

Komplexe Luftwechseluntersuchungen am Beispiel der historischen Anna-Amalia-Bibliothek

Jörg Thumulla, Sabine Weber

Einleitung

Im 18. Jahrhundert wurde unter Herzogin Anna Amalia das „Grüne Schösschen“ in Weimar, im 16. Jahrhundert erbaut, zum Bibliotheksgebäude umgestaltet und im Inneren und Äußeren dem Geschmack der damaligen Zeit angepasst und mit zahlreichen Ölgemälden und Büsten, Kupferstichen und Karten, Globen und Medaillen ausgestattet. Der im ersten Stockwerk eingerichtete Rokokosaal bildete das Glanzstück des neu gestalteten Baus. Der sich über drei Etagen erstreckende Rokokosaal ist bis heute nahezu unverändert erhalten und beherbergt eine der bedeutendsten Bibliotheken in Deutschland.



Abb 1: Das Gebäude mit dem Rokokosaal, der sich im hintern Teil mehrere Etagen erstreckt.

Der Rokokosaal verfügt nach wie vor über keine Heizung. Da deshalb Kondensationschäden an der Bausubstanz und dem wertvollen Buchbestand befürchtet werden bzw. z.T. bereits eingetreten sind, wird, um den Eintrag von Feuchte durch Besucher zu vermindern, der Rokokosaal von November bis März geschlossen und kann ab April täglich nur von 80 Personen besucht werden. Nach Fertigstellung eines Neubaus zur Aufbewahrung der wertvollen Buchbestände soll die Bibliothek und insbesondere der Rokokosaal von der Stiftung Weimarer Klassik saniert werden. Ein Ziel der Sanierung ist es, mehr Menschen die Möglichkeit zu geben, den Rokokosaal zu besichtigen. Hierzu wurden Klimamodelle erarbeitet, die die raumklimatische Funktion des derzeitigen Gebäudes beschreiben und die Grundlage dafür legen, im Rahmen der geplanten Sanierung die Erhaltungsbedingungen für den wertvollen Buchbestand und die historischen Einbauten optimieren zu können. Basis dieser Klimamodelle, die beispielsweise den Feuchtehaushalt des Gebäudes beschreiben, ist die Kenntnis über den tatsäch-

lichen Luftwechsel im noch unveränderten Rokokosaal. Mit dessen Bestimmung wurde die anbus analytik GmbH beauftragt. Die Voruntersuchungen und Messungen zur Ermittlung des Sanierungsbedarfs wurden von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

Messplanung und Messaufbau

Die Untersuchungen der Luftwechselrate wurden unter Zugrundelegung der VDI-Richtlinie 4300 Blatt 7 „Messen von Innenraumluftverunreinigungen: Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen“ durchgeführt. Bei dem Rokokosaal handelt es sich aufgrund seiner zahlreichen Einbauten und Ebenen um einen relativ komplexen Innenraum. Aus diesem Grund wurden, um eine möglichst hohe Validität der Daten zu erreichen, Luftwechselmessungen nach zwei verschiedenen, in der VDI-Richtlinie beschriebenen Verfahren durchgeführt:

1. Konzentrationsabklingsmethode
2. Konstant-Injektionsmethode

Als Tracer-Gas wurde SF₆ wegen seines sehr geringen Hintergrundlevels in Verbindung mit einem fotoakustischen Detektor ausgewählt, da dieser über eine ausreichende Empfindlichkeit verfügt, um auch bei dem relativ großen Raumvolumen der Bibliothek (4.800 m³ ohne Bücher, bzw. 3500 m³ mit Büchern) mit handhabbaren Tracer-Gasmengen auszukommen. Mit Maximalkonzentrationen von 200 ppm wurde zudem der zulässige MAK-Wert (1000 ppm) deutlich unterschritten.

Aufgrund des weiten Messbereiches des eingesetzten fotoakustischen Detektors war es möglich, mit der Konzentrationsabklingsmethode den Luftwechsel und seine zeitlichen Veränderungen über einen langen Zeitraum zu dokumentieren. Es wurden im Rokokosaal mehrere Messpunkte eingerichtet, um eine gleichmäßige Verteilung des Tracer-Gases in der Raumluft dokumentieren zu können. Eine weitere

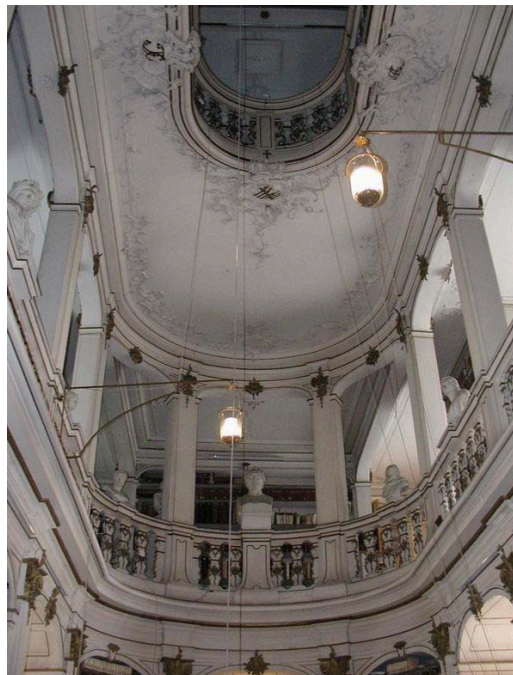


Abb. 2 Blick in die Emporen des Rokokosaals



Abb. 3 Blick in die untere Ebene des Rokokosaals

Dokumentation der gleichmäßigen Verteilung wird durch die zeitlich eng folgende Ermittlung der Messwerte im Abstand von jeweils etwa einer Minute erreicht. Dadurch wurden bei den meisten Bestimmungen (mit Ausnahme der Messphase, in der Mehrfachbestimmungen durchgeführt wurden) jeweils etwa 30 Messwerte zur Berechnung eines Luftwechsel zugrunde gelegt. Der Determinationskoeffizient R^2 gibt dabei Auskunft über die Güte der Abklingkurve und damit die Durchmischung der Raumluft sowie die Gerätekonstanz.

Das Dosieren des Indikatorgases für die Konstant-Injektionsmethode erfolgte über eine Gasflasche mit Druckminderer, einen Durchflussmesser sowie über eine geeichte Gasuhr mit einem Schlauch in den Ansaugbereich des Ventilators. Dieser wurde zum Vermischen der Raumluft eingesetzt. Hierzu wurde ein leistungsstarker Ventilator verwendet, wie er für Luftdichtigkeitsuntersuchungen in Gebäuden eingesetzt wird („BlowerDoor“). Das Gerät wurde in der unteren Ebene mit leichtem Winkel nach oben befestigt, so dass beide unteren Ebenen und über Reflexionen an der Brüstung auch die dritte Ebene mit Zugluft versorgt werden konnte. Innerhalb der obersten Ebene wurde die Verteilung mit einem handelsüblichen Standventilator durchgeführt. Die Vollständigkeit der Verteilung wurde zu Beginn der Untersuchung optisch mittels Theaternebel überprüft. Darüber hinaus wurde zur Kontrolle am dritten Messtag der Luftwechsel an verschiedenen Probenahmeorten bestimmt.

Die Probenahme erfolgte an mehreren Messorten über Messschläuche mit einem Innendurchmesser von jeweils 4 mm, was bei einer Schlauchlänge von 100 m (eingesetzt wurden Schläuche mit maximal 40 m Länge) einem Volumen von 1,3 l entspricht. Dieses wurden mittels externen Membranpumpen laufend mit Luft bei einem Volumenstrom von 5 l/min gespült, so dass am Messplatz laufend die aktuelle Luft der Probenahmestelle zur Verfügung stand. Da der fotoakustische Detektor nur einen deutlich kleineren Volumenstrom verträgt und zudem nicht kontinuierlich ansaugt, wurde die zu untersuchende Luft zum Volumenstromsplitt in eine Pufferflasche mit verengter Austrittsöffnung (1 l) geleitet. Aus dieser saugte der fotoakustische Detektor die zur Prüfung benötigte Luft an. Die überflüssige Luft entwich durch den Flaschenhals in die Raumluft. Folgende Messpunkte wurden festgelegt:

- M0: Messplatz (1,2 m Höhe)
- M1: 2. Empore hinter Ventilator
- M2: 1. Empore Ost
- M3: von der 2. Empore in die Raummitte hängend
- M4: in 2. Empore im Raum Richtung Norden

Dokumentation der Randbedingungen

Von entscheidender Bedeutung zur Reproduzierbarkeit von Luftwechseluntersuchungen ist die Dokumentation der Randbedingungen.

Raum- und Außenklima

Der Verlauf von Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurde über Datenlogger über den gesamten Messzeitraum dokumentiert. Hierzu wurden je zwei Fühler für das Außenklima an der West- und Ostfassade sowie im Innenbereich zwei Fühler in Rokokosaal und auf der 2. Emporen angebracht. Dargestellt im folgenden Diagramm sind die jeweiligen Mittelwerte.

Verlauf der Temperaturdifferenz 25. bis 27.07.03

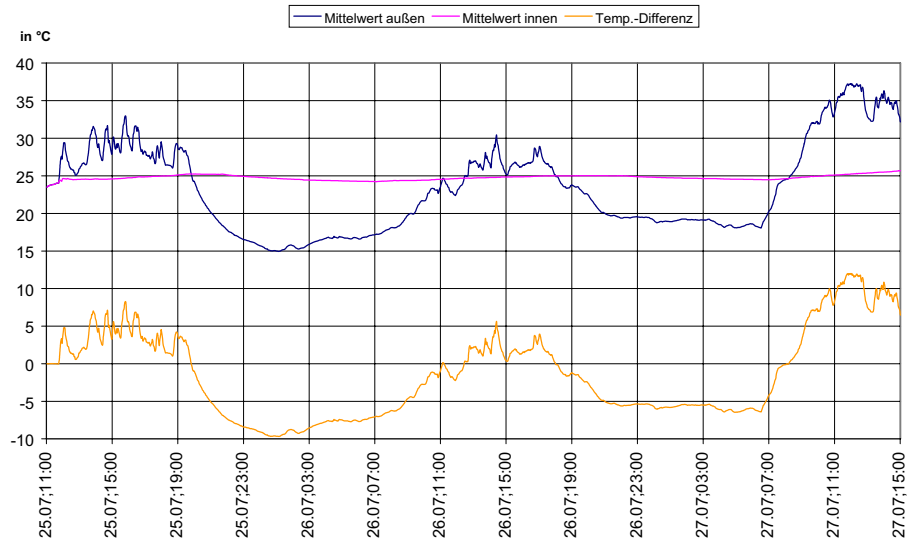


Abb. 4. Verlauf von Außen- und Innentemperatur und Temperaturdifferenz

Differenzdruck

Der wichtigste Parameter, der den Luftwechsel eines Gebäudes bestimmt, ist der Differenzdruck, der sich als Summe des Winddruckes und der thermischen Effekte darstellt. Die Messung der Gebäudedifferenzdrücke erfolgte über den gesamten Messzeitraum. Dies ermöglicht eine Korrelation der gemessenen Luftwechsel mit den jeweils herrschenden Differenzdrücken. Gemessen wurde jeweils der Differenzdruck zur unteren Ebene (Rokokosaal). Die Messpunkte P1-P4 beschreiben dabei die Druckverhältnisse an den Außenseiten (P1: West, P2: Ost, P3: Norden, P4: Süden). Weiterhin wurden die Differenzdrücke innerhalb des Saales zur 2. Empore (P5), 1. Empore (P6) sowie den beiden im Norden (P8) und Süden (P7) des Rokokosaales gelegenen Treppenhäusern bestimmt. Die folgenden Graphen (Abbildungen 5 und 6) zeigen die Ergebnisse der Differenzdruckuntersuchungen. Um die mittleren Differenzdrücke - insbesondere in den von großen Druckschwankungen geprägten Tagzeiten - transparenter zu machen, wurden neben der Darstellung aller Messwerte die Durchschnittswerte über jeweils 50 Messwerte dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass innerhalb des Rokokosaals nur geringe Druckunterschiede auftreten, während zwischen Rokokosaal und der Außenluft bzw. den Treppenhäusern deutliche Druckunterschiede messbar sind.

Der Vergleich mit den gemessenen Temperaturen zeigt, dass die Druckunterschiede während der Nachtzeiten hauptsächlich durch die Temperaturunterschiede und dem daraus resultierenden thermischen Auftrieb bzw. tagsüber durch den sehr stark schwankenden Winddruck geprägt sind.

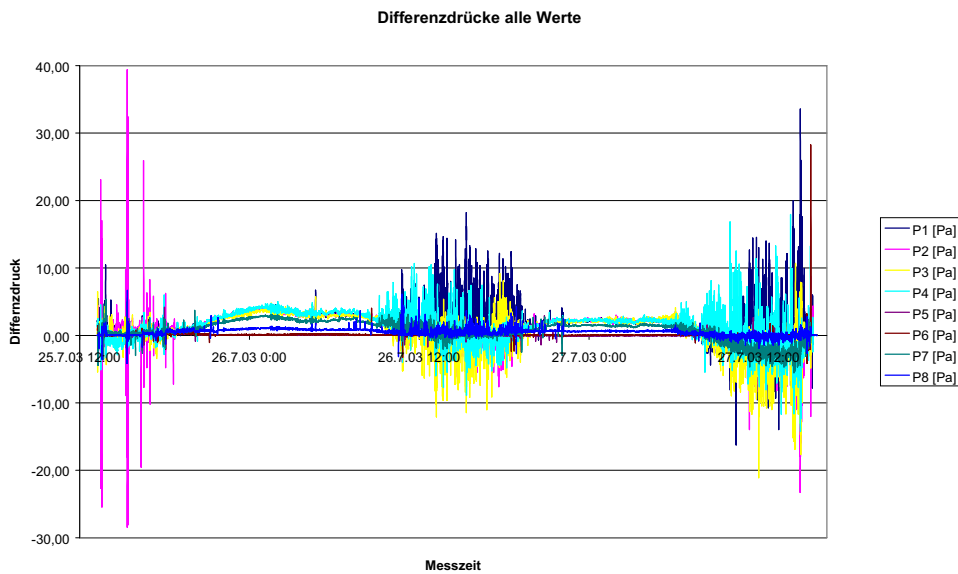


Abb. 5 Differenzdrücke in Pa: Einzeldarstellung aller Werte

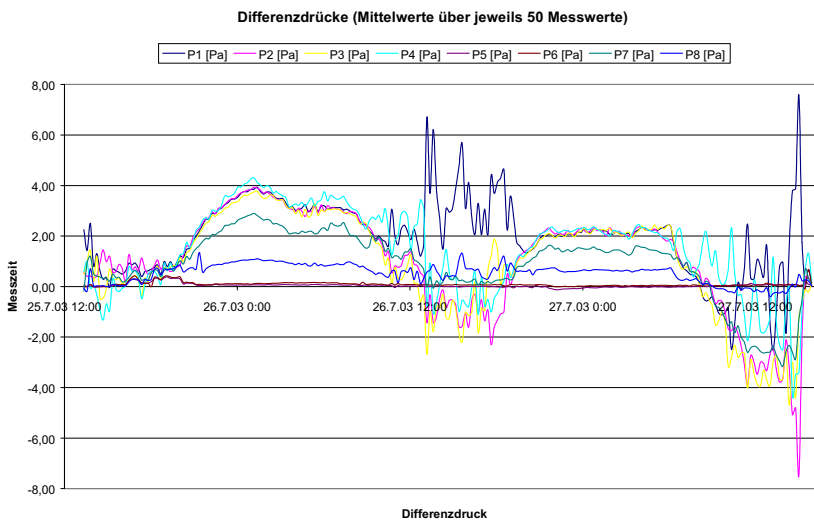


Abb. 6 Differenzdrücke in Pa: Mittelwerte über jeweils 50 Messwerte

Ergebnisse

Luftwechselraten nach dem Abklingverfahren

Nach dem Abklingverfahren wurden zwei Messreihen durchgeführt. Einen Überblick über den Konzentrationsabfall im gesamten Messzeitraum geben die beiden folgenden Kurven (Abbildungen 7 und 8). Auf der X-Achse ist jeweils die Messzeit seit Messbeginn dargestellt. In der Graphik sind jeweils der resultierende Luftwechsel (Betrag des Exponenten der e-Funktion) und der Korrelationskoeffizient zur idealtypischen Abklingkurve in Form einer e-Funktion dargestellt. Über den gesamten Messzeitraum betrachtet,

lag also der Luftwechsel der ersten Messreihe bei 0,54/h und der zweiten Messreihe bei 0,42/h.

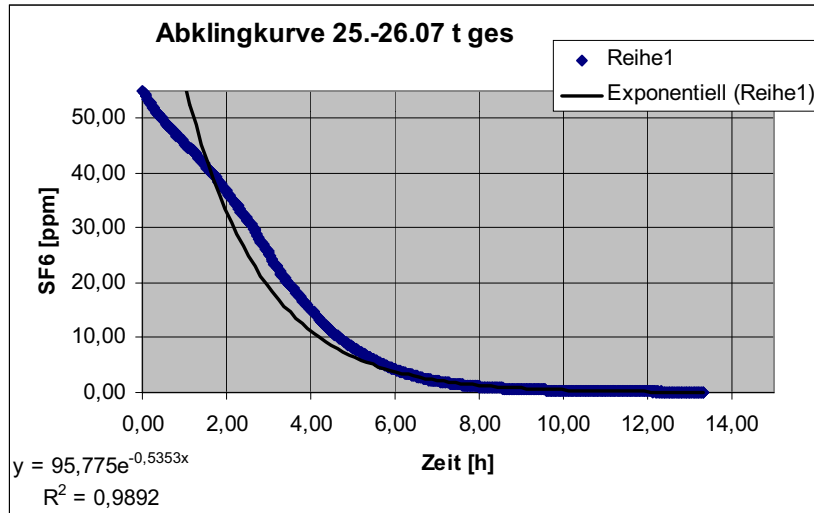


Abb. 7: Abklingkurve des ersten Messzeitraums

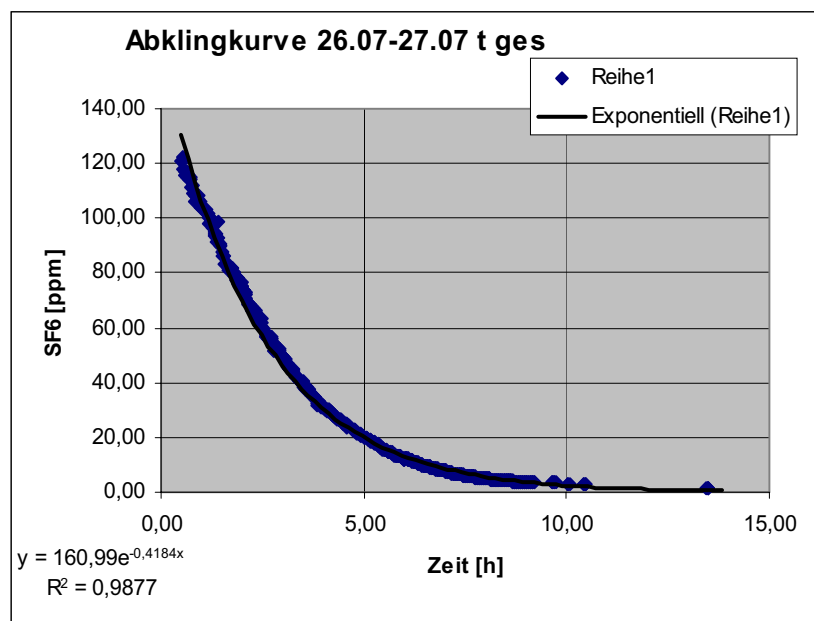


Abb. 8: Abklingkurve des zweiten Messzeitraums

Um einen Einblick in die Zeitabhängigkeit des Luftwechsel zu erhalten, wurden die Abklingkurven jeweils über eine halbe Stunde betrachtet und der Luftwechsel für diesen Zeitraum bestimmt. Im folgenden werden exemplarisch aus der Messung der ersten Messreihe einige Abklingkurven dargestellt (Abbildungen 9 bis 11).

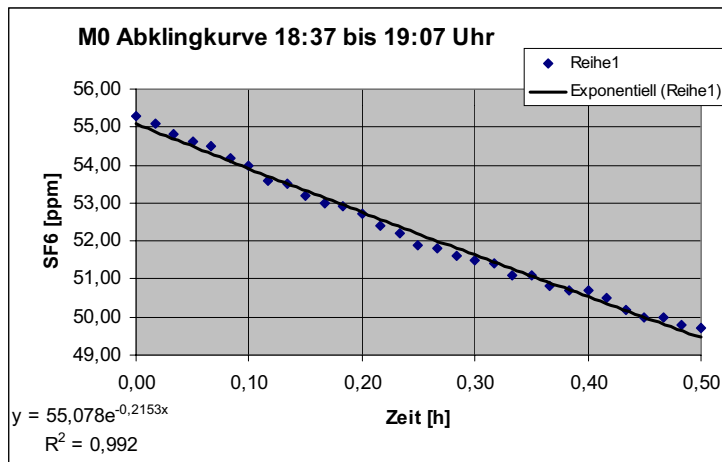


Abb. 9: Abklingkurve der ersten Messreihe von 18:37 bis 19:07 Uhr

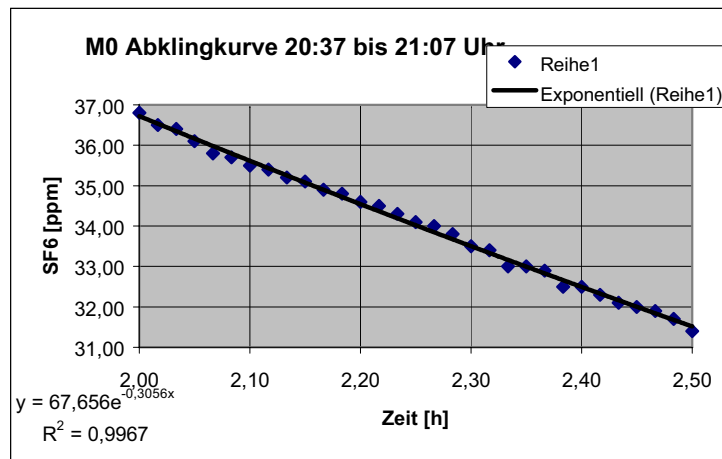


Abb. 10: Abklingkurve der ersten Messreihe von 20:37 bis 21:07 Uhr

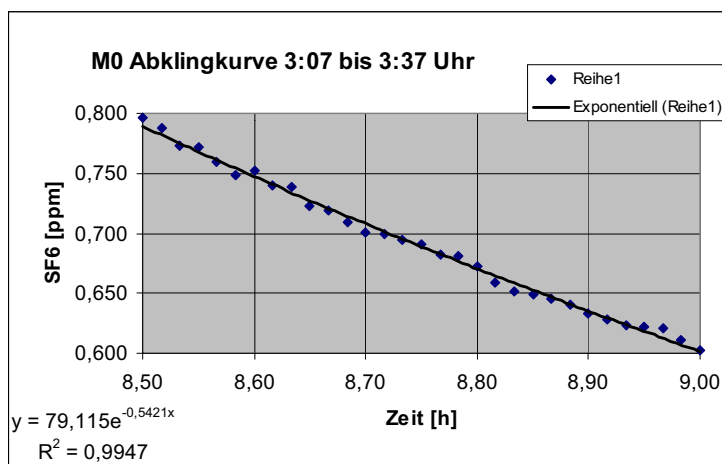


Abb. 11: Abklingkurve der ersten Messreihe von 3:07 bis 3:37 Uhr

Insgesamt liegen über 50 zeitaufgelöste Luftwechselwerte vor, deren Ergebnisse graphisch dargestellt werden (Abbildungen 12 und 13). Die X-Achse bildet die Messzeit ab.

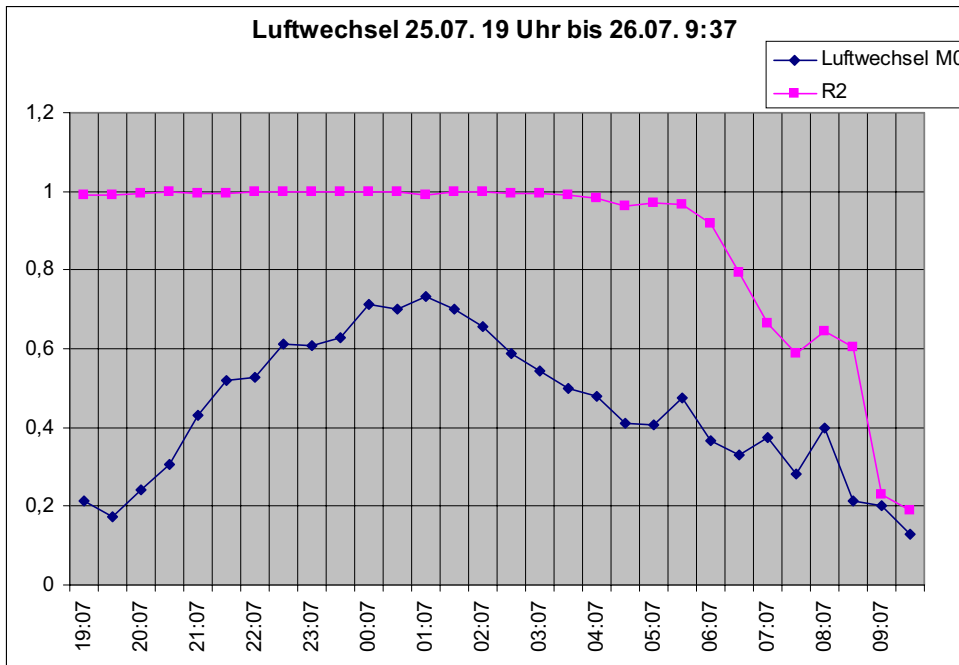


Abb. 12: Luftwechsel der ersten Messreihe

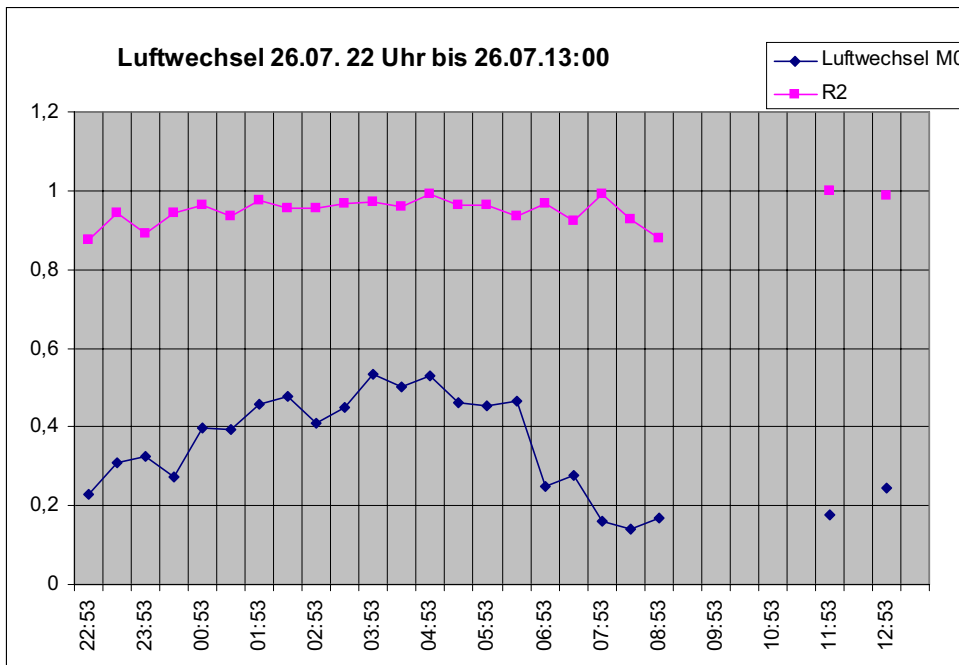


Abb. 13: Luftwechsel der zweiten Messreihe

Luftwechselrate nach dem Injektionsverfahren

Für das Injektionsverfahren wurde ein konstanter Volumenstrom (1,1 l/min) des Tracer-Gases SF₆ in den Rokokosaal eingeleitet. Das eingebrachte Volumen wurde alle 10 Minuten mittels einer geeichten Gasuhr geprüft und protokolliert. Die folgende Graphik zeigt den Anstieg der Konzentration über die Messzeit. Die hohe Korrelation ($R^2=0,9761$) zur theoretischen logarithmischen Kurve zeigt, dass der Anstieg idealtypisch verläuft. Aufgrund des mit dem Abklingverfahren festgestellten wechselnden Luftwechsels ist nicht mit einer Plateaubildung zu rechnen, so dass die Verringerung der SF₆-Konzentration ab etwa der 6. Messstunde auf eine Verringerung des Luftwechsels zurückzuführen ist.

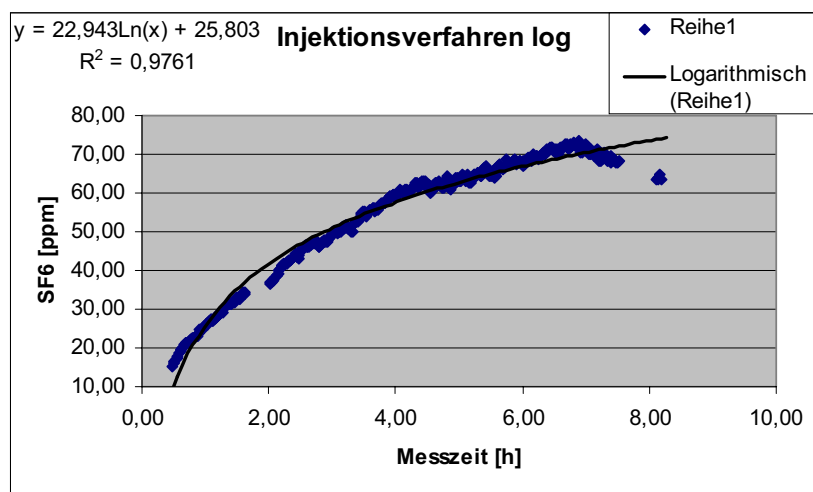


Abb. 14: Anstieg der Tracer-Gas-Konzentration beim Injektionsverfahren

Das für die Berechnung des Luftwechsels wichtige konstante Niveau wird zwischen der 6. und 7,5. Messstunde (16h55 bis 18h25) angenommen. Mit einer durchschnittlichen Konzentration von 70,3 ppm und einem $R^2 = 0,3 \cdot 10^{-5}$ erweist sich die SF₆-Konzentration in diesem Zeitraum als vollkommen unabhängig von der Messzeit.

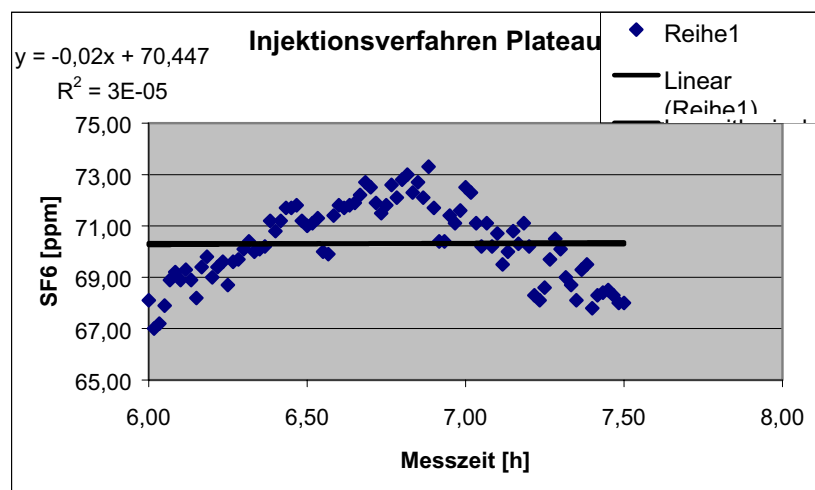


Abb.15: Plateau-Bildung beim Injektionsverfahren

Gemäß der in der VDI-Richtlinie unter 5.2.3 genannten Auswertung ergeben sich für die Raumvolumina (ca. 4.800 m³ ohne Bücher, bzw. ca. 3500 m³ mit Büchern) folgende Luftwechsel:

Raumvolumen	V _R	3.500 m ³	4.800 m ³
konstanter Volumenstrom des Indikatorgases	V _i	1,05 l/min	1,05 l/min
	entsprechend	0,063 m ³ /h	0,063 m ³ /h
Indikatorgasgehalt im Volumenstrom	k _i	1.000.000 ppm	1.000.000 ppm
gemessener Gehalt des Indikatorgases	k _t	70 ppm	70 ppm
Zuluftvolumenstrom	V _L	900 m ³ /h	900 m ³ /h
Luftwechsel	n	0,26 1/h	0,19 1/h

Korrelation von Differenztemperaturen, Differenzdrücken und Luftwechselrate

Ausschlaggebend für den Luftwechsel ist der Differenzdruck zwischen dem Gebäudeinneren und dem Gebäudeäußeren. Insofern ist es entscheidend, die Abhängigkeit des Luftwechsels vom Differenzdruck darzustellen. Bei Kenntnis des jeweiligen effektiven Differenzdruckes zu einem bestimmten Zeitpunkt lässt sich dadurch der jeweilige Luftwechsel zu diesem Zeitpunkt abschätzen.

Da dieser effektiv wirksame Differenzdruck aufgrund der Komplexität des Gebäudes (Höhe, Turm etc.) messtechnisch nur mit einer Vielzahl von Sensoren und einem vorhandenen Strömungsmodell zu erfassen wäre, wird im folgenden vereinfacht der Gesamtdifferenzdruck als Summe der Beträge der Einzeldifferenzdrücke zu den vier Himmelsrichtungen angenommen. Da sich alle Sensoren im Außengebäude auf gleicher Höhe befanden, konnten vertikale Druckunterschiede nur eingeschränkt erfasst werden, weshalb eine vollständige Korrelation der Werte wie bei einem BlowerDoor-Test nicht zu erwarten ist. Die folgende Abbildung zeigt die Gegenüberstellung dieser beiden Parameter

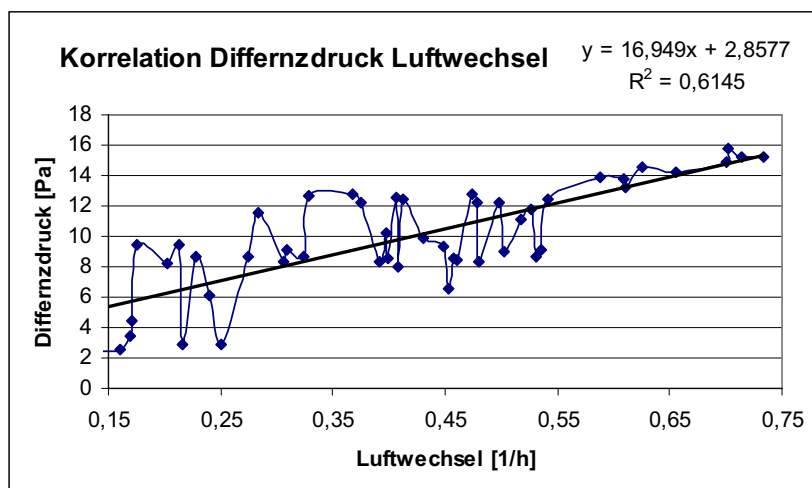


Abb. 16: Korrelation zwischen Differenzdruck und Luftwechsel

Die Regressionsgrade zeigt mit einem $R^2 = 0,6145$ einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Differenzdruck und der sich einstellenden Luftwechselrate. Sehr gut wird die Korrelation insbesondere im Bereich hoher Luftwechsel. Im Bereich der niedrigeren Luftwechsel zeigt sich eine Aufgruppierung der Werte in zwei Gruppen jeweils oberhalb und unterhalb der Regressionsgeraden. Dies zeigt, dass mit dem angewandten Modell der Summenbildung aus den vier einzelnen Himmelsrichtungen nicht alle relevanten Parameter erfasst werden konnten. Möglicherweise könnte eine separate Auswertung der Tag- und Nachtsituation bzw. eine weitere Prüfung der einzelnen Messwerte auf ihre Randbedingungen weiteren Aufschluss geben.

Letztendlich zeigen die Ergebnisse, dass bei Kenntnis des für den Luftwechsel effektiv wirksamen Differenzdruckes - beispielsweise durch weitergehende Anpassung des Modells zur Bestimmung dieses Differenzdruckes und Kalibrierung des Systems mit einer stationären installierten Differenzdruckmessanlage - der Luftwechsel des Gebäudes simultan bestimmt werden kann.

Im Hinblick auf die geplante Sanierung des Gebäudes ist es von entscheidender Bedeutung, Hinweise darauf zu erhalten, wie sich der Luftwechsel im Rokokosaal nach einer Sanierung und damit nach einer Abdichtung des Dachstuhles verhält. Deshalb sollte geprüft werden, inwieweit die erhobenen Daten eine Vorhersage des sich nach der Sanierung einstellenden Luftwechsels ermöglichen.

In Abbildung 17 werden aus Gründen der Übersicht die bereits oben in anderer Form dargestellten Aufzeichnungen des Differenzdruckes (Summe der Beträge des Differenzdruckes zwischen dem Rokokosaal und den auf gleicher Gebäudehöhe in allen vier Himmelsrichtungen angebrachten Außenfühlern) und des Temperaturunterschiedes zwischen innen und außen (Mittel aus Temperatur auf Ost- und Westseite) gegenübergestellt. Vergleicht man die dargestellten Verlaufsmessungen von Druck- und Temperaturdifferenz sowie die über die Zeitachse dargestellten Luftwechsel, so ist optisch in der Nachtphase ein deutlicher Zusammenhang zwischen den beiden breiten „Bergen“ und dem Profil der sich auf den „Gipfeln“ ergebenden „Hochebenen“ zwischen Temperaturunterschied und Differenzdruck festzustellen. Dies korrespondiert mit den in den Nachtphasen erhöhten Luftwechseln.

Anhand dieser Beobachtungen ist zu schlussfolgern, dass die treibende Kraft für den in den Nachtphasen erhöhten Luftwechsel der Temperaturunterschied zwischen dem aufgrund der Speichermasse wärmeren Innenraum und der sich nachts abkühlenden, kälteren Außenluft ist. Da die Temperatur in dem ungeheizten Gebäude der durchschnittlichen Außentemperatur entspricht, stellt sich am Tage die entgegengesetzte Situation ein. Vergleichbar mit einer Inversionswetterlage geht der thermisch bedingte Luftwechsel gegen null, so dass die Einflüsse des Winddruckes den Verlauf des Luftwechsels bestimmen. Dementsprechend ist in den Tagphasen eine Korrelation der Temperaturdifferenz nur mit der Tallinie des Differenzdruckes nicht aber mit dem Auftreten und der Höhe der scharfen Peaks erkennbar. Diese Peaks wiederum korrelieren – berücksichtigt man die Trägheit der Luftwechsellmessung - mit erhöhten Luftwechselraten.

Letztendlich bleiben diese optischen Beobachtungen einer detaillierten statistischen Überprüfung vorbehalten, die jedoch zunächst eine Anpassung der unterschiedlichen Datenstrukturen (Zeitaufösungen) der Messpunkte erfordert, was aufgrund der großen Datenmengen im Rahmen dieses Auftrages nicht möglich war.

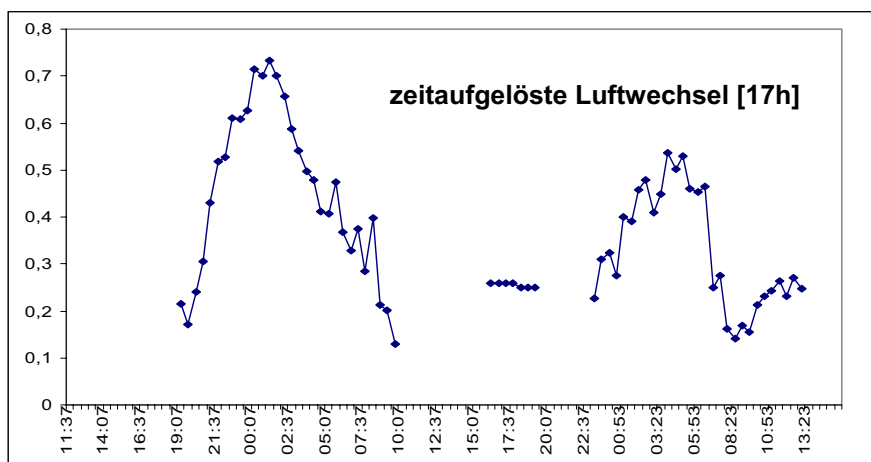
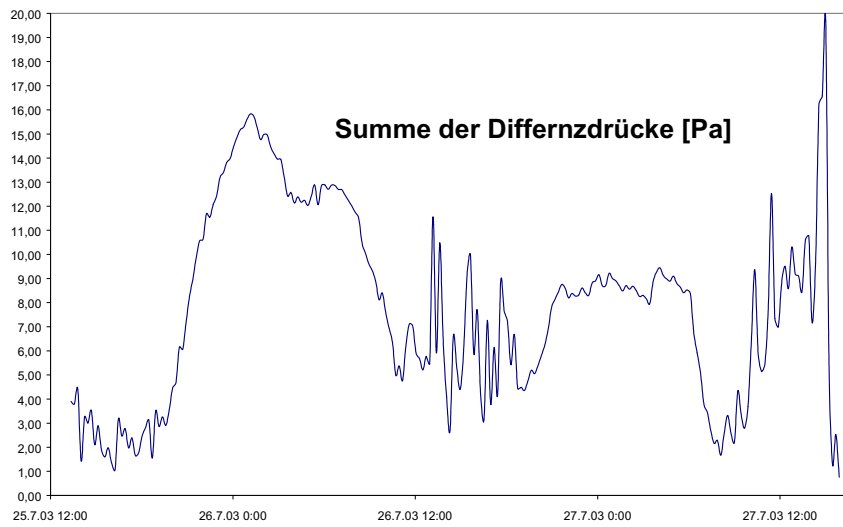
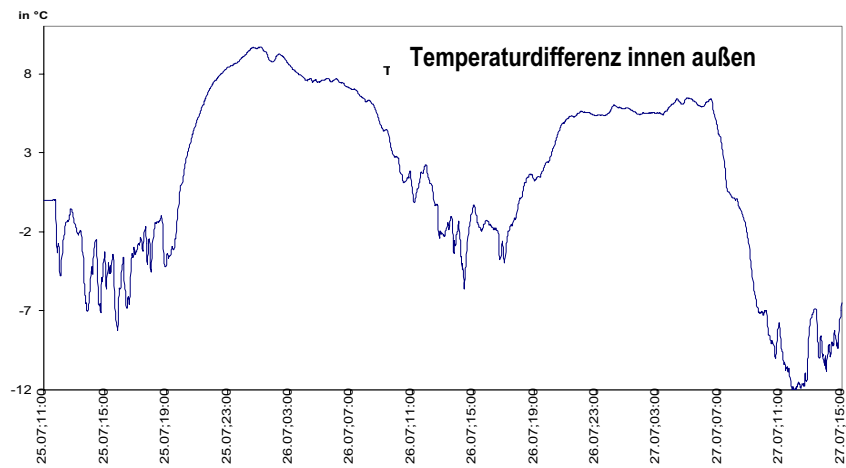


Abb. 17: Optische Gegenüberstellung der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, der Summe der Differenzdrücke und der Luftwechsel

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Untersuchungszeitraum wurde der Luftwechsel über zwei unterschiedliche Methoden, die Konzentrations-Abklingmethode und dem Konstant-Injektionsverfahren, bestimmt. Die Randbedingungen wurden über Raum- und Außenklimateaufzeichnungen sowie mittels vierkanaliger Differenzdruckmessung über den gesamten Messzeitraum dokumentiert.

In den Zeiträumen, in denen der Luftwechsel nach der Konzentrations-Abklingmethode bestimmt wurde, liegen zeitaufgelöste Daten im Abstand von etwa einer halben Stunde vor. Die Präzision dieser Daten ist als sehr hoch anzusehen, da die gemessenen Abklingkurven gegenüber dem theoretischen Verlauf (logarithmischer Abfall) ein R^2 von i.d.R. $> 0,99$ aufweisen.

Die Messdaten zeigen, dass die Luftwechsel im Tagesverlauf abhängig vom Differenzdruck - also den Windverhältnissen und dem Temperaturunterschied zwischen innen und außen - in einem Bereich zwischen 0,14 /h und 0,73 /h liegen. Der mittlere Luftwechsel liegt zwischen 0,3 /h und 0,4 /h. Da die Messperiode Zeiträume mit deutlicher Variation der Windverhältnisse von praktisch windstill bis hin zu Windspitzen über 50 km/h (nach Angaben des Wetterdienstes) sowie ausgeprägte Unterschiede zwischen Tag- und Nachttemperatur und damit deutliche Variationen in den Temperaturdifferenzen aufwies, dürften diese Resultate auch die Verhältnisse außerhalb der Messperiode einigermaßen zuverlässig abbilden. Wenn in der kalten Jahreszeit eine Beheizung des Gebäudes stattfindet, werden die während der Nacht festgestellten erhöhten Luftwechsel auch im Tagesverlauf auftreten.

Eine Auftragung der Luftwechselzahlen gegen den Differenzdruck zeigt, dass diese miteinander korrelieren ($R^2=0,6145$), die vierkanalige Differenzdruckmessung an allen Himmelsrichtungen den effektiven Differenzdruck aber nicht vollständig abbildet. Dies ist auch zu erwarten, da die Leckagen im Gebäude nicht gleichmäßig verteilt sind, so dass Winddruck aus unterschiedlichen Richtungen und der Druck durch den thermischen Auftrieb sich unterschiedlich auf den sich ergebenden Luftwechsel auswirken. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei einer Verfeinerung des Modells zur Bestimmung des effektiven Differenzdruckes über die Messung des Differenzdruckes eine recht genaue Bestimmung des Luftwechsels möglich ist.

Da aus den Messergebnissen eindeutig hervorgeht, dass der Luftwechsel entscheidend durch thermische Effekte bestimmt ist, ist davon auszugehen, dass bei einer Sanierung und Abdichtung des Daches der thermisch bedingte Anteil des Luftwechsels deutlich zurückgehen wird. Da dieser über die Nachtstunden sehr wirksame Anteil bisher entscheidend den Gesamtluftwechsel beeinflusst hat, ist nach einer Abdichtung des Dachstuhles zumindest mit einer Halbierung des mittleren Luftwechsels auf Werte zwischen 0,15 und 0,2/h zu rechnen. Da die Undichtigkeiten des Dachstuhles nicht nur Bedeutung für den thermisch bedingten Luftwechsel haben, ist damit zu rechnen, dass die letztendliche Reduktion des Luftwechsels durch die Abdichtung des Daches noch höher sein wird.