zuschauerraum, wird die Luft vertikal nach oben geführt. Im 2. Kellergeschoß befand sich ein Raum in dem mittels eines riesigen Heizregisters die Lufttunnelluft erwärmt wurde. Dort befand sich auch eine Beruhigungszone für die Lufttunnelluft. Die Kaltluft und die Warmluft wurden mittels einem ausgeklügelten Einströmtrichter, welcher in angelehnter Form dem Venturiprinzip folgt, mit Zuluft verschnitten.

Die ursprüngliche Luftmischkammer befand sich direkt unter dem Parterre. Dort wurde die konditionierte Luft in einem ausgeklügelten Verteilsystem einerseits direkt zu den unter jedem Sitz der Parkettreihen angebrachten vergitterten Zuluftschnitten geleitet, andererseits wurde sie über verschiedene vertikale Steigschächte den Logen zugeführt. So verfügte ursprünglich z.B. jede Loge über je einen Zuluft- und Umluftschacht. Die Luftmenge konnte spätestens nach der Wiedereröffnung nach dem 2. Weltkrieg für nahezu jeden Sitz im Parterre separat geregelt werden.

Die verbrauchte Abluft wurde über kleine Schächte sowie über eine große Abströmöffnung an der Decke des Zuschauerraumes in den Dachraum geführt, wo ursprünglich ein riesiger gasbetriebener „Sonnenbrenner“ für den nötigen Auftrieb zur Entlüftung über Dach sorgte. Das kegelförmige Dach des Burgtheaters läuft seit fast 140 Jahren drehbar auf Rollen, wobei eine große, als Blasengel ausgeführte Windfahne die Abluftöffnung immer nach Lee dreht.

Das Burgtheater war im 2. Weltkrieg durch Bombenschäden betroffen. Die zerstörten Ventilationsschächte wurden nach dem Krieg instand gesetzt und mit zeitgemäßer Technik ausgestattet. Bei der Zuschauerraumlüftung bedeutete diese Modernisierung eine Verlegung der Heizregister und Filtereinrichtungen. Die großzügigen Lüftungsräume, -schächte und -gänge sowie die erhaltenen Originalpläne sind bis heute Zeitzeugen der Intentionen des Planers [3].

Gegenstand dieses Artikels ist die Evaluierung der aktuellen Effektivität der historischen Luftbrunnenanlage im

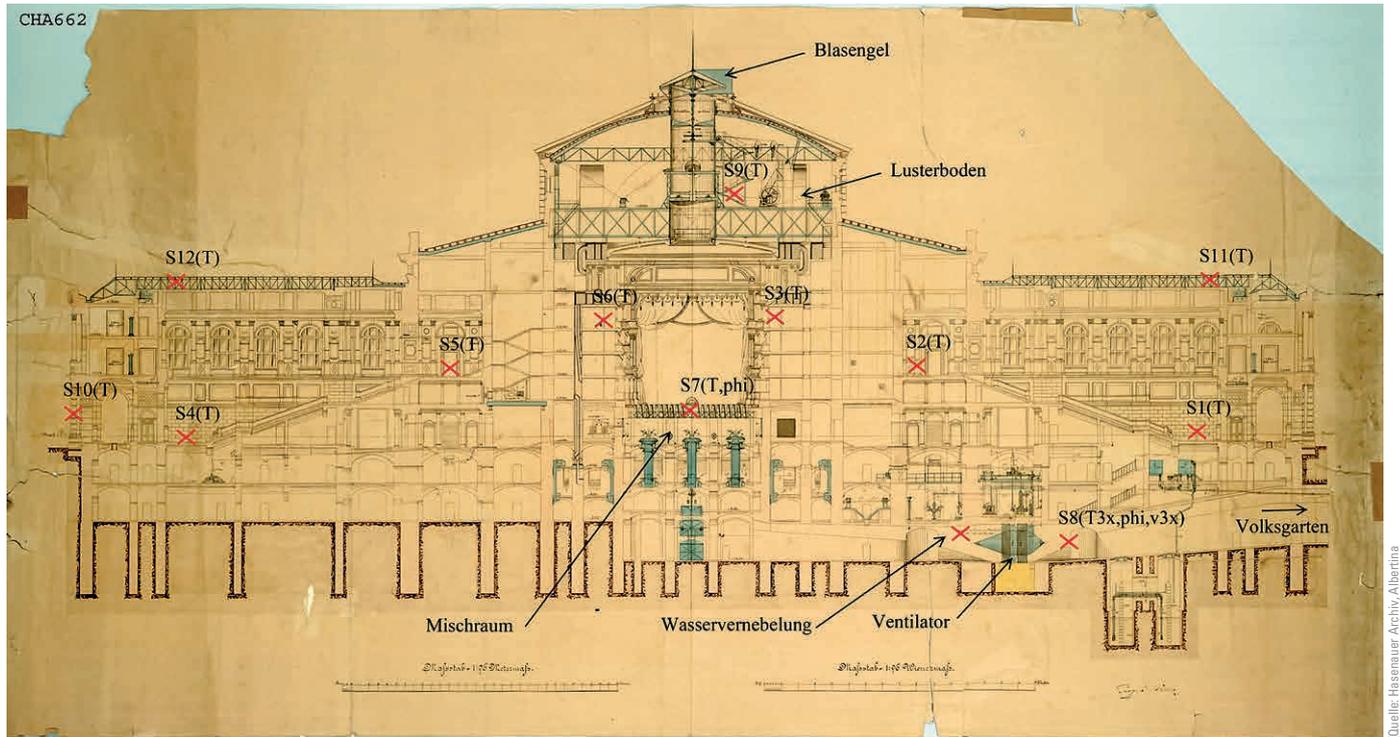


Bild 1 Schnitt durch das Burgtheater in Nord-Süd-Achse mit Positionen der Sensoren
Cross section through the Burgtheater Vienna along the north-south axis, sensor positions indicated

Burgtheater Wien und die Bewertung von minimalinvasiven Optimierungsoptionen zur Reduzierung der Lufttemperatur im Zuschauerhaus.

2 Methodik

Das Wiener Burgtheater wurde vom 3. Kellergeschoß bis zum Dachboden mit Messsensoren bestückt, welche die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit sowie Luftvolumenströme an signifikanten Stellen in 10-minütigen Zeitschritten aufzeichneten. Dabei sollte ein Temperaturquerschnitt in Nord-Süd-Achse durch das Gebäude gelegt werden (Bild 1).

Die Messperiode umfasst den Zeitraum vom 17. Juli bis zum 18. September 2019. Die erfassten Messgrößen und im Einsatz befindlichen Sensortypen und Datenlogger sind in Tabelle 1 dargestellt.

Nördlich des Wärmetauschers im Luftbrunnen wurde eine leistungsfähige Wasser-Vernebelung mit einer Durchflussmenge von etwa 2 m³ Frischwasser pro Stunde installiert und versuchsweise temporär betrieben. Während folgender Zeiträume wurde Wasser in die Zuluft gesprüht: 23. Juli 15:15–22:30 Uhr (Außentemperaturmaximum 30,7°C), 24. Juli 15:00 Uhr bis 25. Juli 7:00 Uhr (30,4°C), 5. August 8:00–13:00 Uhr (27,4°C), 6. August 7:00–13:00 Uhr (27,7°C).

Um die Zusammenhänge zwischen den jeweiligen zeitlichen Temperaturverläufen bewerten zu können, wurde diese mittels uni- und bivariaten Regressionsfunktionen

evaluiert (Gl. 1) und die jeweilige Anpassungsgüte des Modells mittels Bestimmtheitsmaß (R^2) nach Gl. 2 bewertet.

$$\hat{T} = b_1 \cdot T_1 + b_2 \cdot T_2 + b_0 \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\sum_i (\hat{t}_i - \bar{t})^2}{\sum_i (t_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

- \hat{T} Schätzung für die abhängige Variable T (Temperatur an verschiedenen Stellen)
- $b_{1,2}$ Regressionskoeffizienten
- b_0 konstantes Glied, entspricht einer Verschiebung des Temperaturverlaufs entlang der Ordinate
- $T_{1,2}$ unabhängige Variablen, entsprechen den Bezugstemperaturen als erklärende Variable
- t_i, \hat{t}_i einzelne Werte der geschätzten und tatsächlichen Temperatur
- \bar{t} Mittelwert der betrachteten Temperatur über den Messzeitraum

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Temperaturmessungen

Die gemessenen Temperaturen sind in Bild 2 bis Bild 7 visualisiert und in Tabelle 2 zusammengefasst. Dabei trat am 26.7. um 18:21 Uhr ein Außentemperaturmaximum von 31,6°C (Messstelle Eingang Feststiege nordseitig) auf und am 18.9. um 8:41 Uhr ein Minimum von 14,2°C,

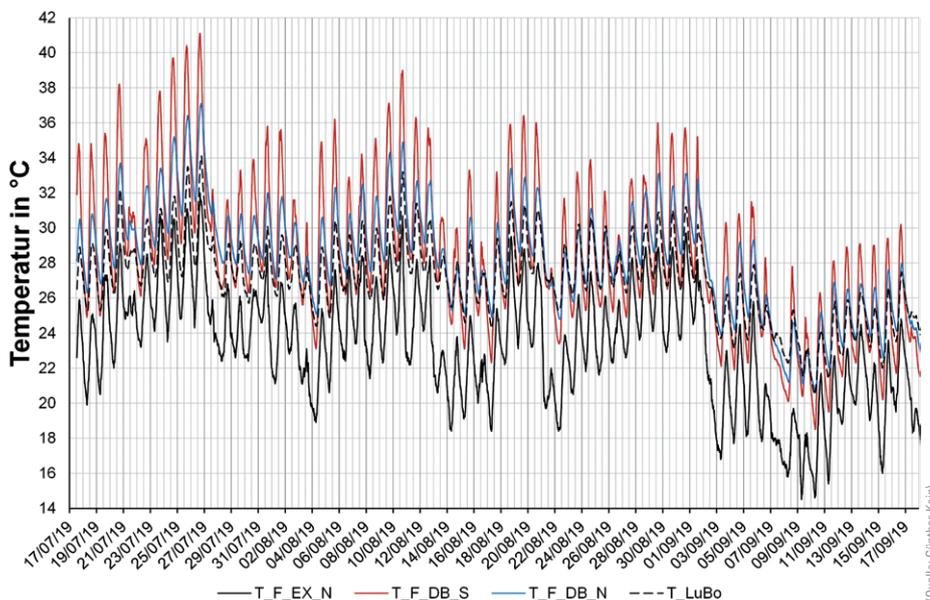
Tab. 1 Sensorpositionen, Sensortypen und erfasste Messgrößen
Sensor position, sensor types and recorded measured variables

Sensorbezeichnung (Typ)	Position	Messgröße	Kennung
S1 (Testo 174T)	Eingangshalle Feststiege südseitig (volksgartenseitig), ausgefallen am 28.7.	Lufttemperatur in °C	T_F_EI_S
S2 (Testo 174T)	Vorhalle nach Aufgang Feststiege südseitig		T_F_AU_S
S3 (Testo 174T)	4. Galerie in Achse Nord-Süd, südseitig		T_R_S
S4 (Testo 174T)	Eingangshalle Feststiege nordseitig (Seite Café Landtmann)		T_F_EI_N
S5 (Testo 174T)	Vorhalle nach Aufgang Feststiege nordseitig		T_F_AU_N
S6 (Testo 174T)	4. Galerie in Achse Nord-Süd, nordseitig		T_R_N
S7 (Almemo 2590)	Zuschauerraum Parkett, südseitig vor der Bühne, Aussetzer bedingt d. Bühnenbetrieb	Lufttemperatur in °C, rel. Luftfeuchtigkeit in %	T_B phi_B
S8 (Almemo 5690)	Luftbrunnen 10 m vor Ventilatoren, mittig im Gang auf 1,5 m Höhe,	Lufttemperatur in °C, rel. Luftfeuchtigkeit in %, Luftgeschwindigkeit in m/s	T_LB phi_LB v_LB
S9 (Testo 174T)	Lusterboden, zentral, zugluftgeschützt	Lufttemperatur in °C	T_LuBo
S10 (Testo 174T)	Einfahrtsbereich Feststiege nordseitig, außen, im Schatten gelegen	Außenlufttemperatur in °C	T_F_EX_N
S11 (Testo 174T)	DG über Feststiege südseitig	Lufttemperatur in °C	T_F_DB_S
S12 (Testo 174T)	DG über Feststiege nordseitig	Lufttemperatur in °C	T_F_DB_N

wobei die Außentemperatur im Messzeitraum eine Standardabweichung (S) von 3,3°C aufweist.

Die Abhängigkeit der Temperatur im Innenraum von der Außentemperatur wurde mittels Bestimmtheitsmaß (R^2) untersucht. Dabei zeigte sich, dass sich die Außentemperatur relativ direkt im Dachgeschoß (DG) über den Feststiegen und am Lusterboden abbildet ($R^2 > 0,8$, Bild 2). Im Durchschnitt beträgt die Temperatur im DG südseitig wie nordseitig 28°C, am Lusterboden 27°C. Die Standardabweichung, als Maß für die Stärke der Temperatur-

schwankungen, beträgt im DG nordseitig wie am Lusterboden in etwa 3°C, im DG südseitig rund 4°C. Dabei wird die Außentemperaturamplitude im südseitigen DG deutlich verstärkt, nordseitig und am Lusterboden leicht abgeschwächt (Bild 3). Dies ist vor allem dadurch erklärlich, dass das nordseitige Feststiegenhaus über eine hinterlüftete Kaltdachkonstruktion verfügt und geringerer Sonneneinstrahlung über die Fensterflächen ausgesetzt ist. Die starke Temperaturüberhöhung am Dachboden ist nicht durch die Außenlufttemperatur, sondern nur über direkten Strahlungseinfluss durch die Blechdächer erklär-

**Bild 2** Außentemperatur, Lufttemperatur im Dachboden süd- und nordseitig und am Lusterboden
Outside air temperature, air temperature in the attic south and north and in the chandelier attic

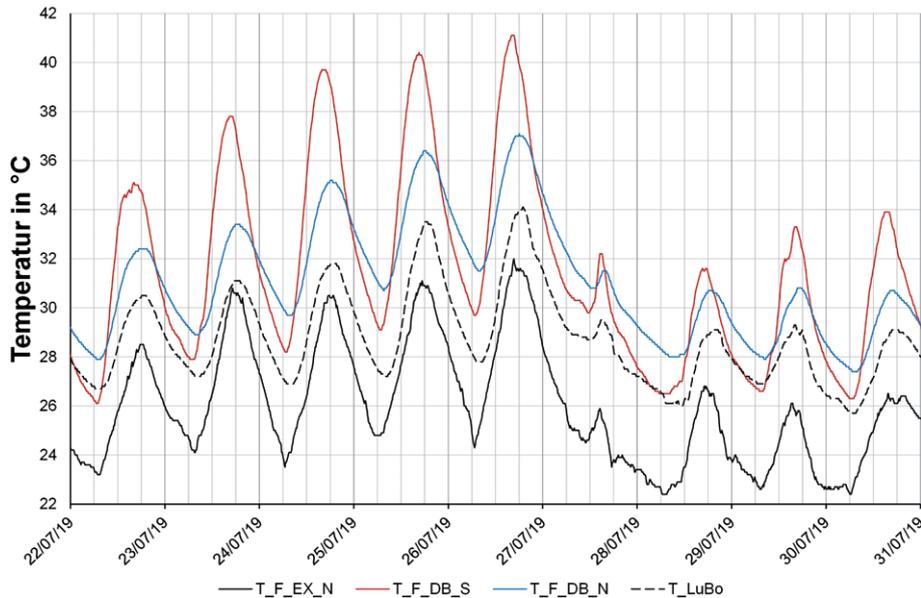


Bild 3 Zeitlicher Ausschnitt aus Bild 2
Time section from Figure 2

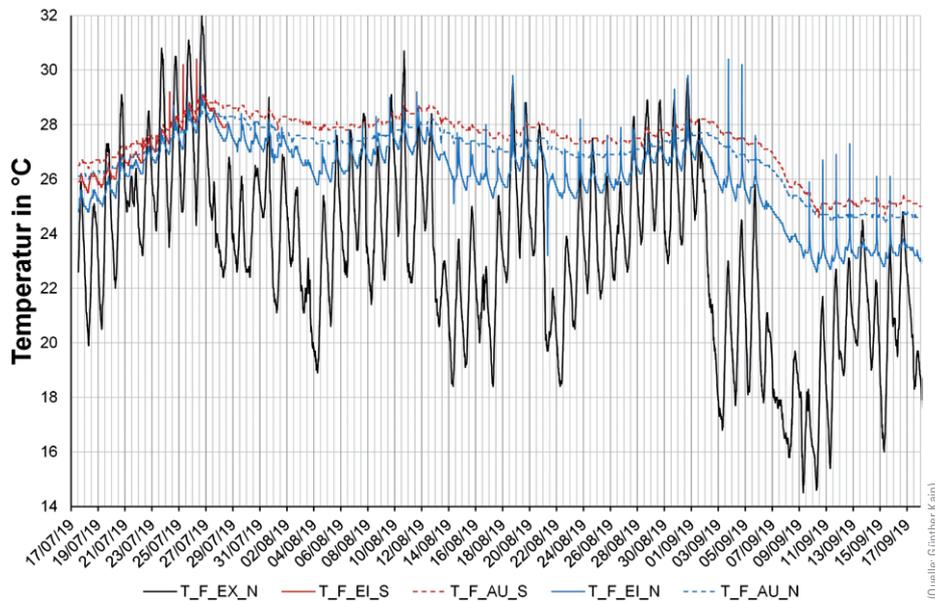


Bild 4 Außentemperatur, Lufttemperatur im Eingangsbereich und nach dem Stiegenaufgang im süd- und nordseitigen Feststiegenhaus
Air temperature outside, in the entrance area and after the staircase in the southern and northern splendor staircase

bar. Die gegenüber der Lufttemperatur zeitlich verschobenen Temperaturmaxima sind auf die Gebäudedämmung zurückzuführen. Das nördlich gelegene Stiegenhaus (Bild 3, $T_{F_DB_N}$; blau) wird von der solaren Strahlung erst in der zweiten Tageshälfte erreicht, kühlt aber auffallenderweise trotz Hinterlüftung weniger aus.

In den Gebäudeflügeln der Feststiegen bildet sich die Außentemperaturamplitude deutlich weniger stark ab (südseitig $R^2 = 0,84$; nordseitig $R = 0,56$). Die Durchschnittstemperatur beträgt im Feststiegenflügel südseitig beim Eingang $28,4$ ($S = 1,1$) $^{\circ}\text{C}$, nach dem Aufgang $27,4$ ($S = 1,1$) $^{\circ}\text{C}$, nordseitig beim Eingang $26,0$ ($S = 1,5$) $^{\circ}\text{C}$ und nach dem Aufgang $26,9$ ($S = 1,1$) $^{\circ}\text{C}$. Dabei sind die Temperaturamplituden südseitig und nordseitig deutlich abgeschwächt. Die Temperaturen im südlichen Gebäudeinne-

ren sind deutlich höher als nordseitig (Bild 4). Dies wird durch stärkere Sonneneinstrahlung (durch die großflächigen Fenster), höhere Temperaturschwankungen im darüber liegenden Dachgeschoß und häufigeres Öffnen des Eingangsportals bewirkt (starke Korrelation zwischen Außentemperatur und Temperatur im Eingangsbereich des südlichen Feststiegenflügels). Im zentralen Gebäudekern ist aufgrund der hohen Speichermasse auch die Wärmekapazität hoch, folglich steigt die Temperatur nicht so schnell an, dafür wird jedoch auch viel Wärmeenergie gespeichert. Dieser Kurvenverlauf in Bild 5 gibt schlüssig Auskunft über das Temperaturverhalten in den Feststiegen bei sommerlichem Schönwetter. Bereits ab 6:00 kommt es in der südlichen Feststiege über die großen Fenster zu direktem Solareintrag und Erwärmung der Raumluft auf $>30^{\circ}\text{C}$ ($T_{F_EI_S}$; rot). Die hohe

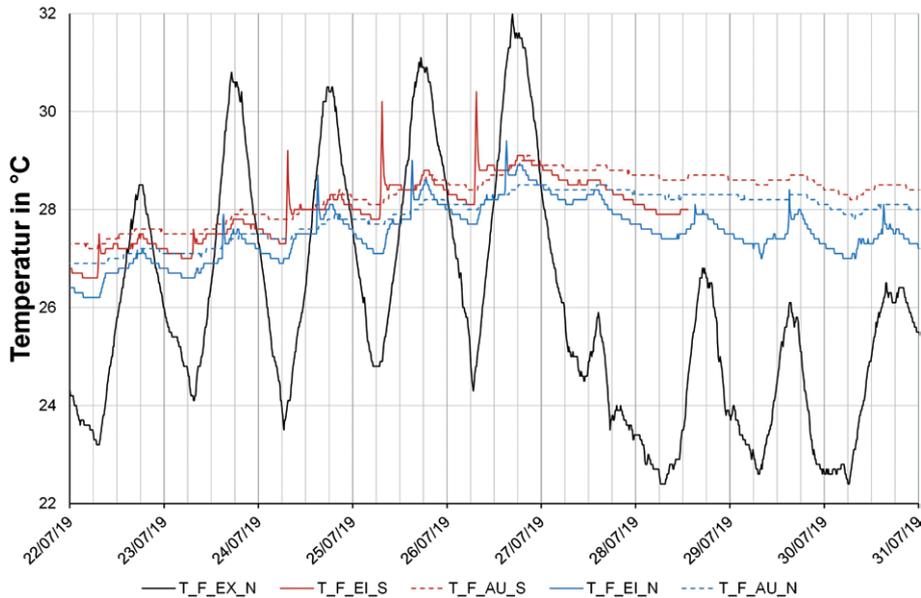


Bild 5 Zeitlicher Ausschnitt aus Bild 4
Time section from Figure 4

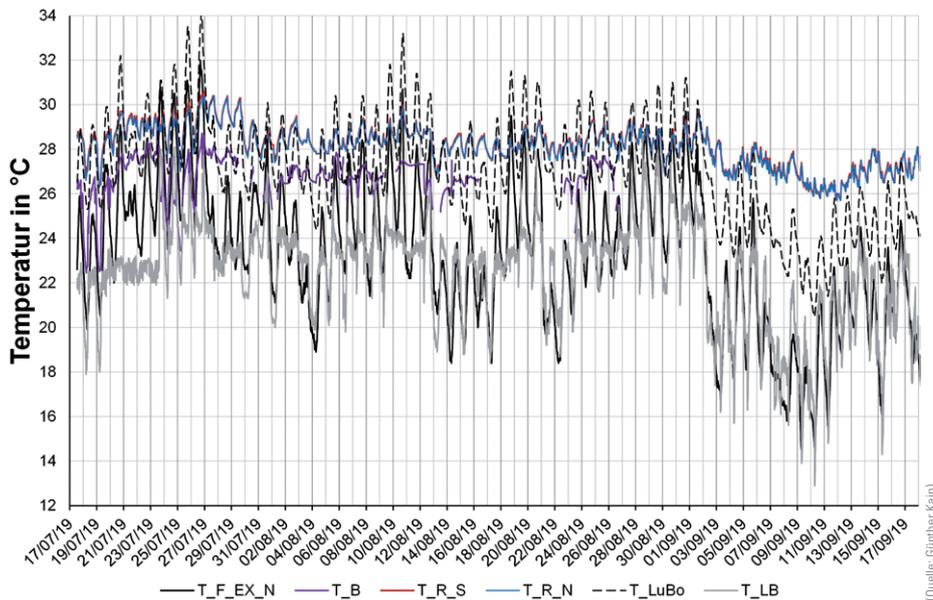


Bild 6 Lufttemperatur außen, vor der Bühne, am südlichen und nördlichen 4. Rang, am Lusterboden und im Luftbrunnen
Air temperature outside, in front of the stage, on the southern and northern 4th balcony, in the chandelier attic and in the air well

Speichermasse im Kernbereich bewirkt, dass es auch bei Abkühlung der Außenluft, zu keiner wesentlichen Abkühlung innen kommt ($T_{F_AU_S}$; rot ----). In der Feststiege Nord werden die Tagesspitzen gedämpft erst am Nachmittag erreicht und es kühlt auch schneller wieder ab ($T_{F_EI_N}$; blau). Auch auf der Nordseite ist die Speicherwirkung hoch: Die Kerntemperatur liegt $>1\text{ °C}$ über der Lufttemperatur beim Eingang.

Im Zuschauerraum (Bereich Parkett vor der Bühne) wurde im Messzeitraum eine Durchschnittstemperatur von $26,7\text{ °C}$ ermittelt, diese korreliert kaum mit der Außentemperatur und ist sehr konstant ($S = 1\text{ °C}$). Die Temperatur am 4. Rang wurde süd- und nordseitig gemessen. Die Temperaturkurven sind nahezu kongruent und weisen ein Mittel von $28,2$ bzw. $28,1\text{ °C}$ auf. Die Temperatur-

amplituden der Außentemperatur bilden sich (über den Lusterboden) mit einer Abschwächung von 80% ab (Bild 6). In einer verfeinerten bivariaten Regression unter Einbeziehung der Lufttemperatur im Luftbrunnen und jener am Lusterboden über dem Zuschauerhaus zeigt sich, dass 60% der Temperaturschwankungen der Rangtemperatur (T_{R_S}) durch Schwankungen der Lufttemperatur am Lusterboden (T_{LuBo}) erklärt werden können. Damit ist die Abhängigkeit von Lusterbodentemperatur und Temperaturentwicklung am 4. Rang 8-mal stärker als zwischen letzterer und der Luftbrunnen-temperatur (nachgewiesen durch partielle η^2 -Werte [4]).

Die Lufttemperatur im Luftbrunnen liegt im Mittel bei $22,4\text{ °C}$ und ist gut mit der Außenlufttemperatur korreliert ($R^2 = 0,75$). Die vergleichsweise hohe Variabilität der

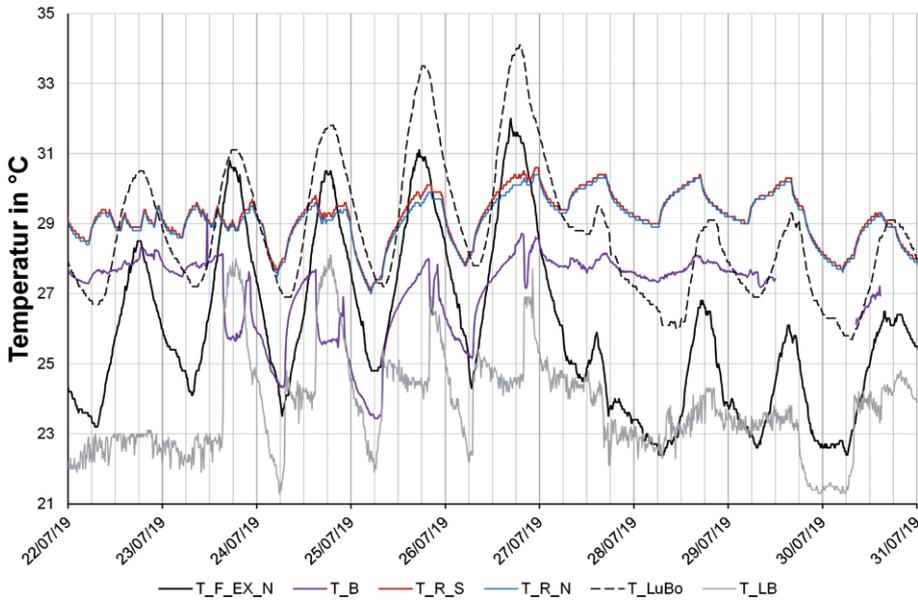


Bild 7 Zeitlicher Ausschnitt aus Bild 6
Time section from Figure 6

Luftbrunnentemperatur ($S = 2,2\text{ °C}$) ist durch den Ventilatoreinsatz bedingt.

Trotz niedriger Außentemperaturen (Bild 7 ab 27.7.) ist das Wärmespeichervermögen des Gebäudekerns hoch. Während die Lufttemperatur im Parterre vor der Bühne durch Frischluftzufuhr aus dem Luftbrunnen relativ rasch abgesenkt werden kann, ist dessen Einfluss am Rang kaum bemerkbar. Die stark oszillierende Kurve am Lusterboden weist auf direkten Strahlungseinfluss aus dem Blechdachbereich hin. Die Temperaturmaxima der Außentemperatur erst am späten Nachmittag und das retardierte Abkühlen während der Nachtstunden nicht unter 23–25 °C dokumentieren deutlich die urbane Wärmeinselbildung mit hintereinander folgenden Tropennächten. Dass die Temperaturen am Lusterboden an sonnigen Tagen ständig (auch nachts) 2–3 °C über den Außentemperaturen liegen, weist auf hohe Speicherwärme hin. Das Dach über dem Lusterboden ist nicht hinterlüftet. Hier liegt ein ungenutztes Potential zur Temperaturabsenkung durch aktives Hinterlüften vor. Die Temperatur am Lus-

terboden ist vorwiegend vom Strahlungseintrag über das Dach bestimmt. Im Gegensatz zum Lusterboden korreliert die Temperatur am 4. Rang mit der Aktivität des Luftbrunnens. Der Temperaturanstieg im Bühnenbereich ist wohl auf Probenarbeit mit Bühnenbeleuchtung zurückzuführen.

Es zeigt sich (Bild 9), dass durch Einschalten der Ventilatoren die Lufttemperatur im Luftbrunnen der Außentemperaturentwicklung folgt, allerdings jeweils ca. 2 °C kühler ist. Daraus ergibt sich zum einen, dass der Ventilatorbetrieb außentemperaturgesteuert erfolgen sollte und zum anderen, dass der Luftbrunnen erhebliches Kühlpotential aufweist, welches man durch geeignete Maßnahmen verstärken könnte.

3.2 Luftfeuchtigkeit und Wasserverneblung

Die relative Luftfeuchtigkeit der einströmenden Luft (Bild 8) weist im Luftbrunnen vor der Wärmetauscherein-

Tab. 2 Deskriptive Statistik und Regressionsparameter zu den gemessenen Temperaturen
Descriptive statistics and regression parameters of the measured temperatures

	T_F_EX_N	T_F_DB_S	D_F_DB_N	T_LuBo	T_F_EI_S	T_F_AU_S	T_F_EI_N	T_F_AU_N	T_R_S	T_R_N	T_B	T_LB
MW	23,2	28,4	28,3	27,1	28,4	27,4	26,0	26,9	28,2	28,1	26,7	22,4
S	3,3	4,1	3,0	2,3	4,1	1,1	1,5	1,1	0,9	0,9	1,0	2,2
Min	14,2	18,5	20,6	20,3	18,5	19,8	19,4	19,8	24,3	24,8	22,4	12,9
Max	32,0	41,1	37,1	37,1	41,1	29,1	30,4	30,4	30,6	30,4	29,3	28,7
Regression mit T_F_EX_N												
R²		0,85	0,91	0,88	0,84	0,34	0,56	0,33	0,53	0,53	0,09	0,75
b₁		1,15	0,88	0,66	1,15	0,20	0,33	0,19	0,20	0,20	0,11	0,58
b₀		1,8	7,9	11,7	1,8	22,8	16,4	22,4	23,5	23,5	24,0	8,9

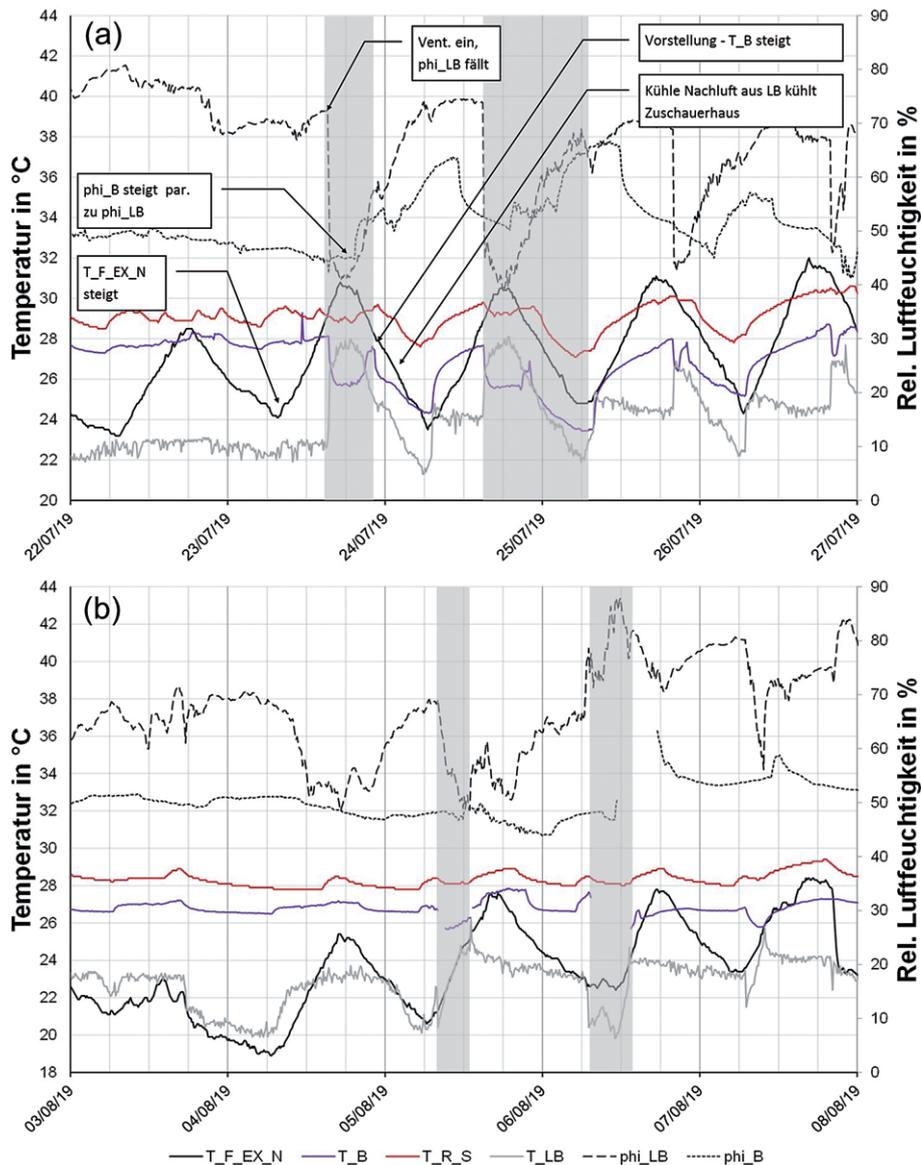


Bild 8 Lufttemperatur außen, vor der Bühne, am südlichen 4. Rang und im Luftbrunnen; relative Luftfeuchtigkeit im Luftbrunnen und vor der Bühne mit Markierung der Wassereinsprühung, a) im Juli, b) im August

Air temperature outside, in front of the stage, on the southern 4th balcony and in the air well; humidity in the air well and in front of the stage with water spraying marked, a) in July, b) in August

heit (vor der Wassereinsprühung) eine mittlere relative Luftfeuchtigkeit von etwa 68,5% auf (hoch, da sich die warme Außenluft abkühlt). Die Variabilität ist gering mit einer Standardabweichung von 9,6%, das gemessene Minimum beträgt 37,8% und das Maximum 89,5%. Die Luftfeuchtigkeit im Zuschauerraum vor der Bühne beträgt im Mittel 52,0% ($S = 4,8\%$) und ist damit sehr konstant (trotz der Wasservernebelung). Maximal wurden 68,4%, minimal 41,2% ermittelt.

Durch eine versuchsweise Wassereinsprühung sind folgende Wirkungen zu beobachten (Bild 8): Nach der Wassereinsprühung steigt die relative Luftfeuchtigkeit im Zuschauerraum jeweils um 10 bis 15 % an. Ohne Wassereinsprühung ist im Lauf der Vorstellung durch den Feuchteintrag der Besucher(innen) ebenfalls ein Anstieg von 10% zu beobachten. Insofern ist der Effekt der Wassereinsprühung, bei den kurzen Intervallen der Untersuchung, als gering einzustufen.

Am 23.7. wurde um ca. 15 Uhr der Ventilator eingeschaltet (Luftgeschwindigkeit ca. 1,2 m/s im Luftbrunnen, Bild 4). Ab ca. 17:30 Uhr begann die Außentemperatur zu sinken. Dies führte zu einem Absinken der Temperatur im Zuschauerraum (Bereich Parkett) von ungefähr 3°C, am 4. Rang um ca. 1°C. Nach Vorstellungsbeginn stiegen die Temperaturen im Zuschauerraum auf 27°C, am 4. Rang auf 29,5°C. Der Ventilatorenbetrieb über Nacht bis 6:30 Uhr führte aufgrund der geringeren Außenlufttemperatur zu einem Temperaturminimum von 24°C im Zuschauerraum und 27,5°C am Rang. Am 24.7. ließen sich bei gleichem Betriebsmodus ähnliche Zusammenhänge beobachten. Am 25.7. wurde die Lüftungsanlage gleich betrieben, allerdings kein Wasser eingesprüht. Hier lässt sich erkennen, dass die Wassereinsprühung (optimale Ventilatorensteuerung vorausgesetzt) die Temperatur an den kritischen Stellen um ca. 1°C zu verringern vermag. Dies konnte speziell am 24.7. beobachtet werden, wo die Besprühung über die Vorstellung hinweg bis zum Morgen betrieben wurde.

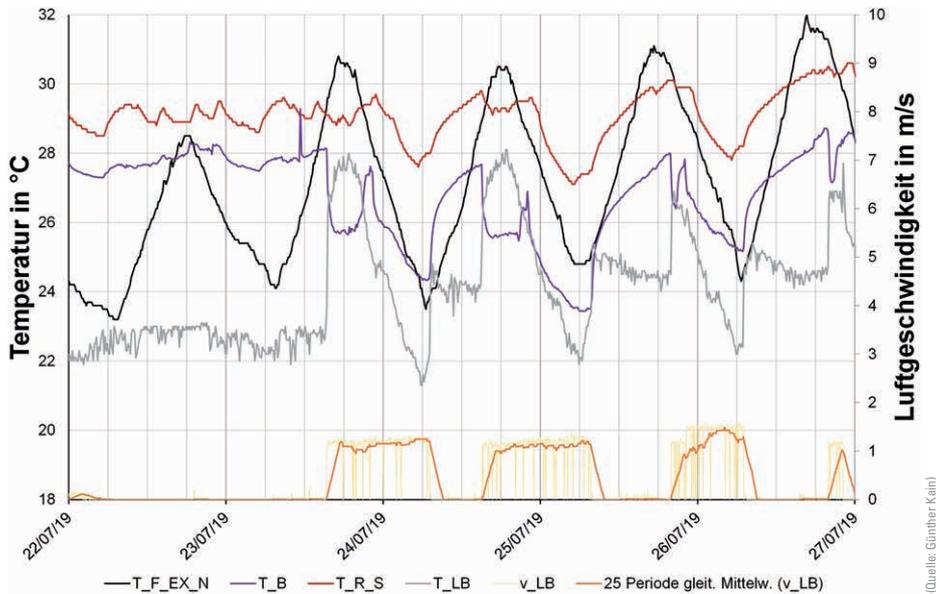


Bild 9 Lufttemperatur außen, vor der Bühne, am südlichen 4. Rang und im Luftbrunnen; Luftgeschwindigkeit im Luftbrunnen
Air temperature outside, in front of the stage, on the southern 4th balcony and in the air well; air velocity in the air well

Die geringe Effizienz dieser Maßnahme kann durch die zu weit innen positionierte Sprühvorrichtung und das zu wenig vernebelte Wasser erklärt werden. Außerdem herrschen im mehr oder weniger geschlossenen System des Luftbrunnens aufgrund der hohen relativen Feuchte zu geringe Dampfdruckunterschiede für eine effektive adiabate Verdunstungsleistung. Darüber hinaus wurde der Versuch zu einer Tageszeit unternommen, an der die Außenluft sehr warm war und so von vornherein einen höheren Wasserdampfgehalt aufwies. Erfolgsversprechender erscheint die Verdunstung des Wassers über ein Verdunstungsregister mit großer spezifischer Oberfläche gleich zu Beginn des Luftbrunnens im Volksgarten, ähnlich einem „Gradierwerk“ [5]. Die darauf folgende lange Tunnelstrecke mit sanierten, porösen Oberflächen würde die Verdunstungsprozesse begünstigen.

3.3 Ventilatorenbetrieb

Die in Betrieb stehenden Ventilatoren ermöglichen eine Luftgeschwindigkeit von ca. 1,2 m/s bei Betriebsstufe 2 (Bild 9). Mit den alten Langsamläufern (Austausch 2019) wurde eine maximale Luftgeschwindigkeit von 0,65 m/s (Messung Juli 2017) erreicht. Somit ist hier eine Leistungssteigerung von rund 85% erkennbar.

Mit der höheren Ventilatorleistung ist auch die Gefahr verbunden, dass sich durch eine erhöhte Förderung von warmer Außenluft in den 3. Keller die Kühlleistung des Luftbrunnens rascher erschöpft. Erdwärmetauscher brauchen eine längere Verweildauer der Luft, um ihre Wirkung zu entfalten. Das war auch der Vorteil der alten Schwerkraftlüftung, bei der große Luftvolumina langsam durch große Schachtquerschnitte transportiert wurden. Hier ist ganz besonders auf eine angepasste, drehzahlvariante Regelung des Ventilators zu achten, wobei gesetzliche Vorgaben Mindestzuluftmengen vorgeben

(25 m³/h und Besucher nach Wiener Veranstaltungstättengesetz [6]).

Bei Betrachtung des gesamten Messzeitraums im Sommer 2019 ist erkennbar, dass der Ventilatorenbetrieb an den Wochenenden ausgesetzt wurde. Dort könnte außentemperaturgesteuert der Betrieb fortgesetzt werden und das Theater ausgekühlt werden. Im Nachtbetrieb der Ventilatoren auch während des Wochenendes steckt daher zusätzliches Kühlpotenzial, das in die mächtige Gebäudemasse eingespeichert werden kann. Diese Handlungsoption wurde mittlerweile bereits berücksichtigt und in der Gebäudeleittechnik umgesetzt.

4 Diskussion der Handlungsoptionen

Im Juni 1982 betrug die Tagesmitteltemperatur in Wien 19,2°C. Das langjährige Mittel (1981–2010) liegt bei 18,9°C [7]. Damit ist das Jahr 1982, den Juni betreffend, als durchschnittlich zu werten. 2019 lag die Tagesmitteltemperatur im Juni bei 23,8°C, also 4,9°C über dem langjährigen Mittel. Die Temperaturen im Zuschauerraum des Burgtheaters wurden seit Jahrzehnten von der Haus-technikabteilung aufgezeichnet [8]. Die Analyse dieser Daten zeigt, dass eine als erträglich eingestufte Temperatur von 27°C [9] im Zuschauerraum im Jahr 1982 kaum überschritten wird, während 2019 sowohl auf der Galerie, als auch im Parkett höhere Temperaturen auftreten, was als direkte Folge der erhöhten Außentemperatur dargestellt werden kann.

Allgemein ist im Zeitraum 1982 bis 2019 die Tagesmitteltemperatur im Juni durchschnittlich 0,1°C pro Jahr gestiegen [7], was zu den erhöhten Temperaturen im Zuschauerraum beiträgt und die Relevanz und Dringlichkeit der hier diskutierten Überlegungen unterstreicht. Im Stadtzentrum von Wien werden die Jahresmitteltemperaturen

bis zum Ende des Jahrhunderts ansteigen [10] – eine Entwicklung, die nachhaltige Klimatisierungsstrategien verstärkt notwendig machen wird.

Bei der Betrachtung von Bild 3 zeigt sich, dass die Außentemperatur die außenliegenden Gebäudebereiche (Dachböden über den Feststiegen, Feststiegenhäuser, Lusterböden) stark beeinflusst, während das zentral liegende Zuschauerhaus sehr träge reagiert (Bild 7). Zusätzlich sind die nördlich gelegenen Gebäudeteile im Vergleich mit ihrer südlichen Entsprechung etwas kühler. Schwankungen der Temperatur im Zuschauerhaus werden mitunter durch Ventilatorenbetrieb erzeugt. Hier liegt das größte Potenzial der Betriebsoptimierung. In Bild 5 kann man erkennen, dass an den heißen Tagen im Juli die Außentemperatur ihr Maximum um ca. 17 Uhr erreicht und ihr Minimum um ca. 7 Uhr morgens. Während dieser Zeitspanne sollten die Ventilatoren in Betrieb sein. Mit dem Nachtbetrieb der Ventilatoren auch während der Wochenenden kann die mächtige Gebäudemasse wirksam gekühlt werden. Die Richtigkeit dieses Ansatzes lässt sich aus Bild 7 ablesen. So wurde am 23. Juli im Gegensatz zum 24. Juli der Ventilator nicht betrieben. Es zeigt sich bei den Temperaturkurven am 24. Juli, dass die Temperaturen am Parkett vor der Bühne und am 4. Rang nach Start der Ventilatoren zuerst leicht sinken, dann stark ansteigen (= Vorstellung) und dann über Nacht fallen.

Der Eintrag von Wärmeenergie über den Lusterboden (und damit indirekt von Sonneneinstrahlung) in das Zuschauerhaus ist ebenfalls beträchtlich (R^2 zwischen T_{LuBo} u. $T_{R_S} = 0.6$).

Integrativ betrachtet, ergeben sich drei Handlungsfelder für eine verbesserte Konditionierung des Zuschauerhauses: (1) der Strahlungseintrag in das Gebäude muss verringert werden, (2) es darf keine heiße Luft in den Luftbrunnen gesaugt werden und (3) die große thermische Speichermasse des Gebäudes sollte durch kontrolliertes Lüften gekühlt, bzw. deren Überhitzung vermieden werden.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Es ist zu erwarten, dass sich mit der Veränderung des globalen Klimas auch globale gesellschaftliche Werte

Literatur

- [1] Pagel, J. (1901) *Biographisches Lexikon hervorragender Ärzte des 19. Jahrhunderts*. Berlin.
- [2] Richter, H. E.; Winter, A. (Hrsg.) (1867) *Schmidts Jahrbücher der in- und ausländischen Medicin*. Band 134. Leipzig.
- [3] Huber, A. (2011) *Ökosystem Museum. Grundlagen zu einem konservatorischen Betriebskonzept für die Neue Burg in Wien* [Dissertation]. Akademie der bildenden Künste Wien.
- [4] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R. (2011) *Multivariate Analysemethoden*. Berlin: Springer 2011.
- [5] Hocquet, J.-C. (1993) *Weißes Gold. Das Salz und die Macht in Europa von 800 bis 1800*. Stuttgart: Klett-Cotta 1993.
- [6] Wiener Landtag, Wiener Veranstaltungstättengesetz.
- [7] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2020) *Klima aktuell – Klimamonitoring – Tagesmitteltemperaturen Wien Hohe Warte* [online]. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring/?param=t&>

wandeln werden. Nach dem berühmten Ausspruch *Albert Einsteins*, dass Probleme nicht mit der Strategie gelöst werden können, die genau zu diesen Problemen geführt hat, wird sich möglicherweise die Erkenntnis durchsetzen, dass mit hochtechnisierten, energieintensiven Kühlsystemen der globalen Erwärmung nicht nachhaltig entgegengewirkt werden kann.

Es ist nicht auszuschließen, dass in wenigen Jahren der Betrieb energieintensiver Kühlsysteme als unmoralisch gelten wird und diese Anlagen stillgelegt werden müssen. Historische, ressourcenschonende Systeme wie die Luftbrunnenanlage des Burgtheaters werden in dieser Situation ein brauchbares Modell für verantwortungsvolles Handeln abgeben. Natürlich kann mit einer Luftbrunnenanlage nicht so intensiv gekühlt werden, wie das mit einer High-Tech Kühlanlage möglich wäre, doch verantwortungsvolles Handeln beruht eben auch auf Suffizienz [11].

Die Wieder-in-Wertsetzung der Luftbrunnenanlage des Wiener Burgtheaters läuft nun in einem Leitprojekt, das von der Abteilung 4 in der Sektion IV des österreichischen Bundesministeriums für Kunst, Kultur, öffentlichen Dienst und Sport gefördert wird, weiter. Im Rahmen des Forschungsnetzwerks von ICOMOS Austria (www.icomos.at) werden zurzeit auf Basis des bautechnisch-baukulturellen Erbes Zukunftsstrategien entwickelt, die dazu beitragen, die global notwendigen Energie-Einsparungsziele nachhaltig umzusetzen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei dem Geschäftsführer der Bundestheater-Holding GmbH, Herrn Mag. Christian Kircher für die finanzielle und organisatorische Ermöglichung dieses Projekts. Ebenso sei den Mitarbeitern der Abteilung Haustechnik im Burgtheater, namentlich Herrn Bernd Sailer und Herrn Martin Prerost für die Unterstützung bei der Montage und Demontage der Sensorik, Bereitstellung technischer Infrastruktur und Steuerung des Probetriebs gedankt.

period=period-ynd-2020-04-02&ref=3 [Zugriff am: 03. April 2020]

- [8] Bundestheaterholding (2019) *Temperaturaufzeichnungen Burgtheater Wien*. Unveröffentlicht.
- [9] ÖNORM B 8110-3:2012 (2012) *Wärmeschutz im Hochbau – Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung*.
- [10] Umweltbundesamt GmbH (2020) *Der Klimawandel in Wien* [online]. https://data.ccca.ac.at/dataset/factsheet_

der_klimawandel_in_wien-v01/resource/445ce4cf-7d12-464e-b9ec-0b10f65e1ca8 [Zugriff am: 04. Mai 2020]

- [11] Steffen, A.; Gahl, C.; Gericke, W.-D.; Huthmacher, W.; Klomfar, B. (2012) *Suffizienz als dritter, unabdingbarer Aspekt der Nachhaltigkeit* in: *Energie 05* (2012), S. 62.

Autoren

DI (FH) DI Dr. Günther Kain (Korrespondenzautor)
gkain.lba@fh-salzburg.ac.at
Fachhochschule Salzburg
Studiengang für Holztechnik und Holzwirtschaft
Markt 136a
A-5431 Kuchl

DI Markus Goldsteiner, B.Sc.
Bundestheater-Holding GmbH
Goethegasse 1
A-1010 Wien

DI Dr. Friedrich Idam
idam@gmx.at
Höhere Technische Bundeslehranstalt Hallstatt
Abteilung für Holz- u. Restauriertechnik
Lahnstraße 69
A-4830 Hallstatt

Dr. Alfons Huber
Herbeckstraße 62/8
A-1180 Wien

Zitieren Sie diesen Beitrag

Kain, G.; Idam, F.; Huber, A.; Goldsteiner, M. (2021) *Luftbrunnenanlage des Burgtheaters Wien: Nachhaltige Klimatisierungsstrategien*. *Bauphysik* 43, H. 1, S. 1–11. <https://doi.org/10.1002/bapi.202000021>



(Quelle: F. Idam)

Bild 1 Die künstlerisch gestaltete Windfahne, der sogenannte „Blasengel“, dreht die Fortluftöffnung seit über 130 Jahren selbstregulierend und rein mit Windenergie ins Lee.
Exhaust air opening on the roof of the Burgtheater