

Endbericht des Modellvorhabens Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität Nr. 5

Beheizung von hochwärmegeprägten Gebäuden mit unterschiedlichen Temperaturzonen

Forschungsprogramm

Energie- und Klimafonds (EKF), Forschung und Untersuchungen im Rahmen des Energie- und Klimafonds, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

a) Untersuchungen der Regelungstechnik

Projektlaufzeit

Mai 2013 bis September 2013

Aktenzeichen

SWD 10.08.81-13.03

bearbeitet von

Prof. Dr. Manfred Büchel, Westfälische Hochschule Gelsenkirchen

b) Analyse der Gebäudeheizung und Vorschläge zur Systemoptimierung

Projektlaufzeit

15.07.2013 bis 15.08.2013

Aktenzeichen

SWD 10.08.81-13.02

bearbeitet von

Prof. Dr. Michael Schmidt, Universität Stuttgart

c) Begutachtung und Bewertung der Raumluftrömung im Heizfall

Projektlaufzeit

02. Januar 2014 bis 31. März 2014

Aktenzeichen

SWD 10.08.81 –13.04

bearbeitet von

Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner und Dipl. Ing. Florian Bräuer, Klimakonzept Ingenieurgesellschaft bR

im Auftrag

des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



Zur Problematik der Beheizung hoch
wärmegeämmter Gebäude mit unterschiedlichen
Temperaturzonen am Beispiel des Effizienzhaus Plus
mit E-Mobilität des BMUB in Berlin.



Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Beiträge

Effizienzhaus + mit Elektromobilität, Berlin
Prof. Dr. M. Büchel, Labor für Gebäudeautomation

Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität, Analyse der
Gebäudeheizung und Vorschläge zur Systemoptimierung
IGE Institut für GebäudeEnergetik
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt
Bearbeiter: Dipl.-Ing. Jörg Arold

Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität, Begutachtung und
Bewertung der Raumluftrömung im Heizfall
Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner und Dipl. Ing. Florian Bräuer,
Klimakonzept Ingenieurgesellschaft bR

Titelfoto

Effizienzhaus Plus, © Schwarz

Vorwort

Das Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität ist Teil eines Forschungsprogramms des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), bei dem aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau Modellvorhaben auf dem Gebiet des energieeffizienten Bauens und der Nutzung regenerativer Energien im Gebäudebereich unterstützt und erforscht werden. Bei diesem Projekt soll u. a. nachgewiesen werden, dass durch die Photovoltaik des Gebäudes in der Jahresbilanz mehr Energie bereitgestellt werden kann, als für den Betrieb des Gebäudes und die Nutzung der Elektromobile benötigt wird. Nachfolgend wird auszugsweise über die bisherigen Erkenntnisse aus der Begleitforschung berichtet. Weitere Informationen stehen im Internet auf den Seiten der Forschungsinitiative Zukunft Bau (www.forschungsinitiative.de) zur Verfügung.

Im Folgenden wird von diesen Forschungsergebnissen auszugsweise über den Bereich der Gebäudebeheizung berichtet.

Heizungsproblematik

Schon zu Beginn der Nutzung des Gebäudes im Dezember 2011 wurden Probleme bei der Beheizung des Gebäudes erkennbar, die jedoch wegen der Besonderheiten der Nutzung im Zusammenhang mit der Öffentlichkeitsarbeit nicht detailliert überprüft werden konnten. Das änderte sich erst mit dem Einzug der ersten „Testfamilie“ zum 1. März 2012 und der damit verbundenen Stabilisierung der Nutzungssituation. Trotzdem konnten bis zum Ende der bei hoch wärmedämmten Gebäuden nur sehr kurzen ersten Heizperiode 2011/12 nicht alle diesbezüglichen Phänomene untersucht werden.

In der folgenden Heizperiode, etwa ab Oktober 2012, wurde dann weitere Ursachenforschung betrieben. Nach Korrekturen in der Zuordnung von Heizkreisen zu Raumreglern und dem Austausch eines defekten Regelgerätes verblieb ein zunächst nicht erklärbarer Bedarf an hohen Vorlauftemperaturen für den Betrieb der Fußbodenheizung. Der gesamte Wärmeverbrauch des Gebäudes war auslegungsgemäß. Trotzdem musste die Wassertemperatur der Fußbodenheizung für eine ausreichende Beheizung des Gebäudes um mehr als 10 K gegenüber den Auslegungsbedingungen angehoben werden. Das bedeutete eine maximale Vorlauftemperatur von 45°C (gegenüber geplanten 35°C) und damit verbunden eine deutliche Verschlechterung der Leistungsziffer der Wärmepumpe. Für den realen Betrieb im ersten Jahr der familiären Nutzung wurde diese mit 2,3 gegenüber dem erwarteten Wert von 3,5 ermittelt.

Weitergehende Untersuchungen zeigten dann als Ursache für diesen Effekt eine nicht „normgerechte“ Nutzung des Gebäudes. Abweichend von den Auslegungsnormen, bei denen davon ausgegangen wird, dass in allen Aufenthaltsbereichen gleiche Temperaturen herrschen, hatte die Familie die Sollwerte in den Schlafzimmern des OG gegenüber den Auslegungsbedingungen deutlich reduziert (16–17°C gegenüber 20°C) und im Wohnbereich des EG leicht erhöht (auf 21°C).

In der Praxis stellten sich die von den Nutzern in den oberen Geschossen gewünschten niedrigen Temperaturen jedoch zu keinem Zeitpunkt ein. Ursache dafür ist einerseits die hohe Wärmedämmung des Gebäudes, die ein Auskühlen der Räume verhindert und andererseits die offene Bauweise dieses Hauses mit der fehlenden Trennung zwischen den Geschossen. Dadurch wird es möglich, dass zwischen Erd- und Obergeschoss ein erheblicher Wärmeaustausch stattfindet, der die Wärmeverluste durch die Außenhülle deutlich übersteigt. Infolgedessen blieben die Heizflächen des OG ungenutzt und der gesamte Wärmebedarf des Hauses musste über die Fußbodenheizung des Erdgeschosses eingebracht werden. Das war aber nur dadurch möglich, dass die Vorlauftemperatur entsprechend angehoben wurde, was wiederum zur ungünstigen Leistungsziffer der Wärmepumpe führte.

Dieser Effekt ist erstmals in diesem Forschungsvorhaben dokumentiert und es ergeben sich daraus für künftige Planungen erhebliche Auswirkungen auf den Entwurf des Architekten und die Auswahl des Heizungssystems. Die Alternative dazu, den Nutzer eines Gebäudes darauf festzulegen, in allen Räumen normgerechte Temperaturen einzustellen, widerspricht den Bedürfnissen und Anforderungen weiterer Bevölkerungskreise. Es wird deshalb Aufgabe der künftigen Bauforschung sein, die Auswirkungen dieses Effektes näher zu untersuchen und Lösungsvorschläge zu erarbeiten. Für die weitere Nutzung des Effizienzhauses Plus mit Elektromobilität wurde untersucht, wie der ungewollte Wärmeaustausch zwischen EG und OG unterbunden werden kann. Als günstigste Lösung erwies sich eine luftseitige Abtrennung von EG und OG dadurch, dass im EG eine Tür eingebaut wurde. Dadurch soll sichergestellt werden, dass einerseits die gewünschten Temperaturniveaus erreicht werden und dass andererseits bessere Bedingungen für den Betrieb einer Wärmepumpe gegeben sind.

Die Auswirkungen können allerdings erst in der kommenden Heizperiode 2014/15 unter realen Bedingungen erforscht werden.

Nachfolgend finden Sie drei in diesem Zusammenhang durchgeführte Forschungsarbeiten zur Regelungstechnik (Prof. Manfred Büchel), zur Heizungstechnik (Prof. Michael Schmidt) und zur Raumluftrömung (Prof. Klaus Fitzner) am Effizienzhaus Plus mit E-Mobilität.

Kurt Speelmanns

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Referat II 3, Forschung und Gebäudemanagement

Deichmanns Aue 31 – 37

53179 Bonn

Tel.: 0228 99401 2730

mailto:kurt.speelmanns@bbr.bund.de



**Prof. Dr. M. Büchel
Labor für Gebäudeautomation**

Neidenburger Straße 43
D-45897 Gelsenkirchen

Fon: +49 209 9596 152
Fax: +49 209 9596 154
manfred.buechel@w-hs.de

Gelsenkirchen, 03.04.2013

Bericht

Effizienzhaus+ mit Elektromobilität, Berlin

Auftraggeber:

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Referat II 3, Forschung im Bauwesen

und Gebäudemanagement

Deichmanns Aue 31 – 37

53179 Bonn

Auftragsdatum: 20.12.2012



Auftragsumfang

1. Analyse des Regelverhaltens der Fußbodenheizung, Erkunden der Ursache für das Schwingungsverhalten, Ausarbeiten eines Verbesserungsvorschlages und Kontrolle der Umsetzung.
2. Analyse der ETS 3 -Programmierung auf Einhaltung der produktspezifischen Vorgaben und der projektspezifischen Anforderungen.
3. Analyse der Wärmepumpe hinsichtlich der technischen Möglichkeiten und der regelungstechnischen Zusammenhänge in Bezug auf die Warmwasserbereitung, die Vorregelung zur Fußbodenheizung und die Versorgung der raumluftechnischen Anlage.
4. Abgleich der Möglichkeiten der Wärmepumpe zur Wärmeversorgung mit der Bauausführung vor Ort und den aktuellen Einstellungen des Systems.
5. Erarbeiten eines Verbesserungsvorschlages im Hinblick auf eine bedarfsgerechte Regelung der Wärmepumpe zur Verbesserung der Jahresarbeitszahl.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation am 09.01.2013 im Bereich Essen/Wohnen	4
2	18.01.2013 / Prüfung der Pulsweitenmodulation	6
3	18.01.2013 / Bereich Essen/Wohnen	7
4	Überprüfung der hydraulischen Situation im FBH-Kreis	11
4.1	Zur Situation im Erdgeschoss	11
4.2	Zur Situation im Obergeschoss.....	12
4.3	Versuche am 15.01.2013	13
5	Einstellung der Regelparameter	16
6	17.02.2013: Zwischenstand.....	18
7	22.02.2013: Zwischenstand nach Optimierung der Regelparameter	21
8	Führung der Rücklaufsolltemperatur der Wärmepumpe	23
8.1	Regelungstechnische Ansätze zur Verbesserung der Arbeitszahl	25
8.2	Empfehlung	28
9	Arbeitszahl der Wärmepumpe	28

Dieser Bericht enthält Beobachtungen und Schlussfolgerungen aus dem Betrieb der Heizungsanlage im Effizienzhaus+ während des Zeitraums Anfang Januar 2013 bis 14.03.2013.

Eine Ortsbesichtigung fand nicht statt. Alle Beobachtungen beruhen auf Abfragen der im SQL-Server hinterlegten Datenbank. Die Zuordnung von Datenpunkten zu den realen Messstellen musste anhand der Datenpunktbeschreibung erfolgen. Insoweit bleiben Irrtümer ausdrücklich vorbehalten.

Verwendete Unterlagen:

- Bestandsplan, ohne Nummer, ohne Datum, Freigabe(?) - Vermerk 12.12.2011, als Datei D10623PEH420_P003.pdf hier eingegangen am 14.01.2013
- Weishaupt(?): WPM 2006plus... / Montage- und Inbetriebnahmeanweisung für den Installateur / Bestell-Nr.: 452114.66.47 FD 8705
- Systemec: ETS-Projektdokumentation „Plus Energiehaus Berlin“, Gebäudeansicht Detail, Druckdatum 21.12.2012
- Thermisto Fussbodenheizung GmbH: GT1077_Plusenergiehaus / Auslegungsberechnung / Stand: 23.03.2011

Zusammenfassung

Die Untersuchungen lassen erhebliche Probleme im Bereich der Hydraulik vermuten. Es wird daher empfohlen, sowohl den Gesamtvolumenstrom als auch dessen Verteilung auf die Heizkreise in Übereinstimmung mit der Auslegungsberechnung zu bringen.

In diesem Zusammenhang ist auch die Einstellung der Heizkreispumpen (Regelart, Sollwerte) zu überprüfen. Die „Vorregelung“ von Heizkreis 2 (FBH) ist überflüssig, sofern die RLT-Anlage ggfls. unterversorgt werden darf.

Sofern der Wärmemengenzähler am Ausgang der WP (im Bestandsplan mit WZ EP01 bezeichnet) so eingebaut ist wie im Plan dargestellt, wird er in Phasen der Speicherladung fehlerhafte Werte aufzeichnen.

In Bezug auf die Regelung wird eine außentemperaturgeführte Rücklauftemperaturregelung der WP mit nachgelagerten Temperaturregelungen in den Einzelräumen empfohlen.

1 Ausgangssituation am 09.01.2013 im Bereich Essen/Wohnen

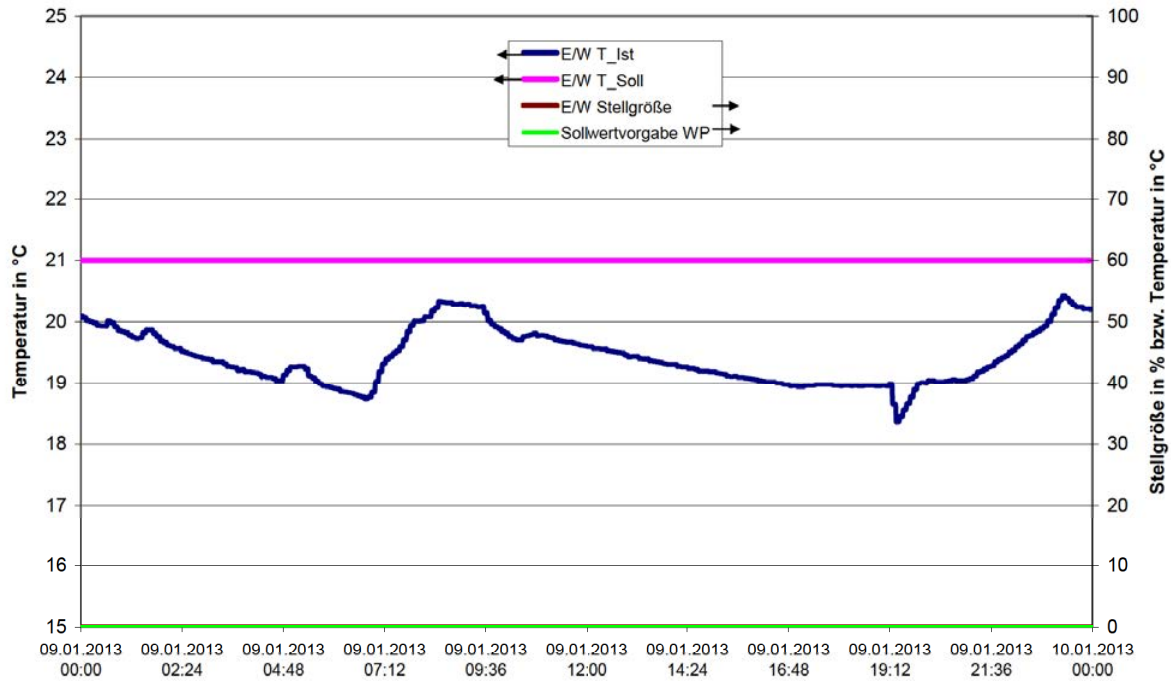


Bild 1: Raumtemperatur (Istwert und Sollwert) im Bereich Essen/Wohnen am 09.01.2013. Die in der Legende eingetragenen Datenpunkte „E/W-Stellgröße“ und „Sollwertvorgabe WP“ waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht verfügbar. Über die inneren Wärmequellen (Personen, Geräte, Zusatzheizungen usw.) liegen keine Informationen vor.

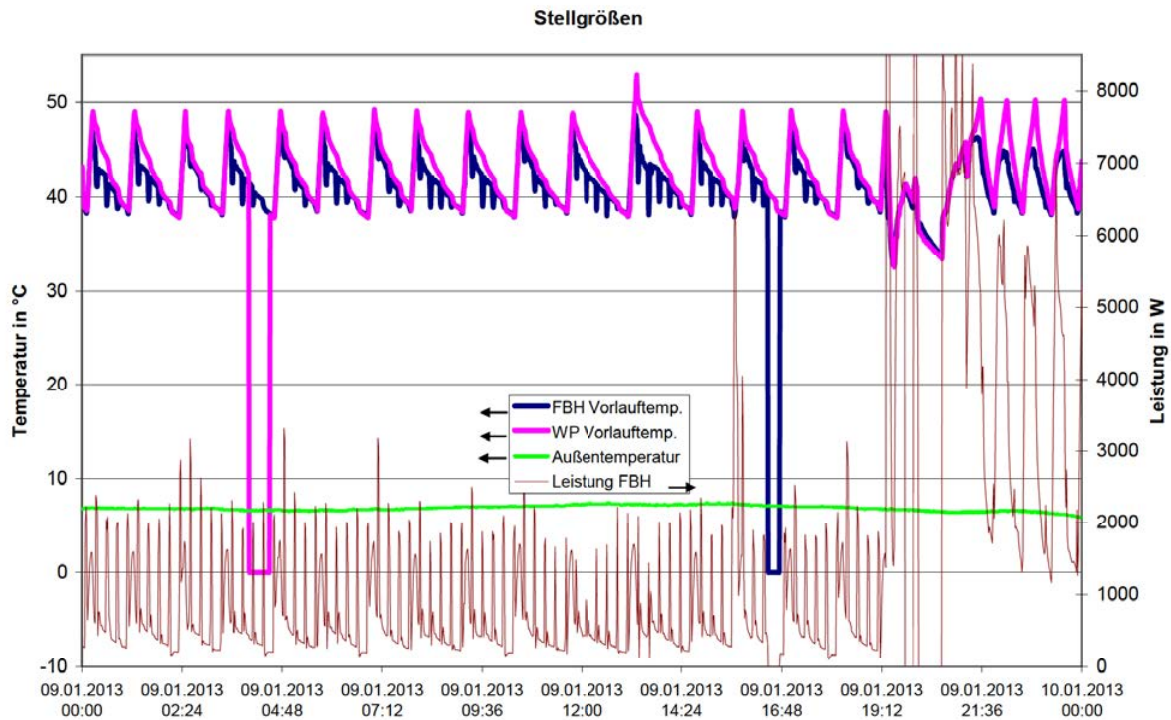


Bild 2: Heizkreis Fußbodenheizung: Vorlauftemperaturen vor und hinter dem Mischventil, Wärmeleistung, Außentemperatur

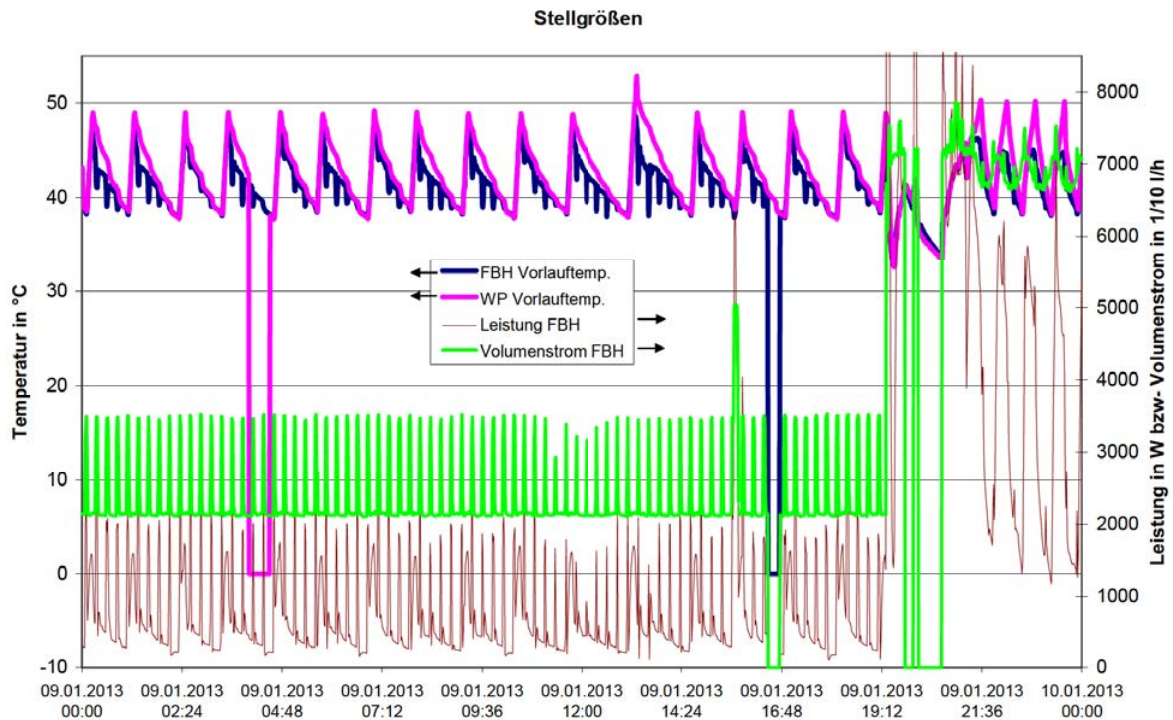


Bild 3: Wie Bild 2, jedoch mit dem Volumenstrom durch die Fußbodenheizung

Befund:

- a) Solltemperatur ganztägig unterschritten (-0,5 K bis -2,5 K)
- b) Mittlere eingetragene Leistung < 1 kW trotz Vorlauftemperatur > 40°C. $\Delta\vartheta \approx 2$ K.
- c) Anstieg der Leistung erst gegen 19:00 Uhr (Sprung auf Maximum, danach wieder allmählicher Abfall)
- d) Volumenstrom vor ca. 19:00 Uhr bei ca. 200 l/h¹, Pulse im 15 min-Abstand auf 350 l/h, vermutlich verursacht durch ein Ventil in einem Heizkreis OG.
- e) Nach 19:00 Uhr sprunghafter Anstieg des Volumenstroms auf Maximalwert 700 l/h. Grund unklar. 15 min-Modulation nicht mehr erkennbar, dafür jedoch Schwingungen um bis zu 100 l/h im Takt der Vorlauftemperatur.
- f) Verlauf der WP-Vorlauftemperatur lässt die Wirkung des WP-internen Zweipunktreglers erkennen ($T_p \approx 1$ h, $\Delta^2 \approx 10$ K).

¹ Grund für den Einbruch auf 0 gegen 16:30 Uhr war eine Kommunikationsstörung.

² Schwankungsbreite

Fazit:

Der Verlauf des Leistungseintrags entspricht dem des Volumenstroms. Der Volumenstrom beträgt allerdings auch im Maximum nur ca. 60 % des Auslegungsvolumenstroms:

Auslegung EG: 661 I/h, Auslegung OG: 574 I/h, Auslegung $\Delta\vartheta \approx 5...6$ K!

Aussagen über die Verteilung des Volumenstroms sind nicht möglich, da am 09.01.2013 die vorliegende Information über die Stellung der Heizkreis-Ventile nicht korrekt ist. Darüber hinaus wird zu diesem Zeitpunkt die analoge Stellgröße der Raumtemperaturregler noch nicht registriert.

2 18.01.2013 / Prüfung der Pulsweitenmodulation

Seit dem 09.01.2013 wurden die Temperaturregler in den Räumen durch Fa. Systec umparametriert:

- Art der Regelung: Schaltende PI-Regelung (PWM)
- Verbindung des Objekts Nr. 46 mit dem SQL-Server, damit die interne stetige Stellgröße des Reglers aufgezeichnet werden kann.

Bild 4 zeigt, dass das Reglerausgangssignal sauber in eine Impulsfolge ($T_P = 15$ min) mit einem entsprechenden Impuls/Pausen-Verhältnis umgewandelt wird.

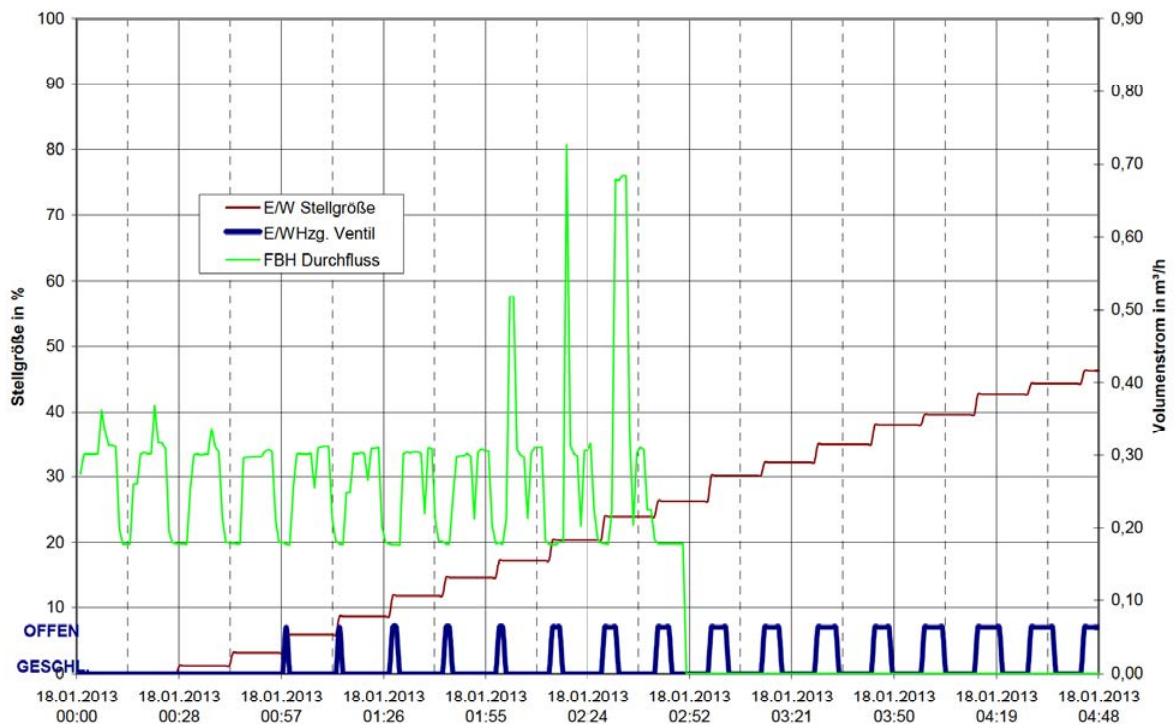


Bild 4: Die analoge Stellgröße des Reglers im Bereich Essen/Wohnen, sein pulsweitenmoduliertes binäres Ausgangssignal sowie der resultierende Volumenstrom. Die Volumenstrommessung erfasst auch die Heizkreise im Obergeschoss. Der Abfall auf 0 gegen 02:52 Uhr beruht auf einer Kommunikationsstörung.

Bild 4 zeigt aber auch, dass die Abbildung des elektrischen Signals in einen Volumenstrom nicht sehr sauber funktioniert. Kurze Impulse bewirken infolge der langen Öffnungs- und Schließzeiten der Antriebe offenbar keine Änderung des Volumenstroms. Erst Impulsdauern ab ca. 160 s, wie sie durch Signale von ca. 18 % erzeugt werden, haben einen merklichen Einfluss auf den Volumenstrom.

Bei den Stellantrieben handelt es sich ausweislich der hier vorliegenden Fotos um das Fabrikat Cosmo, Typ CST.... Abhängig von der hier nicht bekannten Betriebsspannung ist seine Öffnungszeit mit 3 min (230 V) bzw. 5 min (24 V) spezifiziert.

Auf/Zu-Antriebe sind in FBH-Anlagen weit verbreitet. Ein Ersatz durch stetige Antriebe erscheint derzeit nicht sinnvoll. Sollte sich in Schwachlastzeiten der anfangs zu geringe Volumenstrom als Problem herausstellen, wird empfohlen, als Erstes die Periodendauer auf 20 min oder 25 min zu erhöhen.

3 18.01.2013 / Bereich Essen/Wohnen

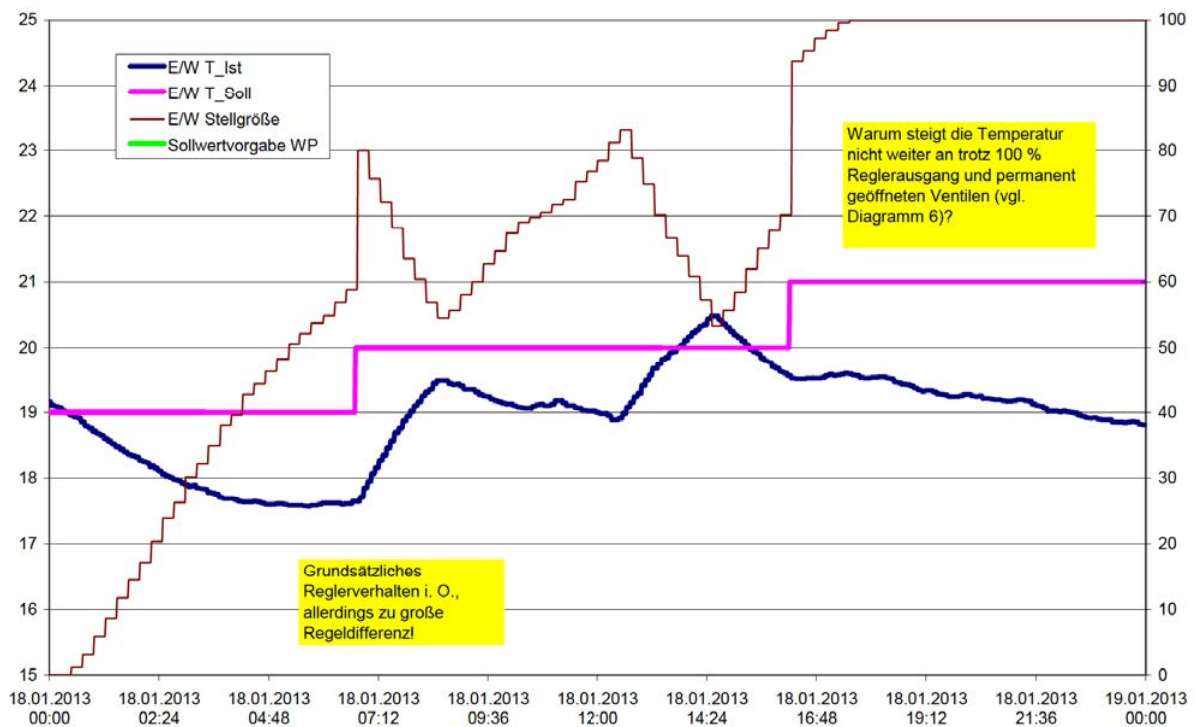


Bild 5: Raumtemperatur (Istwert und Sollwert) im Bereich Essen/Wohnen am 18.01.2013. Der in der Legende eingetragene Datenpunkt „Sollwertvorgabe WP“ war zu diesem Zeitpunkt noch nicht verfügbar. Über die inneren Wärmequellen (Personen, Geräte, Zusatzheizungen usw.) liegen keine Informationen vor.

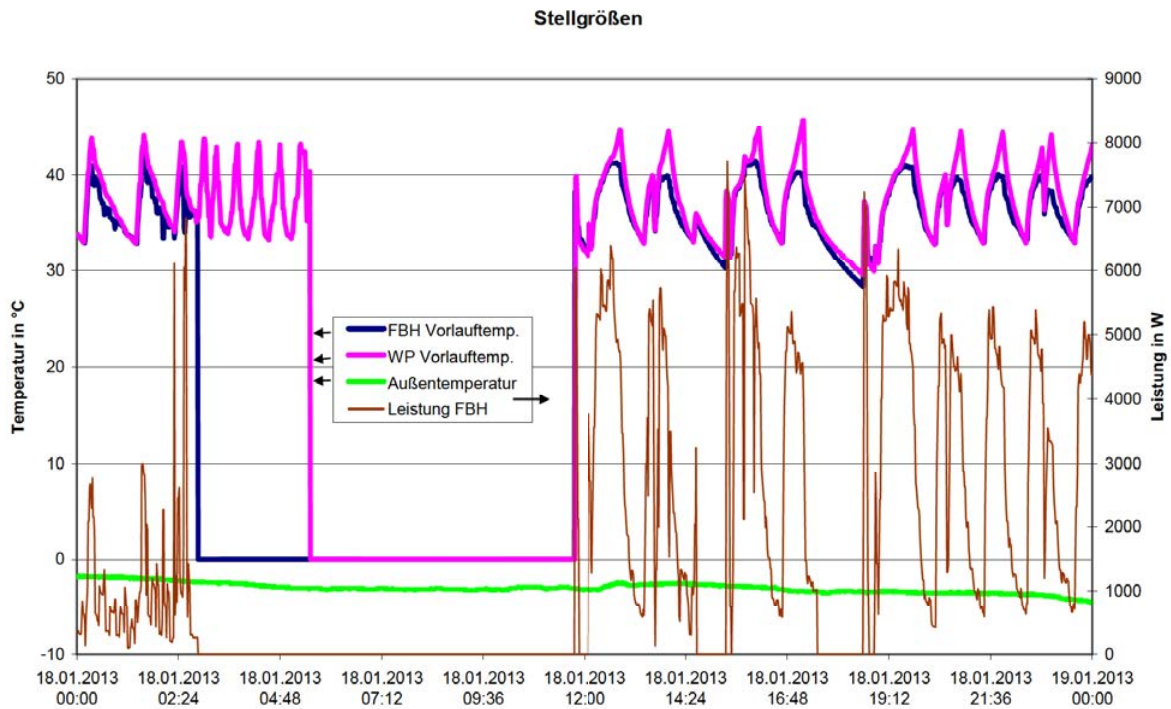


Bild 6: Heizkreis Fußbodenheizung: Vorlauftemperaturen vor und hinter dem Mischventil, Wärmeleistung, Außentemperatur

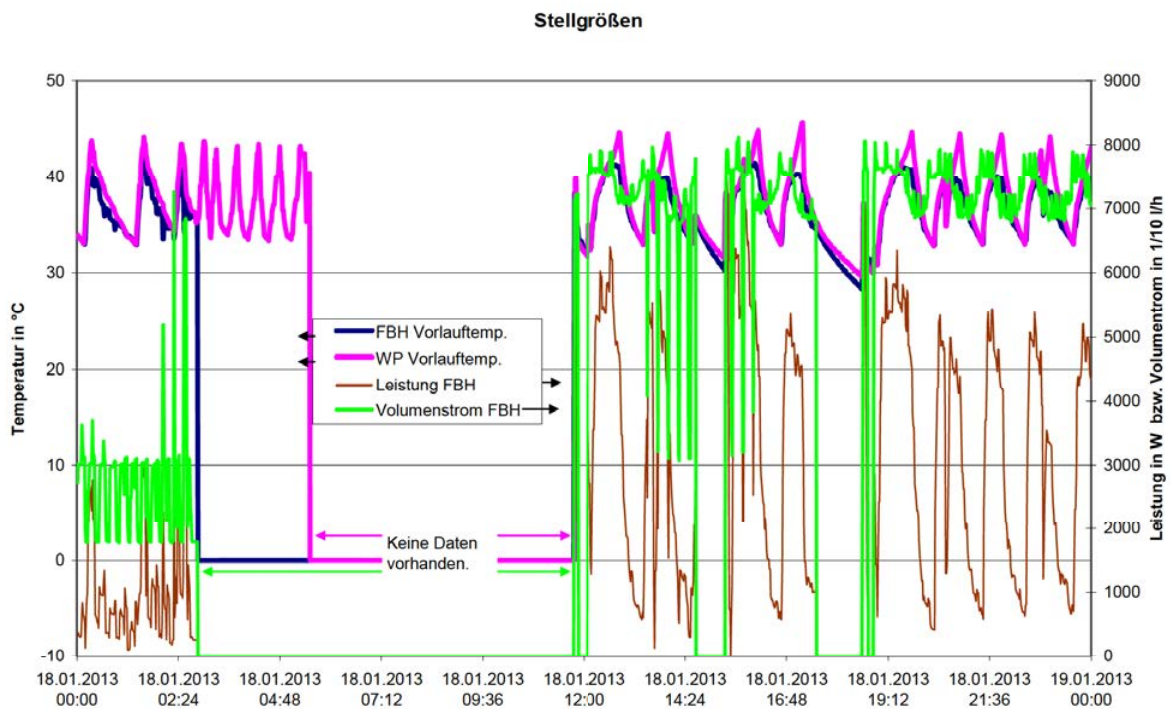


Bild 7: Wie Bild 6, jedoch mit dem Volumenstrom durch die Fußbodenheizung

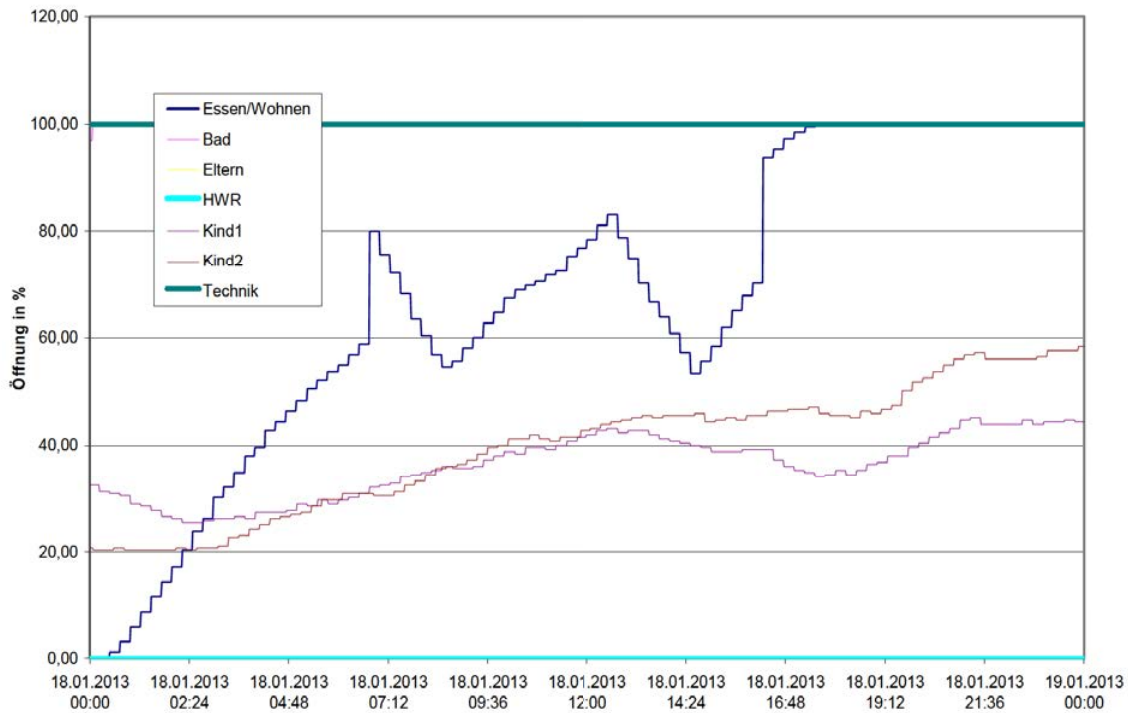


Bild 8: Analogausgangssignale aller Raumtemperaturregler. Die Signale werden in Form weitenmodulierter Impulse an die elektrothermischen Stellantriebe der FBH-Ventile gegeben.

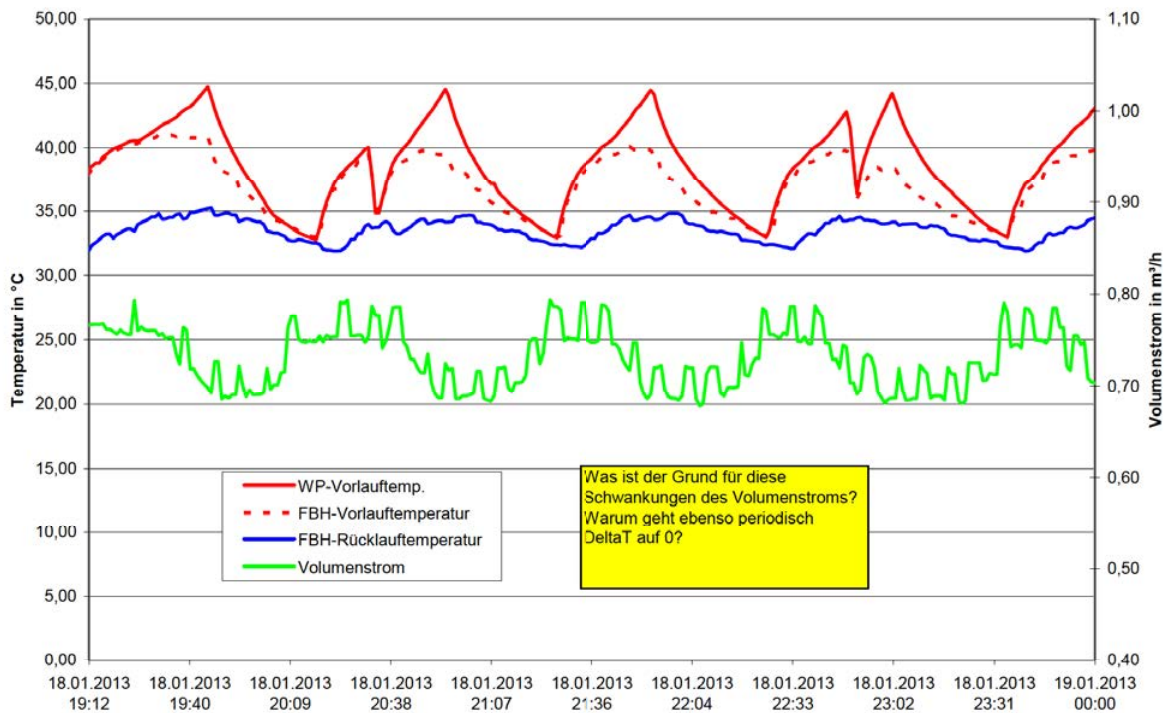


Bild 9: Vorlauftemperaturen vor und hinter dem Mischventil des FBH-Kreises, Rücklauftemperatur des FBH-Kreises und Volumenstrom.



Befund:

- a) Solltemperatur bis auf einen kurzen Zeitraum ganztägig unterschritten (+0,5 K bis -2,1 K) → Bild 5
- b) Der Raumtemperaturregler arbeitet: Bei steigender Temperatur wird das Ausgangssignal kleiner und umgekehrt; Erhöhung des Sollwertes führt unmittelbar zu einer Erhöhung des Ausgangssignals → Bild 5. Zweimal nimmt der Regler das Ausgangssignal bei steigender Temperatur zurück, obwohl der Sollwert noch nicht erreicht ist. Dies stützt die Vermutung, dass der registrierte und in den Diagrammen dargestellte Sollwert nicht identisch ist mit dem aktuell vom Regler verwendeten Sollwert. In der Folge wurden hier nicht näher bekannte Umparametrierungen vorgenommen, so dass dieses Phänomen nach einigen Tagen verschwunden war.
- c) Ab ca. 19:00: Volumenstrom schwankt mit einer Periodendauer von ca. 1 h zwischen 700 l/h und 800 l/h. In allen Räumen (außer den Kinderzimmern) sind die FBH-Ventile vollständig geöffnet oder geschlossen. In den Kinderzimmern sind sie teilweise geöffnet, eine Schwankung der Ventilstellungen, die die erwähnte Volumenstromschwankung erklären könnte, ist jedoch nicht erkennbar → Bild 8.
- d) Bei länger anstehendem maximalen Volumenstrom (750 l/h) starke Schwankung der eingetragenen Leistung → Bild 7. Grund dafür ist die in Bild 9 erkennbare Schwankung der Differenz zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur zwischen fast 0 und ca. 6 K.
- e) Verlauf der WP-Vorlauftemperatur lässt die Wirkung des WP-internen Zweipunktreglers erkennen ($T_p \approx 1 \text{ h}$, $\Delta \approx 10 \text{ K}^3$) → Bild 9.

Fazit:

Einziges Grund für den beobachteten Effekt, dass trotz maximalem Volumenstrom zeitweise (periodisch) kein oder nur ein minimaler Wärmeeintrag erfolgt, kann eigentlich nur die sog. „Vorregelung“ des FBH-Kreises sein, d. h. das Dreiwegemischventil als Stellglied eines Reglers, der im sog. Wärmepumpenmanager der WP implementiert ist. Lt. Installationshandbuch des Wärmepumpenmanagers handelt es sich dabei um eine Rücklauftemperaturregelung, die bei entsprechender Parametrierung nur den Mischer ansteuert. Dazu heißt es im Handbuch:

2./3. Heizkreis Temperaturfühler	Ist der Fühler für den 2./3.Heizkreis im Vor- oder Rücklauf installiert? Bei Einstellung Rücklauf wird der berechnete Sollwert 2. Heizkreis auch zur Heizungsanforderung Wärmepumpe verwendet. Bei Einstellung Vorlauf nur zur Mischeransteuerung.	Rücklauf Vorlauf	2. Heizkreis
---	--	-------------------------	--------------

³ Schwankungsbreite

2./3.HK Festwertreg. Solltemp.	Einstellung der gewünschten Rücklaufsolltemperatur bei gewählter Festwertregelung	15°C ... 40°C ... 60°C	2. Heizkreis Festwert 2.Heizkreis
---------------------------------------	---	------------------------------	--------------------------------------

Am 26.02.2013 hat Herr Gottschling die Parameter vor Ort vom Display des Gerätes abgeschrieben.

Zu diesem Zeitpunkt war eine Festwertregelung mit einem Sollwert von 40°C und einem Fühler im Vorlauf parametrier.

Diese Daten passen nicht zur Aussage von Bild 9: Hier kann man allenfalls eine Rücklauftemperaturregelung vermuten, allerdings mit RL-Temperaturschwankungen zwischen 35°C und ca. 32,5°C. Sollte dagegen die Vorlauftemperatur geregelt sein, so wäre das Ergebnis mit einer Schwankungsbreite von 7 K ziemlich schlecht. Andererseits liegt der Maximalwert der Vorlauftemperatur bei 40°C bis 41°C, was wiederum gut zu dem eingestellten Sollwert von 40 °C passen würde.

Unabhängig von diesen Widersprüchen, die geklärt werden sollten, macht Bild 9 deutlich, dass das Mischventil arbeitet und die beobachteten Schwankungen der Vorlauftemperatur erzeugt. Deren Periodendauer von etwas mehr als einer Stunde passt im Übrigen gut zu der in lit. c) erwähnten Periode des Volumenstroms. Offensichtlich ändern sich die hydraulischen Verhältnisse geringfügig, wenn die FBH-Pumpe Wasser im geschlossenen Umlauf fördert, bzw. wenn im anderen Fall der FBH-Kreis zu 100% an das „große“ System gekoppelt ist.

Es wird empfohlen, auch die Stellung des Mischventils noch aufzuzeichnen, falls die Vorregelung überhaupt in Betrieb bleibt (sh. Abschnitt 8.2).

4 Überprüfung der hydraulischen Situation im FBH-Kreis

4.1 Zur Situation im Erdgeschoss

Die Auslegung der FBH vom 23.03.2011 weist für das EG insgesamt 7 Heizkreise verteilt auf 3 Gruppen aus (Bild 10).

Flächenheizkreise

Vb-Nr.	Raumbezeichnung	Sys	n	l _{Hk} m	da x s mm	V̇ l/h	Topm. l/min	Δp hPa	σ K	ΦAZ W/m²	TlGAZ mm	θF,m,AZ °C	ΦRZ W/m²	TlGRZ mm	θF,m,RZ °C
01.001/1	Wohnen / Essen	Fbh	4	99,90	16x2,00	113,0	1,88	123,4	5,5				46,4	RZ	26,5
01.002/1	Empfang	Fbh	2	69,96	16x2,00	101,1	1,69	71,3	5,0				55,5	RZ	25,3
01.003/1	WC	Fbh	1	21,20	16x2,00	6,5	0,11	0,6	14,6				34,0	RZ	23,4

Bild 10: Auslegung der Flächenheizkreise EG (23.03.2011)

Im Grundrissplan dagegen sind insgesamt nur 5 Heizkreise eingezeichnet.

Der Heizkreisverteiler für das EG besitzt auch tatsächlich 5 Abgänge (Bild 11).



Bild 11: Heizkreisverteiler EG. Aufnahme datum 15.01.2013

Alle sechs Kanäle des Heizungsaktors sind der KNX-Gruppenadresse 5/1/102 zugeordnet.

Im Technikraum im EG ist zwar ein KNX-Raumtemperatursensor montiert, der Raum verfügt jedoch nicht über eine Heizung.

4.2 Zur Situation im Obergeschoss

Die Auslegung der FBH vom 23.03.2011 weist für das OG insgesamt 7 Heizkreise verteilt auf 5 Gruppen aus (Bild 12).

Flächenheizkreise

Vb-Nr.	Raumbezeichnung	Sys	n	l _{HK} m	da x s mm	\dot{V} l/h	Topm. l/min	Δp hPa	σ K	Φ_{AZ} W/m ²	Tl _{GAZ} mm	$\theta_{F,m,AZ}$ °C	Φ_{RZ} W/m ²	Tl _{GRZ} mm	$\theta_{F,m,RZ}$ °C
02.001/1	Flur	Fbh	2	99,00	16x2,00	59,4	0,99	25,2	9,1				37,6	RZ	23,7
02.002/1	Kind 1	Fbh	1	88,03	16x2,00	105,5	1,76	97,6	5,0				39,8	RZ	25,9
02.003/1	Kind 2	Fbh	1	88,03	16x2,00	105,5	1,76	97,6	5,0				39,8	RZ	25,9
02.004/1	Eltern/Arbeiten	Fbh	2	84,32	16x2,00	101,1	1,68	86,9	5,0				39,8	RZ	25,9
02.005/1	Bad	Fbh	1	35,90	16x2,00	41,6	0,69	6,1	5,0				37,7	RZ	27,7

Bild 12: Auslegung der Flächenheizkreise OG (23.03.2011)

Im Grundrissplan dagegen sind insgesamt nur 6 Heizkreise eingezeichnet. Der Heizkreisverteiler für das OG besitzt auch tatsächlich genau 6 Abgänge (Bild 13).



Bild 13: Heizkreisverteiler EG. Aufnahmedatum 15.01.2013.

Die vorbeschriebene Situation ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Planung und Ausführung der FBH

	Anzahl Heizkreise lt. Grund- rissplan	Abgänge HKV ausgeführt	Auslegungs- rechnung	Anzahl Sensoren
EG	5	5	7 Heizkreise 3 Gruppen	2
OG	6	6	7 Heizkreise 5 Gruppen	5

4.3 Versuche am 15.01.2013

Am 15.01.2013 wurde durch sukzessives 100%iges Öffnen und Schließen der Heizkreisventile die Verteilung der Strömungswiderstände der einzelnen Heizkreise untersucht.

Zum Öffnen der Ventile hat H. Gottschling, Fa. HOCHTIEF Solutions FM, jeweils für einige Minuten den Ventilantrieb vom Unterteil entfernt und anschließend die vor Ort angezeigten Volumenstromwerte notiert. Das Ergebnis hat er in Tabelle 2 festgehalten.

Tabelle 2: Versuchsprotokoll vom 15.01.2013 (HOCHTIEF FM, Hr. Gottschling)

Test	Uhrzeit	Zustand	Durchfluss lt. Anzeige WMR vor Ort in l/h	Durchfluss lt. SQL-Server in m ³ /h	Durchfluss lt. InTouch In l/h (WMR)	Leistung des Heizkreises lt.	Vorlauftemperatur HKV in	Rücklauftemperatur HKV	Kanal
Alle Kreise	14:12	Zu	0	0	0	0			
Wohnen/Essen /WC	14:20	Auf	5 x 120	0,64	641	4010	43,1	37,7	1-5
Alle Kreise	14:37	Zu	0	0	0	0			
Bad	14:41	Auf	210	0,208	204	3842	40,0	23,7	1
Alle Kreise	14:43	Zu	0	0	0	0			
Kind 1 (rechts)	14:51	Auf	168	0,176	176	2180	44,0	33,3	2
Alle Kreise	14:52	Zu	0	0	0	0			
Kind 2 (links)	14:55	Auf	180	0,191	191	2087	42,8	32,3	3
Alle Kreise	14:59	Zu	0	0	0	0			
Schlafen	15:04	Auf	2 x 180	0,367	367	3855	39,6	30,6	4+5
Alle Kreise	15:06	Zu	0	0	0	0			
HWR	15:10	Auf	228	0,247	247	1368	423,1	38,4	6
Alle Kreise	15:15	Zu	0	0	0	0			
Alle Kreise	15:23	Auf	11 x 60 ... 90	0,835	835	8975	40,1	30,8	
Alle Kreise	15:30	Automatik							Ende

Tabelle 2 lässt erkennen, dass bei gleichzeitigem Öffnen aller Ventile der Volumenstrom nur 68 % des Auslegungswertes von 1.234 l/h erreicht (Bild 14).

Summen über alle Verteiler	
Gesamtvolumenstrom:	1234,4 l/h
Gesamtwassermenge:	128,9 l

Bild 14: Ausschnitt aus der Auslegung der FBH vom 23.03.2011

Erwartungsgemäß zeigt Tabelle 2 auch, dass die bei nur einer geöffneten Heizkreisgruppe gemessenen Volumenströme in Summe einen höheren Wert ergeben als der gemessene Volumenstrom im Fall aller Ventile im Auf-Zustand (835 l/h). Der Volumenstrom in den einzelnen Heizkreisen wird messtechnisch nicht erfasst. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die relative Verteilung der Einzelvolumenströme in beiden Fällen (Öffnen nacheinander; Öffnen gleichzeitig) dieselbe ist. Somit ergibt sich eine Abschätzung für die Einzelvolumenströme im Fall des gleichzeitigen Betriebs aller Heizkreise wie folgt:

$$\dot{V}_{i,geschätzt} = \frac{\dot{V}_{i,gemessen}}{\sum_i \dot{V}_{i,gemessen}} \cdot \dot{V}_{ges,gemessen} \dots\dots\dots (1)$$

i: lfd. Nr. der Gruppe

Die so geschätzte Verteilung ist in Bild 15 in Form blauer Säulen dargestellt.

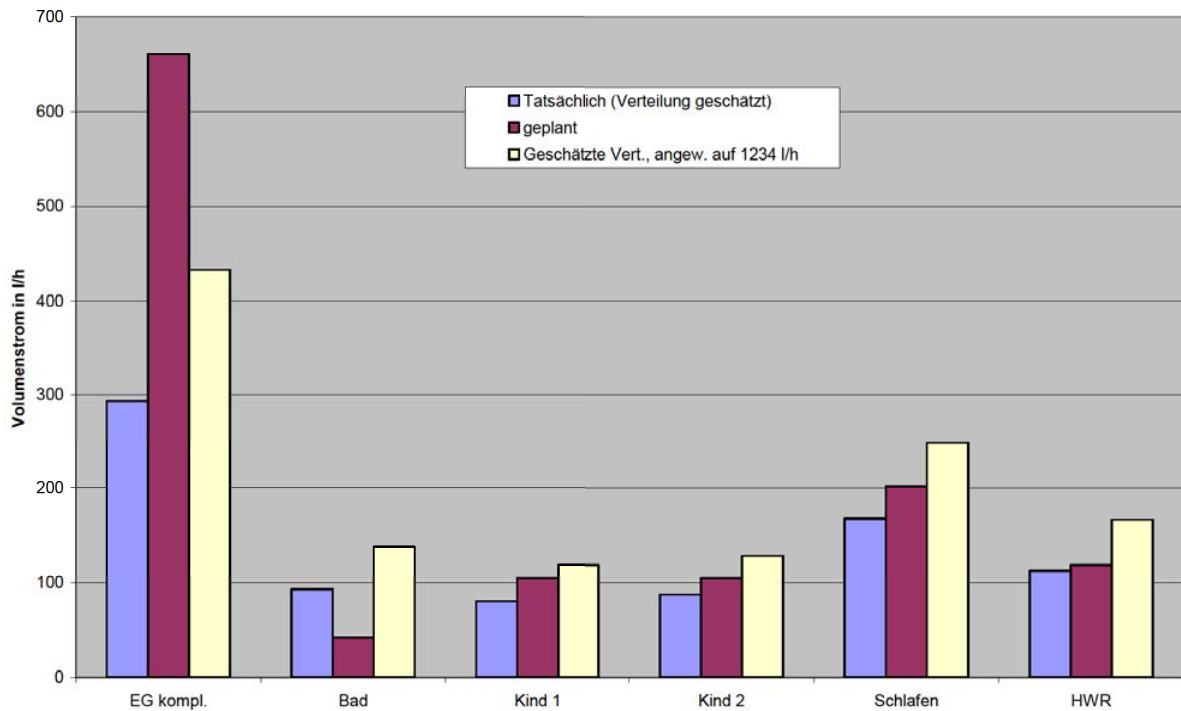


Bild 15: Gegenüberstellung der geschätzten Volumenströme auf Basis der Messungen und der Auslegungsvolumenströme.

Die lila Säulen in Bild 15 repräsentieren die Auslegungsvolumenströme der einzelnen Heizkreise.

Mit den hellen Säulen wird die Frage beantwortet, welchen Effekt alleine eine Erhöhung des Gesamtvolumenstroms auf den Auslegungswert von 1.234 l/h hätte, ohne die Voreinstellung der Heizkreise zu verändern.

Man erkennt, dass das EG mit knapp 300 l/h bei einem Auslegungswert von 661 l/h derzeit erheblich unterversorgt ist. Das Bad dagegen ist erheblich überversorgt. Man erkennt aber auch, dass eine Erhöhung des Volumenstroms auf max. 1.234 l/h das Problem der Unterversorgung im Erdgeschoss noch nicht lösen kann, während die Temperaturen im Bad noch weiter steigen würden.

Fazit:

- a) Der Volumenstrom durch die Anlage ist zu erhöhen (→ Umwälzpumpe?).
- b) Die Voreinstellung der Heizkreise ist entsprechend der Auslegung einzustellen.

5 Einstellung der Regelparameter

Zur Optimierung der Parameter der KNX-Raumtemperaturregler wurden am 05.02.2013 Sprungantworten aufgenommen. In der betreffenden Woche waren die Bewohner abwesend, so dass sich verändernde innere Lasten ausgeschlossen werden konnten.

Essen/Wohnen

- Ausgangssituation um 08:30 Uhr:
Reglerausgang 20,39 %, Raumtemperatur 19°C
 - Aktor auf 20% fest eingestellt
- 10:00 Uhr: Aktor auf 50% fest eingestellt
 - Temperaturverlauf → Bild 16

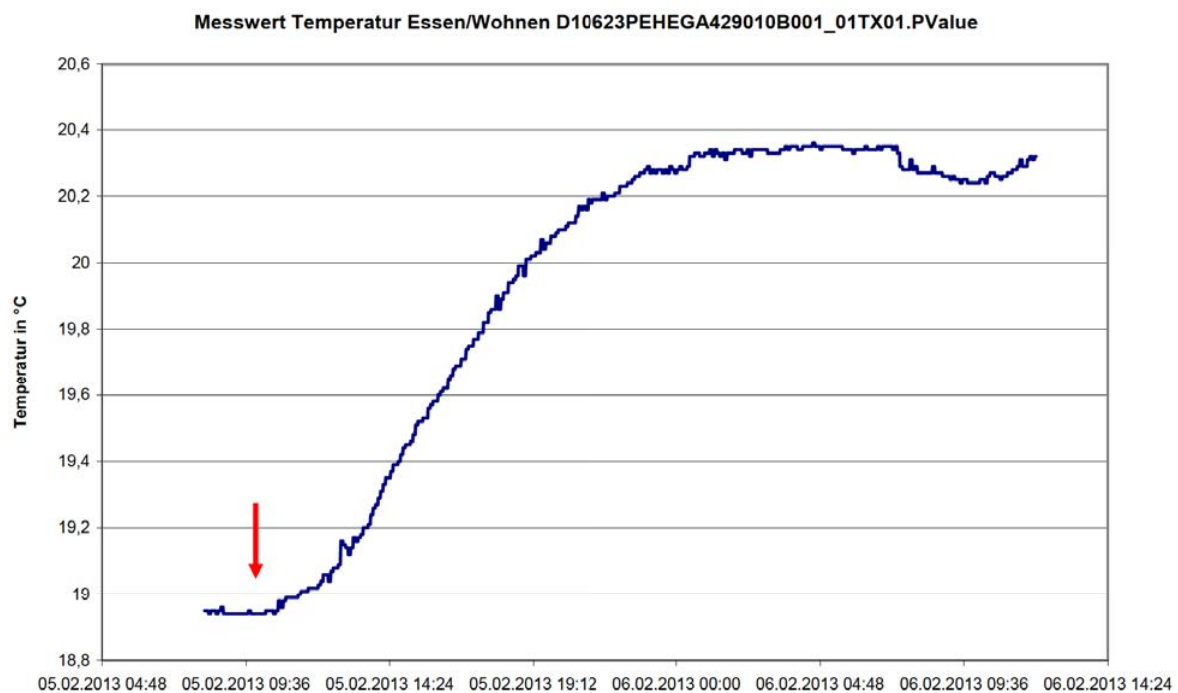


Bild 16: Aufzeichnung der Raumtemperatur Essen/Wohnen nach sprunghafter Verstellung des Heizungsaktors von 20 % auf 50 % zum markierten Zeitpunkt

Aus dem Kurvenverlauf wurde nach den Einstellregeln von Chien, Hrones, Reswick folgende Reglerparameter ermittelt:

- Proportionalbereich $X_p = 0,76 K$
- Nachstellzeit $T_N = 180 \text{ min}$

Am 20.02.2013 hat Fa. Systec folgende Einstellungen in das Gerät übernommen:

- Proportionalbereich $X_p = 1 \text{ K}$
- Nachstellzeit $T_N = 180 \text{ min}$

Grund für die Abweichung war der vom Hersteller vorgegebene Parameterbereich für X_p , dessen Untergrenze bei 1 K liegt.

Übrige Räume

Entsprechende Messungen in den übrigen Räumen wurden zwar durchgeführt, führten jedoch zu keinem Ergebnis. Gründe:

- Es gab keinen stationären Zustand, von dem aus man den Sprung hätte einprägen können.
- Die erzielten Kurvenverläufe waren nicht auswertbar im Hinblick auf Zeitkonstanten: Auch nach mehr als 6 Stunden waren die Temperaturen lediglich um ca. 0,5 K angestiegen. Ein Beharrungswert stellte sich erst nach 16 Stunden ein.
- Die erzielten Temperaturveränderungen waren fragwürdig. So stiegen z. B. die Temperaturen in beiden Kinderzimmern an, obwohl ein Sprung angeblich nur für den Raum Kind 1 aufgegeben wurde.

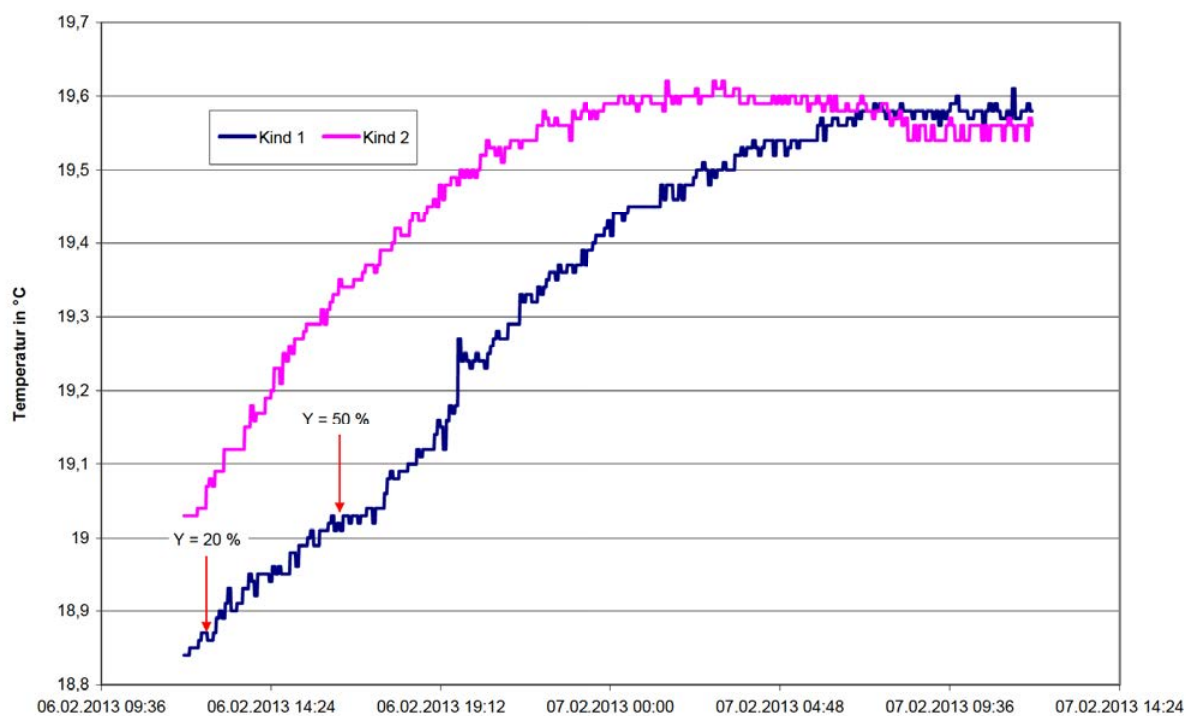


Bild 17: Aufzeichnung der Raumtemperaturen der Kinderzimmer nach sprunghafter Verstellung des Heizungsaktors Kind 1 von 20 % auf 50 % am 06.02.2013 um 17:16 Uhr

6 17.02.2013: Zwischenstand

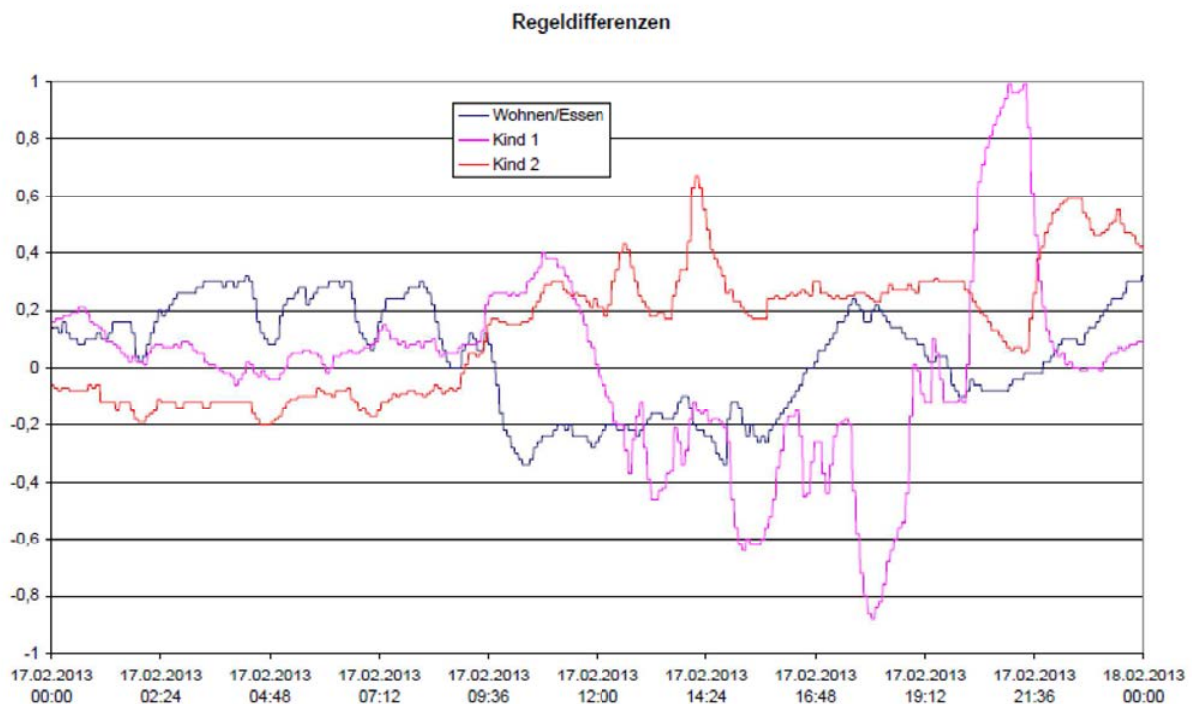


Bild 18: Regeldifferenzen in drei Räumen vor der Neueinstellung der Regelparameter im Bereich Essen/Wohnen

Befund:

- a) Regeldifferenzen im Bereich Wohnen/Essen innerhalb von $\pm 0,3$ K. Dieser Wert ist vor dem Hintergrund der dynamischen Eigenschaften einer FBH als sehr gut zu bezeichnen.
- b) Regeldifferenzen im Bereich des Kinderzimmers 1 innerhalb von $\pm 1,0$ K. Dieser Wert ist vor dem Hintergrund der dynamischen Eigenschaften einer FBH immer noch als gut zu bezeichnen, zumal die starken Ausschläge nach oben und unten eher auf plötzlich auftretende bzw. weggehende innere Lasten hindeuten.
- c) Regeldifferenzen im Bereich des Kinderzimmers 2 innerhalb von $-0,2/+0,65$ K. Dieser Wert ist vor dem Hintergrund der dynamischen Eigenschaften einer FBH als gut zu bezeichnen, zumal die starken Ausschläge vor allem nach oben eher auf plötzlich auftretende innere Lasten hindeuten.
- d) Das von früher bekannte Problem (Bild 5), dass der Regler auf einem anderen als dem registrierten Sollwert arbeitet, wurde behoben → Bild 19.
- e) Das früher beobachtete Phänomen (Bild 7) einer fast verschwindenden Wärmeübergabe trotz hohen Volumenstroms taucht nicht auf → Bild 22.

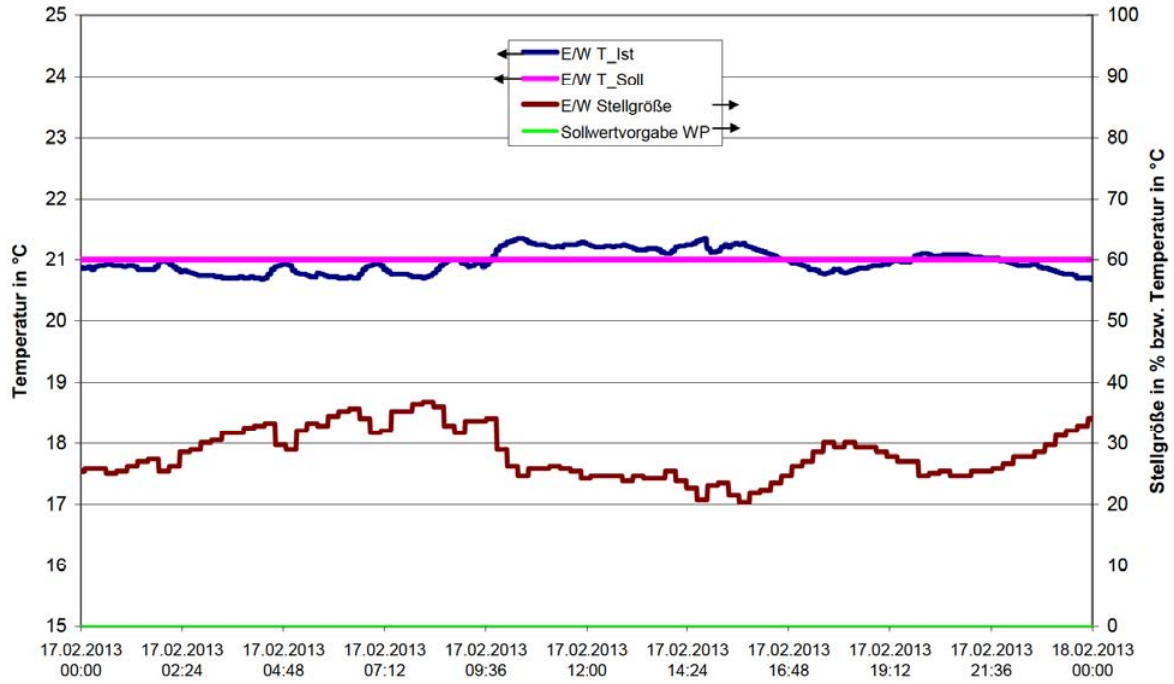


Bild 19: Die Raumregelkreisgrößen im Bereich Essen/Wohnen am Sonntag, 17.02.2013. Der in der Legende eingetragene Datenpunkt „Sollwertvorgabe WP“ war zu diesem Zeitpunkt noch nicht verfügbar. Über die inneren Wärmequellen (Personen, Geräte, Zusatzheizungen usw.) liegen keine Informationen vor.

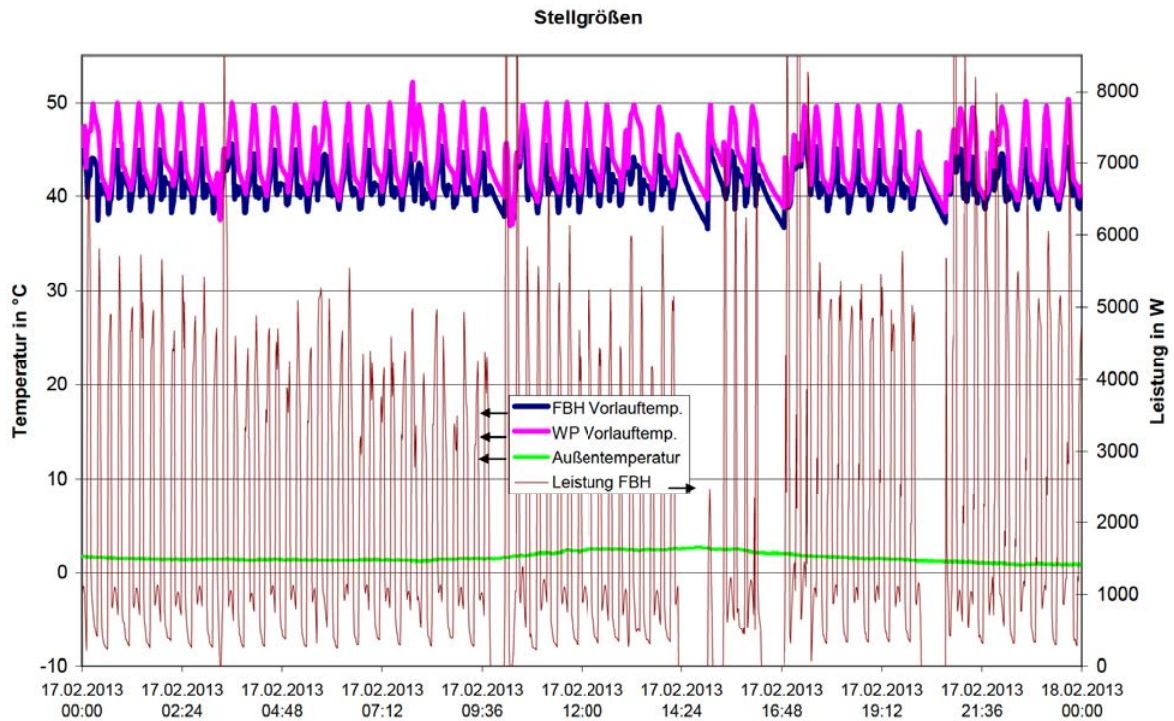


Bild 20: Heizkreis Fußbodenheizung: Vorlauftemperaturen vor und hinter dem Mischventil, Wärmeleistung, Außentemperatur

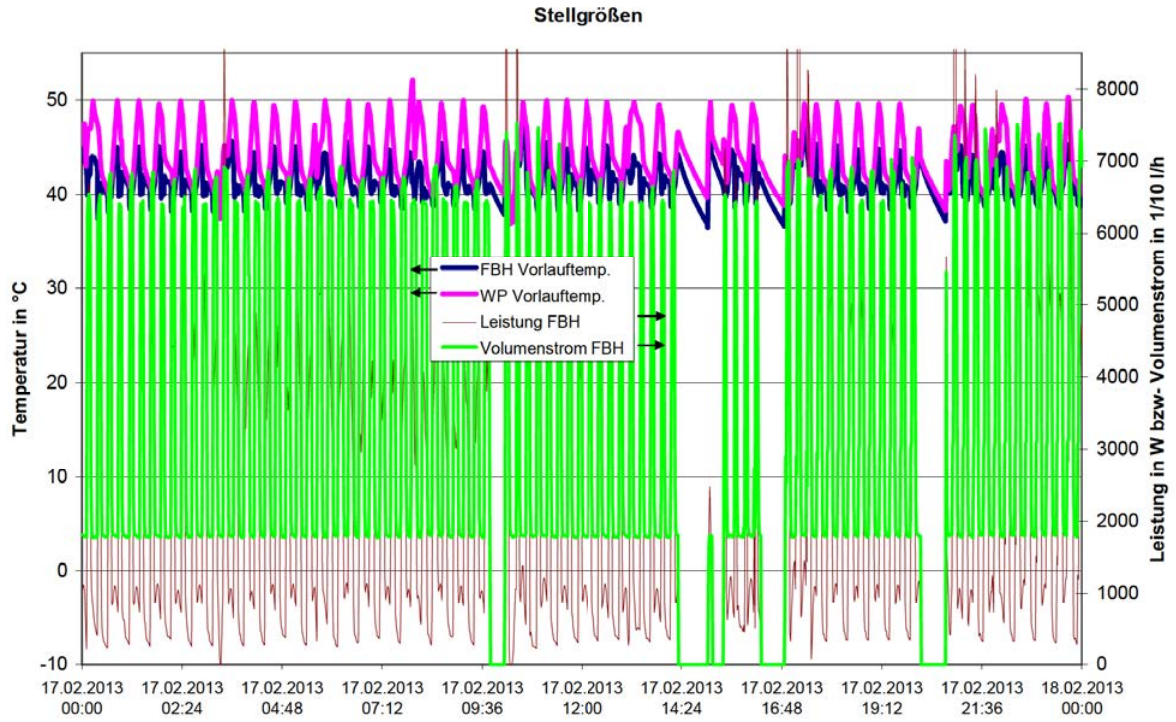


Bild 21: Wie Bild 20, jedoch mit dem Volumenstrom durch die Fußbodenheizung

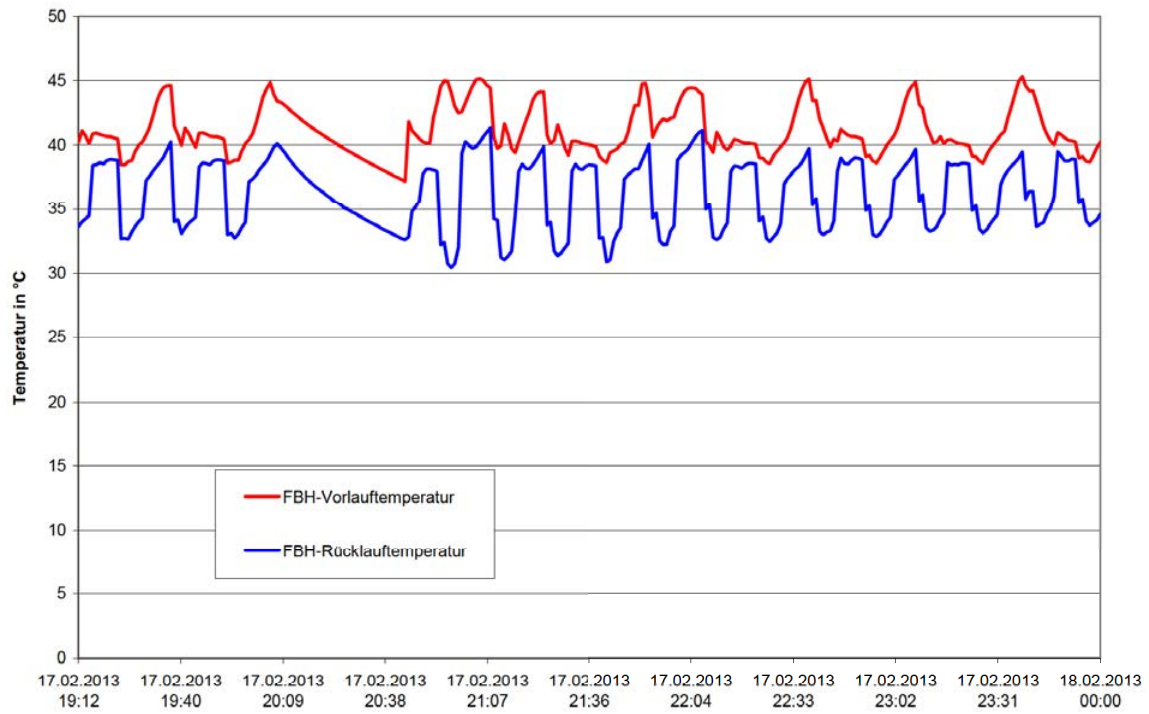


Bild 22: Vorlauf- und Rücklauftemperatur des FBH-Kreises

7 22.02.2013: Zwischenstand nach Optimierung der Regelparameter

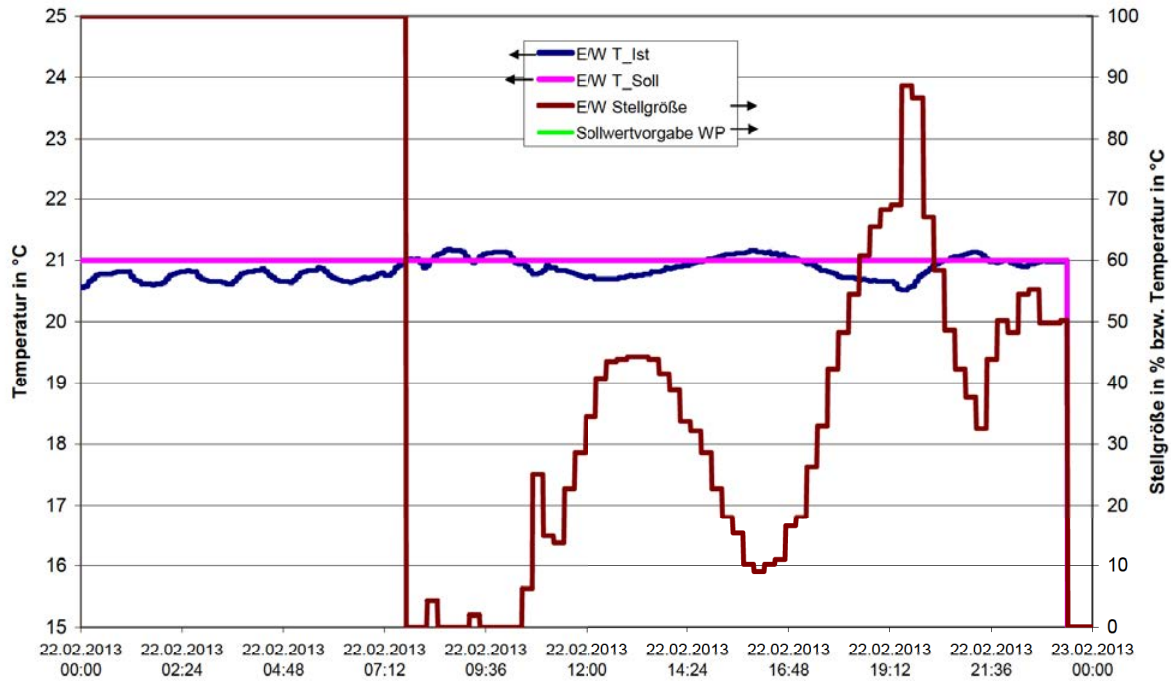


Bild 23: Die Raumregelkreisgrößen im Bereich Essen/Wohnen am Freitag, 22.02.2013. Der in der Legende eingetragene Datenpunkt „Sollwertvorgabe WP“ war zu diesem Zeitpunkt noch nicht verfügbar. Der Abbruch der Werte kurz vor Mitternacht beruht auf einem Übertragungsfehler. Über die inneren Wärmequellen (Personen, Geräte, Zusatzheizungen usw.) liegen keine Informationen vor.

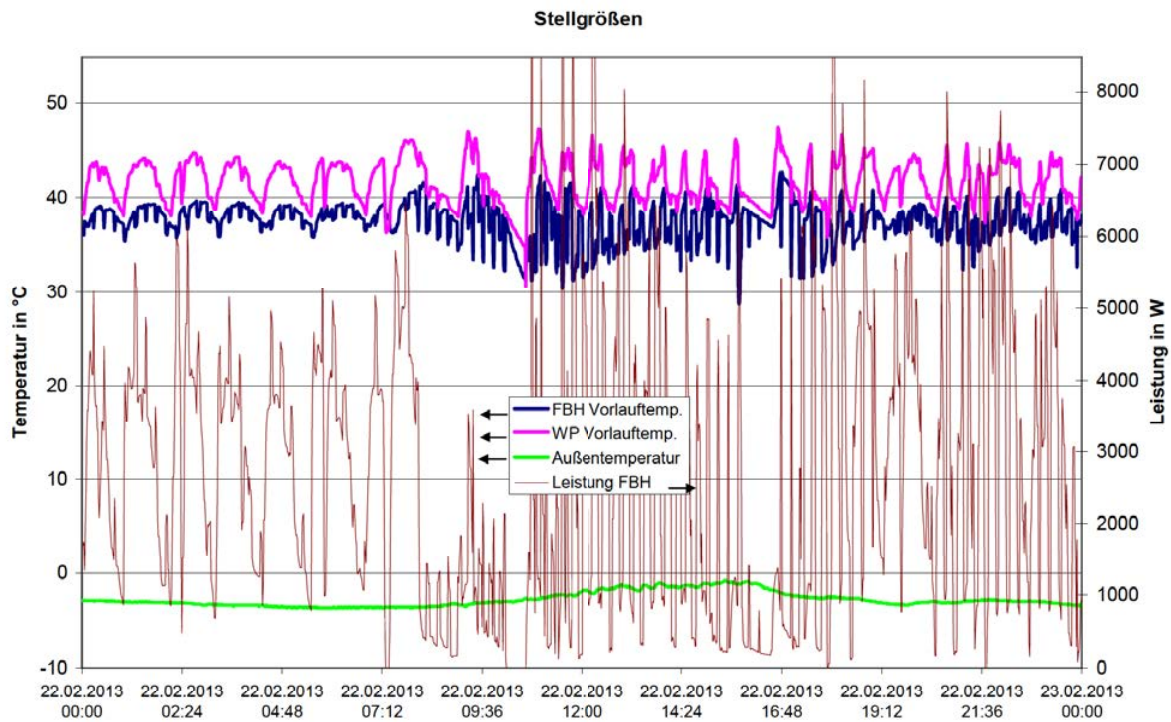


Bild 24: Heizkreis Fußbodenheizung: Vorlauftemperaturen vor und hinter dem Mischventil, Wärmeleistung, Außentemperatur

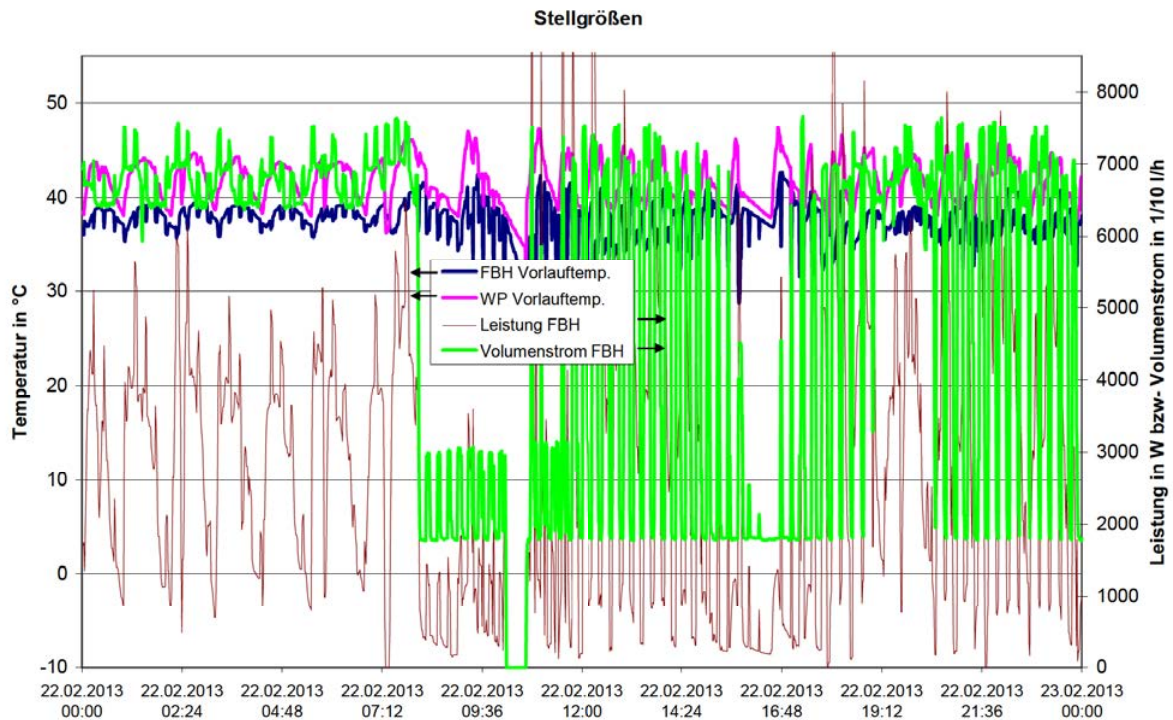


Bild 25: Wie Bild 24, jedoch mit dem Volumenstrom durch die Fußbodenheizung

Befund:

- a) Regeldifferenzen im Bereich Wohnen/Essen innerhalb von $-0,2/+0,5$ K. Dieser Wert ist vor dem Hintergrund der dynamischen Eigenschaften einer FBH als sehr gut zu bezeichnen → Bild 23.
- b) Der Regler reagiert aufgrund des kleinen Proportionalbereichs erwartungsgemäß heftiger als früher. Aufgrund der großen Verzögerungszeit der FBH hat dies jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Regelgüte.
- c) Abrupter Abfall des Stellsignals von 100 % auf 0 % gegen 07:45 Uhr, verursacht durch den parametrisierten Clipping-Modus des Reglers. Wie Bild 23 erkennen lässt, wirkt sich das Wegschalten der Heizleistung für immerhin 2,5 Stunden nur als leichte Delle mit einer Phasenverschiebung von ca. 3 Stunden auf die Raumtemperatur aus. Der Clipping Modus wurde nach dem 22.02.2013 auf Wunsch des Auftraggebers geändert in "100% halten wie erforderlich, danach zurückregeln".
- d) Das früher beobachtete Phänomen (Bild 7) von Einbrüchen der Wärmeleistung trotz fast konstant hohen Volumenstroms tritt wieder auf, wenn der Raumtemperaturregler im Erdgeschoss die FBH-Ventile zu 100 % über längere Zeit offen hält → Bild 25, ca. 19:00 bis 20:00 Uhr.

8 Führung der Rücklaufsolltemperatur der Wärmepumpe

Vom Beginn des Beobachtungszeitraums bis Anfang März 2013 war die Regelung der Rücklauftemperatur der WP auf einen festen Sollwert von 40°C eingestellt. Dies dürfte u. a. eine Erklärung für die beobachteten schlechten Arbeitszahlen der WP sein → Abschnitt 9.

Seit 01.03.2013 ist ein Regler auf Wago-Plattform aktiv, der über die Daten-Schnittstelle der WP den Sollwert des WP-internen Zweipunktreglers der Rücklauftemperatur im Bereich von 18 °C bis 45 °C stellt. Dieser Regler wird im Folgenden als „Wago-Regler“ bezeichnet.

Der von Anfang an auch im Bereich Essen/Wohnen vorhandene Raumtemperaturregler auf Basis KNX wird im Folgenden als „KNX-Regler“ bezeichnet.

Die Regelstruktur ist in Bild 26 dargestellt.

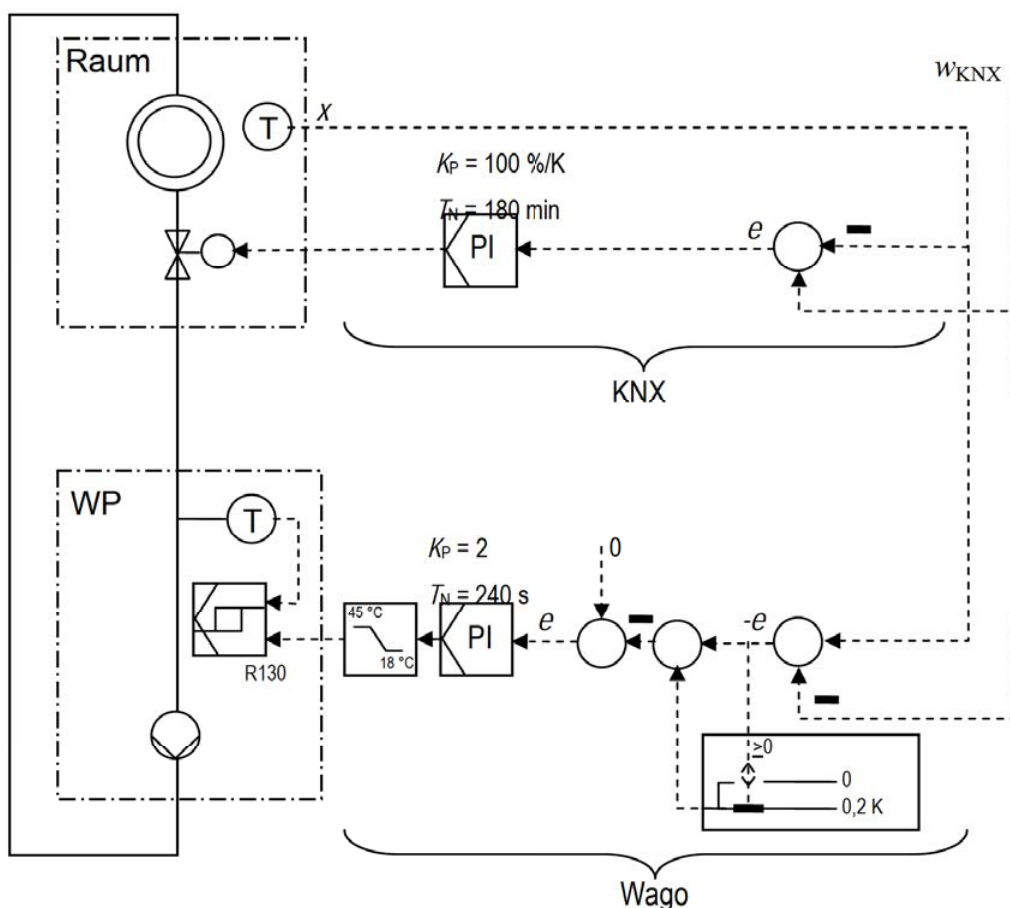


Bild 26: Regelstruktur seit dem 01.03.2013

Bei dem Wago-Regler handelt es sich nicht um eine bedarfsabhängige Regelung im Bereich E/W, sondern um eine Raumtemperaturregelung, die parallel zum KNX-Regler arbeitet. Beide Regler stellen die dem Raum zugeführte Wärmeleistung: Der Wago-Regler über die Temperatur, der KNX-Regler über den Volumenstrom des Heizungswassers.

Befund:

- a) Tendenziell größere Schwankungsbreiten (-1/+1,2 K, -1,8/+2 K, -1,2+0,6 K)
- b) Relativ unstetiges Verhalten der Stellgrößen → Bild 27, Bild 28, Bild 29

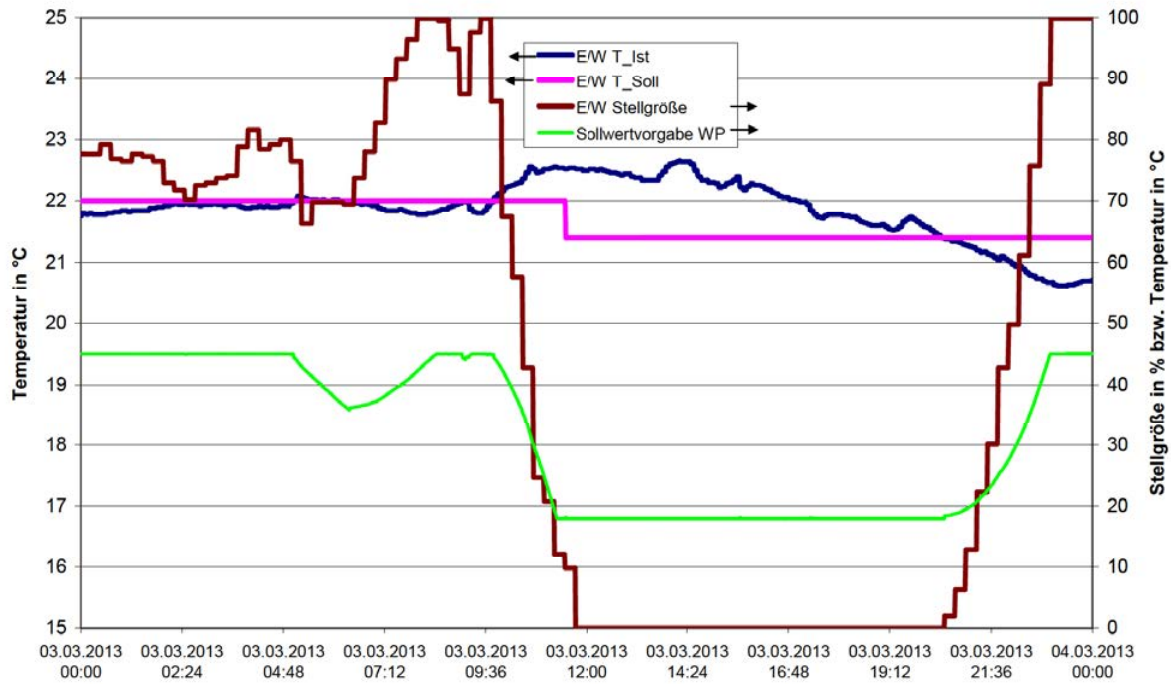


Bild 27: Die Raumregelkreisgrößen im Bereich Essen/Wohnen am Sonntag, 03.03.2013. Über die inneren Wärmequellen (Personen, Geräte, Zusatzheizungen usw.) liegen keine Informationen vor.

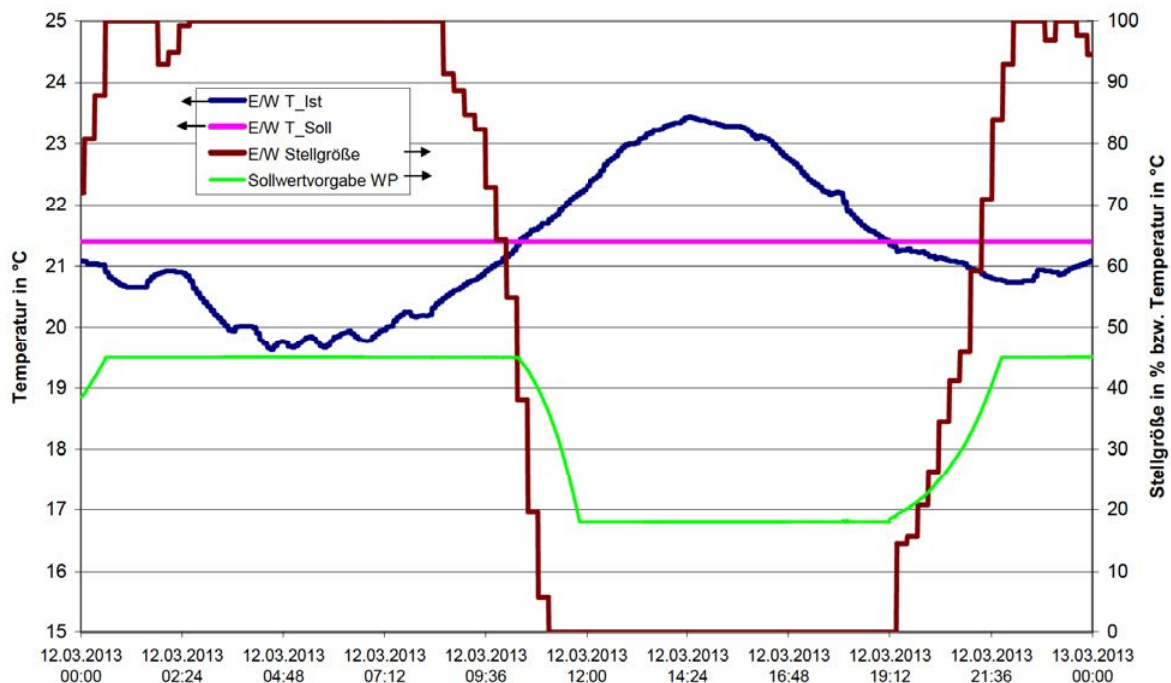


Bild 28: Die Raumregelkreisgrößen im Bereich Essen/Wohnen am Dienstag, 12.03.2013. Über die inneren Wärmequellen (Personen, Geräte, Zusatzheizungen usw.) liegen keine Informationen vor.

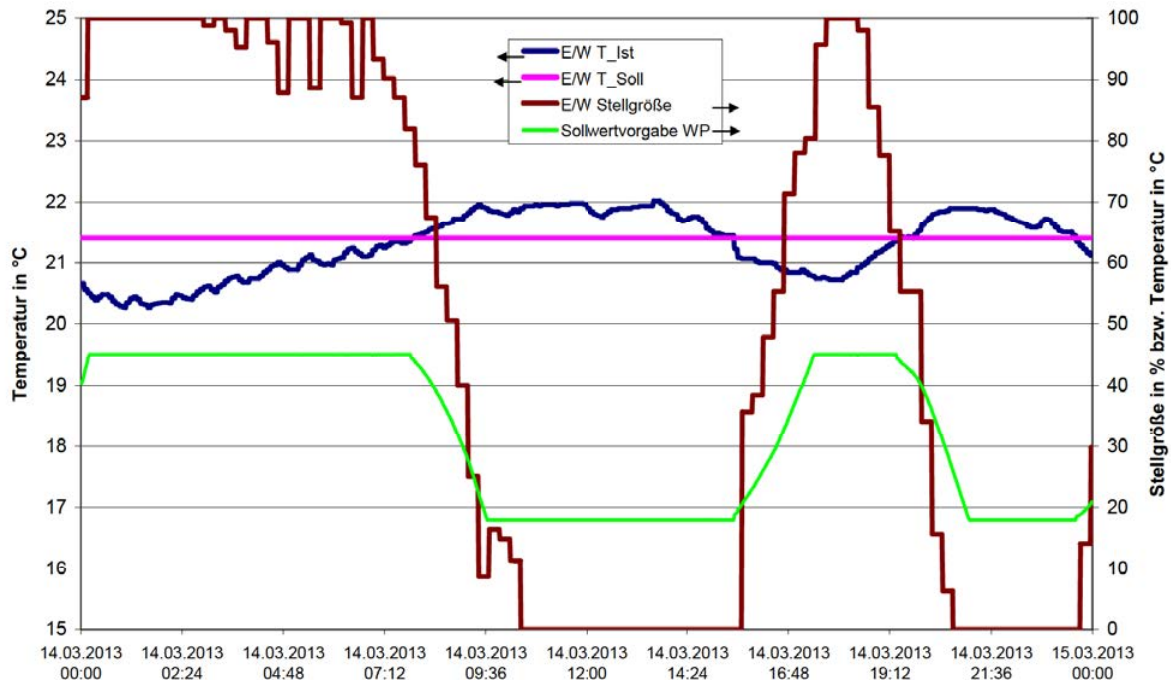


Bild 29: Die Raumregelkreisgrößen im Bereich Essen/Wohnen am Donnerstag, 14.03.2013. Über die inneren Wärmequellen (Personen, Geräte, Zusatzheizungen usw.) liegen keine Informationen vor.

Fazit:

Die mit dieser Regelstruktur erzielten Ergebnisse dokumentieren keine Verbesserung des Regelverhaltens gegenüber der vorherigen Regelung. Die Regeldifferenzen sind eher größer geworden. De facto gleicht das Verhalten dem einer Zweipunktregelung, die aus mehrstündigen Aufheizphasen (Ventilöffnung 100 %, Rücklauftemperatur 45 °C) und ähnlich langen Abkühlphasen (Ventile geschlossen, Rücklauftemperatur 18°C) besteht. Andererseits zeigen diese Ergebnisse jedoch auch, wie robust das System aufgrund der großen Zeitkonstanten der FBH ist. Ein faktisches Abschalten der Wärmepumpe über mehrere Stunden ohne nennenswerte Komforteinbußen ist ein erheblicher Beitrag zur Energieeinsparung.

8.1 Regelungstechnische Ansätze zur Verbesserung der Arbeitszahl

Grundlage der folgenden Empfehlungen ist die Tatsache, dass es sich im vorliegenden Fall um ein Einfamilienhaus handelt, dessen Nutzung durch den Wohn-/Essbereich im Erdgeschoss dominiert wird. Auch wurde berichtet, dass der Betrieb der RLT-Anlage in der Praxis eine untergeordnete Bedeutung besitzt.

Eine Verbesserung der WP-Regelung muss eine Vergrößerung der Arbeitszahl zum Ziel haben. Welches von mehreren möglichen Verfahren im Spannungsfeld zwischen Komfort und Energieverbrauch das Optimum darstellt, ist mit vertretbarem Aufwand nicht vorherzusagen.

Variante 1

Raumtemperaturregelung (Referenzraum)

Die Regelungsvariante, die vermutlich zum geringsten Energieverbrauch führen wird, ist eine Regelung der Raumtemperatur im Bereich Essen/Wohnen, deren Stellgröße direkt die Leistung (Rücklauf-temperatur) der WP ist. Eine solche Fahrweise ist in den Optionen des Wärmepumpen-Managers vorgesehen. Der Bereich Essen/Wohnen wird so zum Referenzraum. Dies kann zur Folge haben, dass bei geringem Wärmebedarf im Referenzraum das Obergeschoss unterversorgt ist. Andererseits haben die vergangenen Monate gezeigt, dass eine thermische Kopplung zwischen Ober- und Erdgeschoss durchaus vorhanden ist, so dass die Gefahr, dass es im OG zu kalt wird, eher gering erscheint. Auch die RLT-Anlage muss dann mit dem Vorlauftemperaturniveau „leben“, das ihr die Raumtemperaturregelung im EG vorgibt. Ein Vorheizen der Luft dürfte in der Regel jedoch immer möglich sein.

Bei einer direkten Raumtemperaturregelung im EG würden alle inneren und äußeren Störgrößen berücksichtigt. Die Frage nach einer „bedarfsabhängigen“ Fahrweise stellt sich nicht weiter, da es nur eine Stellgröße – die Leistung des Wärmeerzeugers – gibt.

Folgende Umbaumaßnahmen sind erforderlich:

- Deaktivieren der „Vorregelung“ für das FBH-Netz.
- Deaktivieren der vorhandenen Raumtemperaturregelung im Bereich Essen/Wohnen. Die übrigen Raumtemperaturregelungen bleiben aktiv.
- Installation eines zusätzlichen Raumfühlers mit Verbindung zum WP-Manager. (Alternative aufwändigere Vorgehensweise, die jedoch mit der vorhandenen Installation auskommt: Implementation eines Temperaturreglers auf Wago-Plattform; Regelgröße ist die per KNX erfasste Raumtemperatur, Stellgröße ist der Sollwert der Rücklauf-temperatur für die WP)
- Umparametrierung des WP-Managers

Variante 2

Außentemperaturgeführte Rücklauf-temperaturregelung der WP mit nachgelagerten Temperaturregelungen in den Einzelräumen.

Diese Variante lässt sich mit wenigen Parameteränderungen am WP-Manager relativ schnell realisieren.

Nachteil gegenüber Variante 1: Eine weitere Stellgröße neben der Heizwassertemperatur – der Volumenstrom – kann die Energieeffizienz beeinträchtigen durch höhere thermische Verluste bzw. höhere hydraulische Verluste im Verteilnetz, vor allem aber durch einen ineffizienten WP-Betrieb infolge höherer Rücklauf-temperatur als in Anbetracht des aktuellen Bedarfs erforderlich.

Vorteil gegenüber Variante 1: Auch wenn im EG kein Wärmebedarf besteht, steht dennoch Wärme für die Versorgung der Räume im OG zur Verfügung.

Folgende Umbaumaßnahmen sind erforderlich:

- Deaktivieren der „Vorregelung“ für das FBH-Netz.
- Umparametrierung des WP-Managers

Variante 3

Bedarfsgeführte Einstellung der WP-Rücklauftemperatur mit dem Ziel der weitestmöglichen Absenkung durch Maximierung des Volumenstroms

Diese Variante beseitigt den Nachteil von Variante 2 gegenüber Variante 1, indem sie die thermischen bzw. hydraulischen Verluste im Leitungsnetz minimiert und vor allem die Rücklauftemperatur minimiert.

Die Strategie ist in Anhang 1 dargestellt. Grundsätzliche Idee ist eine Absenkung des Temperaturniveaus des Heizmediums so weit, bis ein Ventil gerade mit einem Öffnungsgrad von 100 % einen geforderten Wärmebedarf realisieren kann.

Wenn - wie hier – mehrere Räume zu versorgen sind, ist die v. g. Strategie zu erweitern: Absenkung des Temperaturniveaus des Heizmediums so weit, bis das am weitesten geöffnete Ventil gerade mit einem Öffnungsgrad von 100 % einen geforderten Wärmebedarf realisieren kann.

Es muss also eine Möglichkeit bestehen, den Öffnungsgrad der FBH-Ventile zu messen. Dieser Wert steht indirekt auf dem KNX-Netzwerk zur Verfügung, allerdings nur als Reglerausgangssignal und nur im Takt der Periodendauer der Pulsweitenmodulation, hier also 15 min. Dies führt dazu, dass sich das für die Errechnung der WP-Solltemperatur verwendete Signal alle 15 min sprunghaft ändert. Um dennoch zu einer möglichst stetigen Einstellung der WP-Sollwerttemperatur zu kommen, ist daher die Vorschaltung eines Tiefpassfilters erforderlich.

Folgende Umbaumaßnahmen sind erforderlich:

- Deaktivieren der „Vorregelung“ für das FBH-Netz.
- Erstellung eines entsprechenden Programms auf Wago-Plattform

8.2 Empfehlung

Es wird empfohlen, die v. g. Variante 2 „Außentemperaturgeführte Rücklauftemperaturregelung der WP mit unterlagerten Temperaturregelungen in den Einzelräumen“ umzusetzen. Sie verspricht – bei geeigneter Einstellung der Heizkurve und der Reglerparameter in den Räumen – eine deutliche Erhöhung der Arbeitszahl.

Die Frage, ob sich durch eine bedarfsabhängige Komponente zusätzliche Effizienzpotenziale erschließen lassen, wird letztlich stark von der Nutzung des Gebäudes abhängen. Sofern die Erfahrungen mit Variante 2 entsprechende Hinweise ergeben, sollte nachfolgend Variante 1 realisiert werden, die den tatsächlichen Wärmebedarf (im Referenzraum) vollumfänglich berücksichtigt. Erst wenn sich dabei Probleme mit der Versorgung der Räume im OG ergeben, ist die Umsetzung von Variante 3 anzuraten.

9 Arbeitszahl der Wärmepumpe

Eine Übersicht über alle erfassten Wärmemengen sowie den elektrischen Energieverbrauch der WP für den Zeitraum 02.02.2013 bis 14.03.2013 zeigt die Tabelle im Anhang 2.

Als Gesamtwärmemenge wurde die Summe der von den folgenden drei Zählern erfassten Werte zugrunde gelegt:

- 421001P020_01XZ01.Rohwert(Heizkreis 1 RLT Arbeit)
- 421001P020_02XZ01.Rohwert(Heizkreis 2 Fussbodenheizung Arbeit)
- 421001P020_03XZ01.Rohwert(Heizkreis 3 WWB Arbeit)

Die so errechnete Gesamtwärmemenge am Tag unterscheidet sich um bis zu 15 kWh vom Wert, den der Datenpunkt

- GA421001P020_04XZ01.Rohwert(WP Arbeit)

enthält. Der Grund dafür ist vermutlich die Anordnung des dem Zähler zugeordneten Vorlauftemperaturfühlers. Lt. Anlagenschema sitzt dieser in der Leitung zu den beiden Heizkreisen, die jedoch nicht durchströmt wird, wenn der Brauchwasserspeicher geladen wird. In diesen Phasen dürfte der Zähler fehlerhafte Verbrauchswerte ermitteln.

Der elektrische Energieverbrauch der WP wurde dem Datenpunkt

- 421001P009_04EZ01.Rohwert(WP Energieverbrauch Gesamt)

entnommen.

Befund:

- a) Die Tagesarbeitszahlen der WP variieren zwischen 2 und 2,45 → Bild 30. Grund für diese schlechten Werte ist vermutlich die Fahrweise der WP mit konstant hoher Rücklauftemperatur → Abschnitt 8.

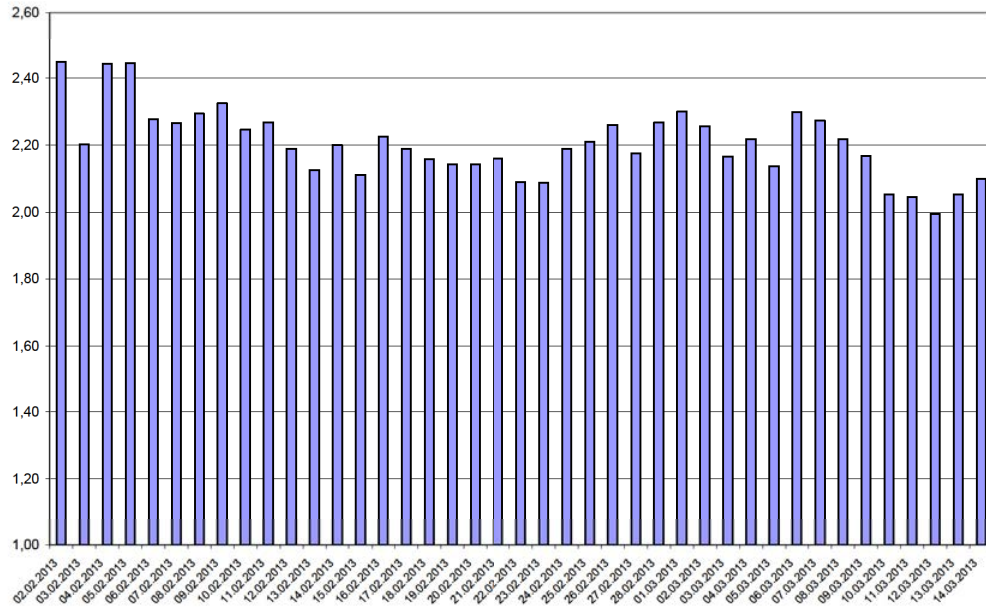


Bild 30: Tagesarbeitszahlen der WP

- b) Der Energieverbrauch des Gebäudes profitiert von der in Abschnitt 8 beschriebenen Regelstruktur, die zu einem praktischen Abschalten der WP über längere Zeiträume sorgt → Bild 31.

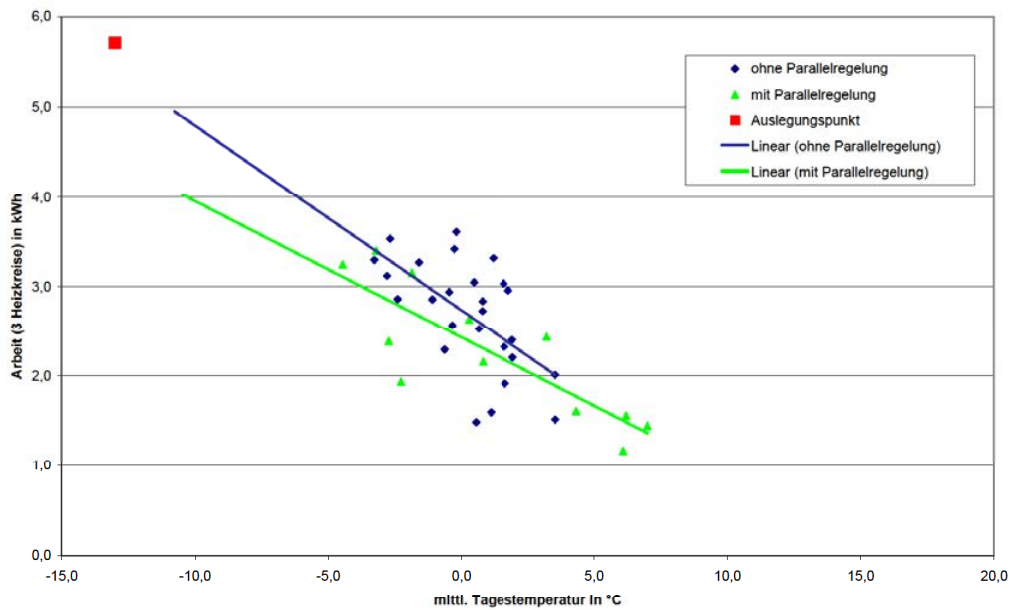
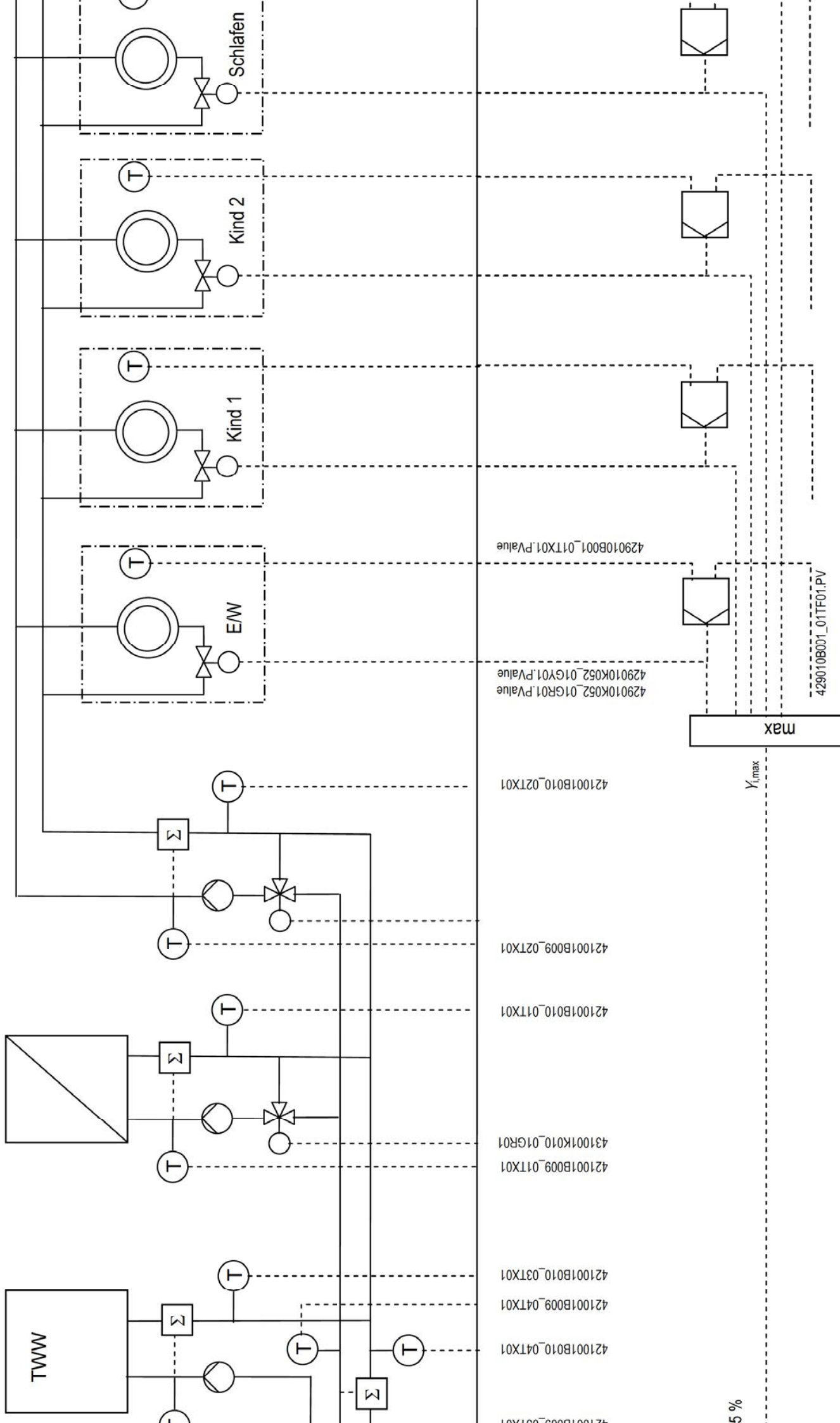


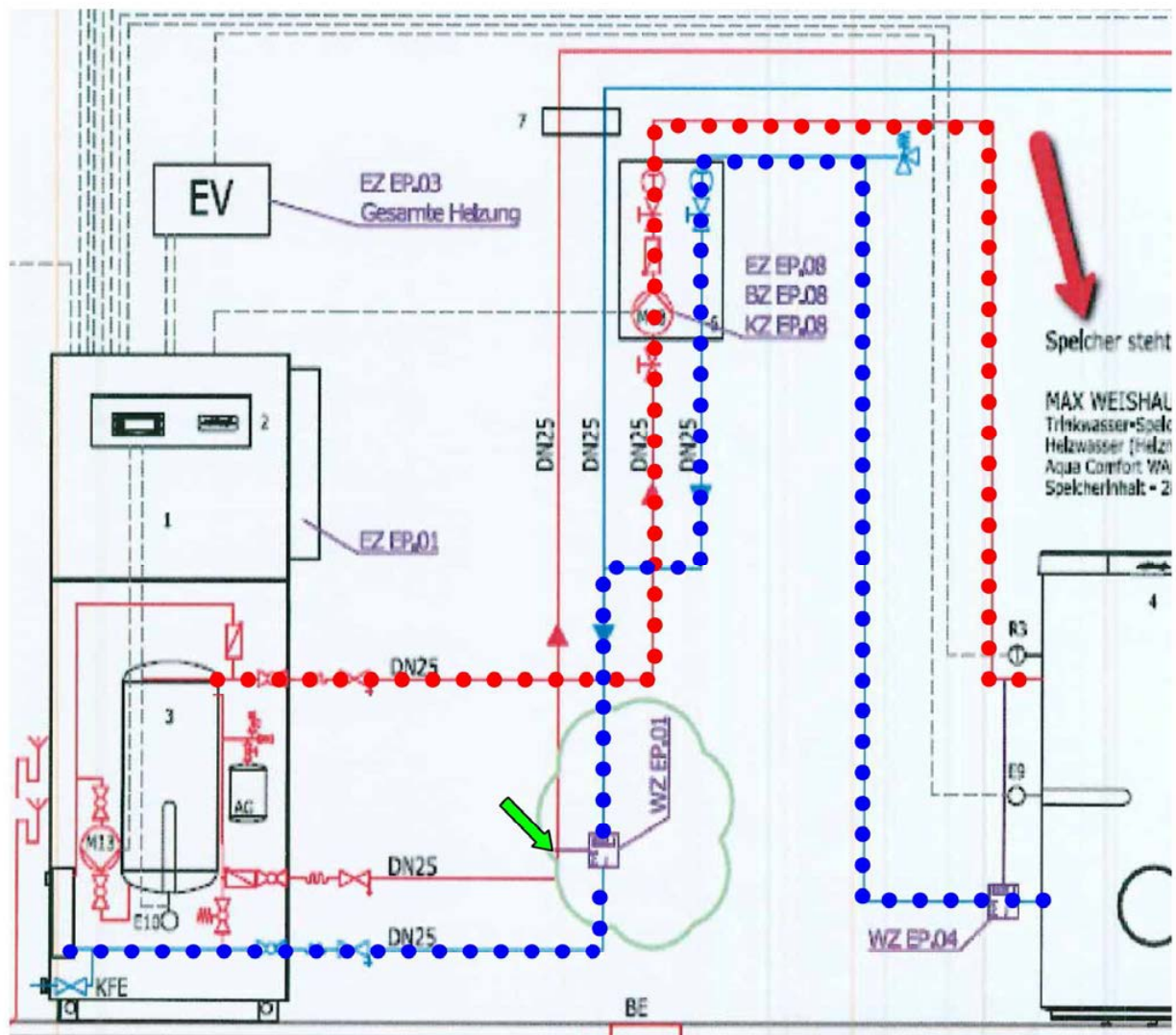
Bild 31: Energiesignatur des Gebäudes für den Zeitraum 02.02.2013 bis 14.03.2013. Obwohl die Anzahl der Punkte aus der Zeit nach Einführung der Parallelregelung noch relativ gering ist, deutet sich bereits eine Verringerung des Heizwärmebedarfs an.



5%

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
jeweils 00:00:00 Uhr	D10623PEHE GA421001P020_01XZ01.Rohwe	rt Heizkreis 1 RL.T Arbeit	D10623PEHEGA421001P020_0 2XZ01.Rohwert	Heizkreis 2 Fussbodenheizung Arbeit	D10623PEHE GA421001P020_03XZ01.Rohwe	rt Heizkreis 3 WWB Arbeit	Summe HK1, 2 und 3	mittl. Tagesleistung aus Spalte (8)	Summe HK1 und 2	D10623PEHE GA421001P020_04XZ01.Rohwe	rt WP Arbeit	D10623PEHE GA489001B004_01TX01.Pvalue	Weiterstation Außentemperatur	D10623PEHE GA421001P009_04EZ01.Rohwe	rt WP Energieverbrauch Gesamt	WP Arbeitszahl
	Stand	Verbr	Stand	Verbr	Stand	Verbr	Verbr		Verbr	Stand	Verbr	Mittelw.	Stand	Verbr		
	kWh		kWh		kWh		kWh	kW	kWh	kWh		°C	kWh			
02.02.2013 00:00	920,0	2,4	10663,0	53,4	2022,7	0,0	55,8	2,3	55,8	10006,9	58,4	1,6	6712,0	22,8	2,45	
03.02.2013 00:00	922,4	0,0	10716,4	35,7	2022,7	0,0	35,7	1,5	35,7	10065,3	38,7	0,6	6734,8	16,2	2,20	
04.02.2013 00:00	922,4	0,0	10752,1	36,4	2022,7	0,0	36,4	1,5	36,4	10104,0	39,0	3,5	6751,0	14,9	2,44	
05.02.2013 00:00	922,4	0,1	10788,5	46,3	2022,7	1,9	48,3	2,0	46,4	10143,0	49,1	3,5	6765,8	19,8	2,45	
06.02.2013 00:00	922,5	0,0	10834,8	46,0	2024,6	0,0	46,0	1,9	46,0	10192,1	48,9	1,6	6785,6	20,2	2,28	
07.02.2013 00:00	922,5	0,0	10880,8	38,3	2024,6	0,0	38,3	1,8	38,3	10241,0	41,0	1,1	6805,8	16,9	2,27	
08.02.2013 00:00	922,5	0,0	10919,1	57,4	2024,6	4,2	61,6	2,8	57,4	10282,0	60,4	-0,3	6822,7	26,8	2,29	
09.02.2013 00:00	922,5	0,0	10976,5	55,1	2028,8	0,0	55,1	2,3	55,1	10342,4	58,0	-0,6	6849,5	23,7	2,32	
10.02.2013 00:00	922,5	5,0	11031,6	58,2	2028,8	16,0	79,2	3,3	63,2	10400,4	66,1	-3,3	6873,3	35,3	2,25	
11.02.2013 00:00	927,5	17,6	11089,8	58,8	2044,8	2,1	78,5	3,3	76,4	10466,5	79,1	-1,6	6908,5	34,6	2,27	
12.02.2013 00:00	945,1	21,1	11148,6	53,0	2046,9	8,0	82,1	3,4	74,1	10545,6	76,9	-0,3	6943,1	37,5	2,19	
13.02.2013 00:00	966,2	13,5	11201,6	54,5	2054,9	2,6	70,6	2,9	68,0	10622,5	70,8	-0,5	6980,6	33,2	2,13	
14.02.2013 00:00	979,7	10,0	11256,1	58,8	2057,5	17,9	86,7	3,8	68,8	10693,3	71,5	-0,2	7013,8	39,4	2,20	
15.02.2013 00:00	989,7	6,6	11314,9	51,5	2075,4	2,6	60,7	2,5	58,1	10764,8	61,2	0,7	7053,2	28,8	2,11	
16.02.2013 00:00	996,3	8,6	11366,4	46,7	2078,0	15,7	71,0	3,0	55,3	10826,0	57,9	1,8	7082,0	31,9	2,23	
17.02.2013 00:00	1004,9	8,9	11413,1	47,5	2093,7	16,4	72,8	3,0	56,4	10883,9	59,0	1,6	7113,9	33,2	2,19	
18.02.2013 00:00	1013,8	6,3	11460,6	57,0	2110,1	2,2	65,5	2,7	63,3	10942,9	66,3	0,8	7147,1	30,4	2,16	
19.02.2013 00:00	1020,1	7,2	11517,6	53,5	2112,3	12,5	73,2	3,1	60,7	11009,2	63,5	0,5	7177,5	34,1	2,14	
20.02.2013 00:00	1027,3	7,7	11571,1	47,1	2124,8	13,8	68,6	2,9	54,8	11072,7	57,5	-1,1	7211,6	32,0	2,14	
21.02.2013 00:00	1035,0	10,0	11618,2	62,0	2138,6	12,8	84,8	3,5	72,0	11130,2	74,9	-2,7	7243,6	39,3	2,16	
22.02.2013 00:00	1045,0	9,8	11680,2	62,5	2151,4	2,6	74,9	3,1	72,3	11205,1	75,4	-2,8	7282,9	35,8	2,09	
23.02.2013 00:00	1054,8	14,4	11742,7	54,3	2154,0	0,0	68,7	2,9	68,7	11280,5	71,8	-2,4	7318,7	32,9	2,09	
24.02.2013 00:00	1069,2	7,5	11797,0	53,3	2154,0	7,3	68,1	2,8	60,8	11352,3	63,7	0,8	7351,6	31,1	2,19	
25.02.2013 00:00	1076,7	6,3	11850,3	48,5	2161,3	2,9	57,7	2,4	54,8	11416,0	57,7	1,9	7382,7	26,1	2,21	
26.02.2013 00:00	1083,0	4,9	11898,8	64,4	2164,2	10,4	79,7	3,3	69,3	11473,7	72,4	1,2	7408,8	35,2	2,26	
27.02.2013 00:00	1087,9	3,9	11963,2	46,8	2174,6	2,3	53,0	2,2	50,7	11546,1	53,7	1,9	7444,0	24,4	2,18	
28.02.2013 00:00	1091,8	3,7	12010,0	40,3	2176,9	12,8	56,8	2,4	44,0	11599,8	46,6	2,9	7468,4	25,0	2,27	
01.03.2013 00:00	1095,5	3,9	12050,3	29,0	2189,7	14,6	47,5	2,0	32,9	11646,4	35,2	3,1	7493,5	20,6	2,30	
02.03.2013 00:00	1099,4	5,6	12079,3	70,8	2204,3	0,0	76,4	3,2	76,4	11681,6	79,5	2,4	7514,1	33,9	2,26	
03.03.2013 00:00	1105,0	1,6	12150,1	39,6	2204,3	17,3	58,5	2,4	41,2	11761,1	43,7	3,2	7547,9	27,0	2,17	
04.03.2013 00:00	1106,6	4,1	12189,7	22,6	2221,6	12,0	38,7	1,8	26,7	11804,8	28,6	4,3	7574,9	17,5	2,22	
05.03.2013 00:00	1110,7	1,2	12212,3	19,5	2233,6	7,3	28,0	1,2	20,7	11833,4	22,9	6,1	7592,4	13,1	2,14	
06.03.2013 00:00	1111,9	1,3	12231,8	21,0	2240,9	12,4	34,7	1,4	22,3	11856,3	24,6	7,0	7605,5	15,1	2,30	
07.03.2013 00:00	1113,2	0,6	12252,8	29,9	2253,3	6,9	37,4	1,8	30,5	11880,9	32,8	6,2	7620,6	16,5	2,27	
08.03.2013 00:00	1113,8	2,1	12282,7	49,7	2260,2	0,0	51,8	2,2	51,8	11913,7	54,7	0,8	7637,1	23,4	2,22	
09.03.2013 00:00	1115,9	7,6	12332,4	53,0	2260,2	2,6	63,2	2,8	60,6	11968,4	63,1	0,3	7660,4	29,1	2,17	
10.03.2013 00:00	1123,5	8,0	12385,4	47,9	2262,8	1,4	57,3	2,4	55,9	12031,5	58,3	-2,7	7689,6	27,9	2,05	
11.03.2013 00:00	1131,5	11,5	12433,3	59,6	2264,2	6,8	77,9	3,2	71,1	12089,8	73,5	-4,5	7717,5	38,1	2,04	
12.03.2013 00:00	1143,0	8,2	12492,9	58,3	2271	15,2	81,7	3,4	66,5	12163,3	69,2	-3,2	7755,5	41,0	2,00	
13.03.2013 00:00	1151,2	7,0	12551,2	31,5	2286,2	7,9	46,4	1,9	38,5	12232,5	40,2	-2,3	7796,5	22,6	2,05	
14.03.2013 00:00	1158,2	10,0	12582,7	49,8	2294,1	15,9	75,7	3,2	59,8	12272,7	61,8	-1,9	7819,1	36,1	2,10	
15.03.2013 00:00	1168,2		12632,5		2310					12334,5			7855,2			

Implementierung
Parallelregelung



Auszug aus dem vorliegenden Anlagenschema. Der Weg des Wassers beim Laden des Speichers ist markiert (●●●●). Die Temperatur am externen Fühler (Pfeil) des Wärmengenzählers WZ EP.01 ist in diesem Moment undefiniert, die gemessene Temperaturdifferenz ist nicht die zwischen Vor- und Rücklauf des gerade wärmeübertragenden Mediums.

Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität, Analyse der Gebäudeheizung und Vorschläge zur Systemoptimierung

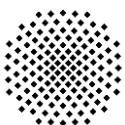
Bericht

Forschungsprojekt gefördert durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

Aktenzeichen: 10.08.81-13.02

Projektleiter:
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

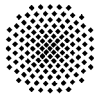
Bearbeiter:
Dipl.-Ing. Jörg Arold





Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Beschreibung des Bestands	2
2.1	Anlagenbestand	2
2.2	Probleme beim Anlagenbetrieb	2
2.2.1	Auswirkungen des reduzierten Massenstroms auf die Heizleistung.....	3
2.2.2	Auswirkung der erhöhten Vorlauftemperatur auf die Heizleistung	5
2.2.3	Einfluss der offenen Bauweise des Gebäudes	6
3	Verbesserungsvorschläge	6
3.1	Einbau einer Glastür im EG	7
3.2	Einstellen der ursprünglichen Vorlauftemperatur	7
3.3	Einbau einer leistungsgeregelten Wärmepumpe	8
4	Zusammenfassung	12
5	Literaturverzeichnis	13



1 Einleitung

Es werden der Anlagenbestand und -betrieb der Heizungstechnik im Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität in Berlin (E+-Haus) bewertet und Verbesserungsvorschläge erarbeitet. Das Gebäude weist im Vergleich zur Planung einen deutlich höheren Stromverbrauch zur Wärmebereitstellung auf. Die zur Wärmeerzeugung eingesetzte Wärmepumpe erreicht nur eine niedrige Jahresarbeitszahl (JAZ) von 2,3 statt wie geplant 3,5 [1]. Dies hat zur Folge, dass der Stromverbrauch der Wärmepumpe ca. das 2,5-fache des im Vorfeld prognostizierten Wertes erreicht [1].

Zusätzlich zu den Quellen aus dem Literaturverzeichnis stehen noch folgende Unterlagen zur Verfügung:

- Inbetriebnahmeprotokoll der Weishaupt Wärmepumpe vom 11.11.2011
- Anlagenschema der Heizungsanlage im E+-Haus vom 12.12.2011
- Strangschema der Fußbodenheizung und der Verteilung vom 12.12.2011
- Vermerk vom 26.02.2012

Außerdem fand am 17.07.2013 ein Ortstermin im Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität in der Fasanenstraße in Berlin statt.

2 Beschreibung des Bestands

2.1 Anlagenbestand

Zur Wärmeerzeugung wird eine Luft/Wasser-Wärmepumpe (WP) mit unregelmäßigem Verdichter eingesetzt. Bei der Wärmepumpe handelt es sich um ein Kompaktgerät zur Innenaufstellung. Die Nutzenübergabe der Raumheizung erfolgt mit einer Fußbodenheizung. Zusätzlich ist die Wohnungslüftungsanlage mit einem Nacherwärmer ausgestattet, welcher ebenfalls von der Wärmepumpe versorgt wird. Dieser erwärmt die durch den Wärmerückgewinner vortemperierte Außenluft.

Mit der Wärmepumpe wird außerdem das Trinkwasser erwärmt. Für die TW-Erwärmung hat die WP einen separaten Vorlaufanschluss. Für das Trinkwarmwasser ist ein 300l-Speicher mit integriertem elektrischen Heizstab vorhanden. Dieser befindet sich im OG im Hauswirtschaftsraum.

2.2 Probleme beim Anlagenbetrieb

Die Regelung der Wärmepumpe wurde während der Heizperiode so eingestellt, dass die Vorlauftemperatur immer 45 °C betrug. Diese Maßnahme war notwendig, da der Raumtemperatursollwert teilweise nicht erreicht wurde. Die Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung (FBH) wurde daraufhin erst auf 40 °C und später auf 45 °C erhöht. Die Sollvorlauftemperatur



für den Lufterwärmer beträgt weniger als 45 °C und wird durch eine Vorregelung auf eine niedrigere Temperatur gemischt. Der Trinkwarmwasserspeicher (TWW-Speicher) wird ebenfalls mit einer Vorlauftemperatur von 45 °C betrieben.

Die Anhebung der Vorlauftemperatur der FBH erfolgte, um die Heizung des Gebäudes möglichst schnell wieder sicherstellen zu können und um eine zu geringe Vorlauftemperatur als Fehlerquelle auszuschließen.

Bei genaueren Untersuchungen der Heizanlage wurde festgestellt, dass die Zuordnung und Ansteuerung der Heizkreise durch die Raumtemperaturregler teilweise nicht stimmte. Z.B. waren die Heizkreise „Hauswirtschaftsraum“ und „Badezimmer“ vertauscht und ein Heizkreis im „Schlafzimmer“ wurde vom Regler des „Kinderzimmers“ angesteuert. Außerdem war ein Aktor zur Ansteuerung der Heizkreisventile im OG defekt.

Allerdings gab es auch nachdem diese Fehler behoben waren Schwierigkeiten mit der Heizung des Gebäudes. So hat *Büchel*, der in seinem Gutachten weitere Vorschläge zur Verbesserung der Regelungstechnik erarbeitet hat, festgestellt dass die Heizleistung der Anlage nach wie vor nicht ausreicht um die geforderten Raumtemperatursollwerte zu erreichen. Dies Problem tritt bereits bei Außentemperaturen von ca. 0 °C auf, als oberhalb der Auslegungsaußentemperatur von -14 °C.

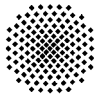
Weshalb die FBH die erforderliche Heizleistung nicht erbringt, ist nicht eindeutig zu bestimmen. Es gibt zwei mögliche Ursachen für das Problem, die sich gegenseitig überlagern. Der - im Vergleich zur Auslegung - reduzierte Wärmeträgermassenstrom in der FBH und der Luftaustausch zwischen dem EG und dem OG. Dieser Luftaustausch entsteht aufgrund der offenen Bauweise des Gebäudes und der niedrigeren Raumtemperatursollwerte im OG, verursacht durch die unterschiedliche Nutzung. Beim BBR sieht man letzteres als Hauptursache für die Schwierigkeiten.

2.2.1 Auswirkungen des reduzierten Massenstroms auf die Heizleistung

Der Massenstrom in der FBH beträgt laut *Büchel* [3] nur 68% des Auslegungsmassenstroms. Dies gilt für den Fall das alle Heizkreisventile voll geöffnet sind.

Das Verfahren zur Auslegung nach DIN EN 1264 sieht vor, dass der Auslegungsmassenstrom so berechnet wird, dass sich die notwendigen mittleren Wärmeträger- und Oberflächentemperaturen einstellen. Ein Zusammenhang zwischen Wärmeträgermassenstrom und Heizleistung, wie er in den Heizkörperauslegungsdiagrammen der VDI 6030 [5] dargestellt ist, findet sich in der Norm für die Auslegung von Fußbodenheizungen nicht.

Allerdings können die Gleichungen, welche den Heizkörperauslegungsdiagrammen zugrunde liegen auf Fußbodenheizungen übertragen werden.



Gleichung (1) zeigt den Zusammenhang zwischen Heizleistung und mittlerer Übertemperatur der Heizfläche der Kennlinien nach VDI 6030 [5].

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_s} = \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_s} \right)^n \quad (1)$$

Mit

\dot{Q}	Heizleistung in W
ΔT	mittlere Übertemperatur des Wärmeträgers in K
s	Index der Normheizleistung bzw. Normübertemperatur
n	Exponent der Heizfläche

Der Heizflächenexponent für Fußbodenheizungen beträgt 1,1 [6]. Setzt man diesen ein, kann mit Gleichung (1) auch das Verhalten einer Fußbodenheizung berechnet werden.

Die Normheizleistung kann wie in Gleichung (2) beschrieben weiter aufgelöst werden.

$$\dot{Q}_s = q_{ms} \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2)_s \quad (2)$$

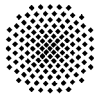
Mit

q_{ms}	Normmassenstrom in kg/s
c_p	spezifische Wärmekapazität in J/(kgK)
t_1	Vorlauftemperatur in °C
t_2	Rücklauftemperatur in °C

Mit den Gleichungen (1) und (2) kann berechnet werden, wie sich die Heizleistung verändert, wenn der Massenstrom des Wärmeträgers auf 70% des ursprünglichen Wertes reduziert wird. Als Grundlage für die exemplarische Rechnung dient die Auslegung des Heizkreises „Wohnen/Essen“, welche im Bild 10 im Bericht von *Büchel* [3] beschrieben ist. Es wird nur einer der 4 Heizkreise betrachtet. Für die Berechnung werden folgende Annahmen getroffen:

- Vorlauftemperatur $t_1=35$ °C
- Rücklauftemperatur $t_2=29,5$ °C (da $\sigma=5,5$ K)
- Bezugslufttemperatur $t_r=20$ °C
- Auslegungsmassenstrom $q_m=113$ kg/h bzw. 0,0314kg/s
- spezifische Wärmekapazität $c_p=4190$ J/(kgK)
- Heizkörperexponent $n=1,1$ [6]

Für die Heizleistung im Ausgangszustand werden 724 W angenommen. Dies wurde aus der Temperaturspreizung und dem Massenstrom aus den Auslegungsunterlagen berechnet. Setzt man Gleichung (2) in (1) ein, erhält man für den auf 70% reduzierten Massenstrom eine neue Rücklauftemperatur $t_{2,70\%}=27,6$ °C. Dies entspricht einer Heizleistung



$\dot{Q}_{70\%} = 677 \text{ W}$, was 93% der ursprünglichen Heizleistung entspricht. Für einen um 50% reduzierten Massenstrom stellt sich die Rücklauf­temperatur $t_{2,50\%} = 25,7 \text{ °C}$ ein. Die Heizleistung beträgt dann $\dot{Q}_{50\%} = 615 \text{ W}$, entsprechend 85% der ursprünglichen Heizleistung. Der Massenstrom hat also nur einen geringen Einfluss auf die Heizleistung einer FBH, da der niedrigere Massenstrom nur eine leichte Erhöhung der Temperaturspreizung verursacht und sich die mittlere Oberflächentemperatur deshalb auch nur wenig ändert.

Außerdem sind, wie im Bericht von *Büchel* [3] dokumentiert ist, insgesamt nur 11 Heizkreise statt 14 Heizkreise verbaut. Dadurch müssten einige Heizkreise länger sein als in der Auslegungsrechnung vorgesehen. Ob einzelne Heizkreise dadurch länger geworden sind oder komplett fehlen kann nicht beurteilt werden. Werden z.B. zwei Heizkreise zu einem zusammengefasst würde sich die durchströmte Rohrlänge vergrößern. Dies müsste zu einer größeren Temperaturspreizung in der FBH führen.

2.2.2 Auswirkung der erhöhten Vorlauf­temperatur auf die Heizleistung

Aufgrund von Problemen mit der Heizleistung der FBH wurde die Regelung der Wärmepumpe so verändert, dass sich eine Vorlauf­temperatur von etwa 45 °C eingestellt hat. Die Auswirkung dieser Maßnahme kann ebenfalls mit Gleichung (1) berechnet werden. Die mittlere Übertemperatur wird mit Gleichung (3) berechnet.

$$\Delta T = \frac{(t_1 + t_2)}{2} - t_i \quad (3)$$

Die mittlere Übertemperatur im Auslegungsfall ΔT_{des} beträgt ca. 12,3K. Mit den Annahmen, dass die neue Vorlauf­temperatur $t_{1,neu}$ auf 45°C angehoben wird, und die Spreizung aufgrund der Wärmepumpenregelung weiterhin 5K beträgt folgt, dass die neue mittlere Übertemperatur 22,5K beträgt. Die Annahme der 5K Temperaturspreizung folgt aus dem *Bild 22* im Bericht von *Büchel* [3]. Löst man die Gleichung (1) entsprechend auf und setzt diese Werte ein folgt Gleichung (4):

$$\dot{Q}_{neu} = \dot{Q}_{des} \left(\frac{\Delta T_{neu}}{\Delta T_{des}} \right)^n = \dot{Q}_{des} \left(\frac{22,5K}{12,3K} \right)^{1,1} = 1,94 * \dot{Q}_{des} \quad (4)$$

Mit

- \dot{Q}_{neu} neue Heizleistung nach Anhebung der Vorlauf­temperatur in W
- \dot{Q}_{des} Heizleistung bei Betrieb mit der Auslegungsvorlauf­temperatur
- ΔT_{des} Auslegungsvorlauf­temperatur
- ΔT_{neu} neue, angepasste Vorlauf­temperatur

Durch die Anhebung der Vorlauf­temperatur von 35 °C auf 45 °C verdoppelt (194%) sich die Heizleistung der FBH nahezu. Dies gilt für die Annahme, dass der Massenstrom im Vergleich



zur Auslegung nicht reduziert ist. Berücksichtigt man zusätzlich, dass nur 70% des Auslegungsmassenstroms verfügbar sind, beträgt die Leistung bei 45 °C Vorlauftemperatur 180% der ursprünglich geplanten Heizleistung.

Rechnerisch müsste sich allerdings aufgrund der erhöhten Vorlauftemperatur allerdings eine deutlich größere Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur einstellen. Diese müsste 9,5K betragen, was eine neue mittlere Übertemperatur ΔT_{neu} von 20,3K zur Folge hätte. Daraus resultiert eine Leistung von 173% der Auslegungsheizleistung bei vollem Massenstrom. Berücksichtigt man den auf 70% reduzierten Massenstrom beträgt die Leistung 160% der ursprünglich geplanten Heizleistung.

2.2.3 Einfluss der offenen Bauweise des Gebäudes

Das Gebäude hat ein offenes Treppenhaus und ist im EG als eine thermische Zone ausgeführt. Lediglich das WC und die Technikzentrale sind räumlich abgetrennt. Im OG befinden sich die Schlaf- und Kinderzimmer. In diesem Bereich wird von den Nutzern meist eine niedrigere Solltemperatur angefordert, weshalb die Fußbodenheizung im OG häufig außer Betrieb ist und sich - soweit die Dämmung des Gebäudes dies zulässt - eine niedrigere Lufttemperatur als im EG einstellt.

Verursacht durch den Temperaturunterschied zwischen EG und OG steigt die Luft aus dem Eingangsbereich durch das offene Treppenhaus nach oben und teilweise in die offenen Schlaf- und Kinderzimmer. Durch die unterschiedlichen Raumtemperaturen in den einzelnen Räumen und Geschoßen entsteht außerdem ein Transmissionswärmestrom durch die Innenbauteile des Gebäudes. Dieser ist im Vergleich zu dem Einfluss der Luftströmung jedoch als gering einzuschätzen.

Durch die mittelbare Heizung der Räume mit abgesenkter Raumtemperatur durch die FBH im EG steigt die Heizlast welche diese decken muss an. Deshalb reicht die ursprüngliche Auslegungsheizleistung nicht mehr aus um die Solltemperaturen im EG erfüllen zu können.

Durch die Anhebung der Vorlauftemperatur von 35 °C auf 45 °C konnte das Problem mit der fehlenden Heizleistung im EG weitestgehend behoben werden. Durch die gestiegene Heizleistung im EG erfolgt eine mittelbare Heizung des OG, mit der Folge, dass von den Nutzern geforderte, niedrige Solltemperaturen im OG nicht erreicht werden können.

3 Verbesserungsvorschläge

Für eine Verbesserung des Anlagenbetriebs und eine Reduzierung des Stromverbrauchs zur Wärmeerzeugung werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- Einbau einer Glastür und –scheibe im EG
- Austausch der Wärmepumpe durch ein Gerät mit drehzahlgeregeltem Verdichter

3.1 Einbau einer Glastür im EG

Eine mögliche Verbesserungsmaßnahme am Gebäude, welche bereits vom Bauherrn gefordert wird, ist eine Abtrennung des Wohn- und Essbereichs vom Treppenhaus durch eine Glastür bzw. eine feste Glasscheibe hinter der Treppe. Die mögliche Abtrennung ist im Bild 1 als roter Strich markiert, die Glastür ist mit (1) und die feste Glasscheibe mit (2) gekennzeichnet. Dadurch wird der Wohn- und Essbereich vom Eingangsbereich und dem Treppenhaus besser thermisch entkoppelt.

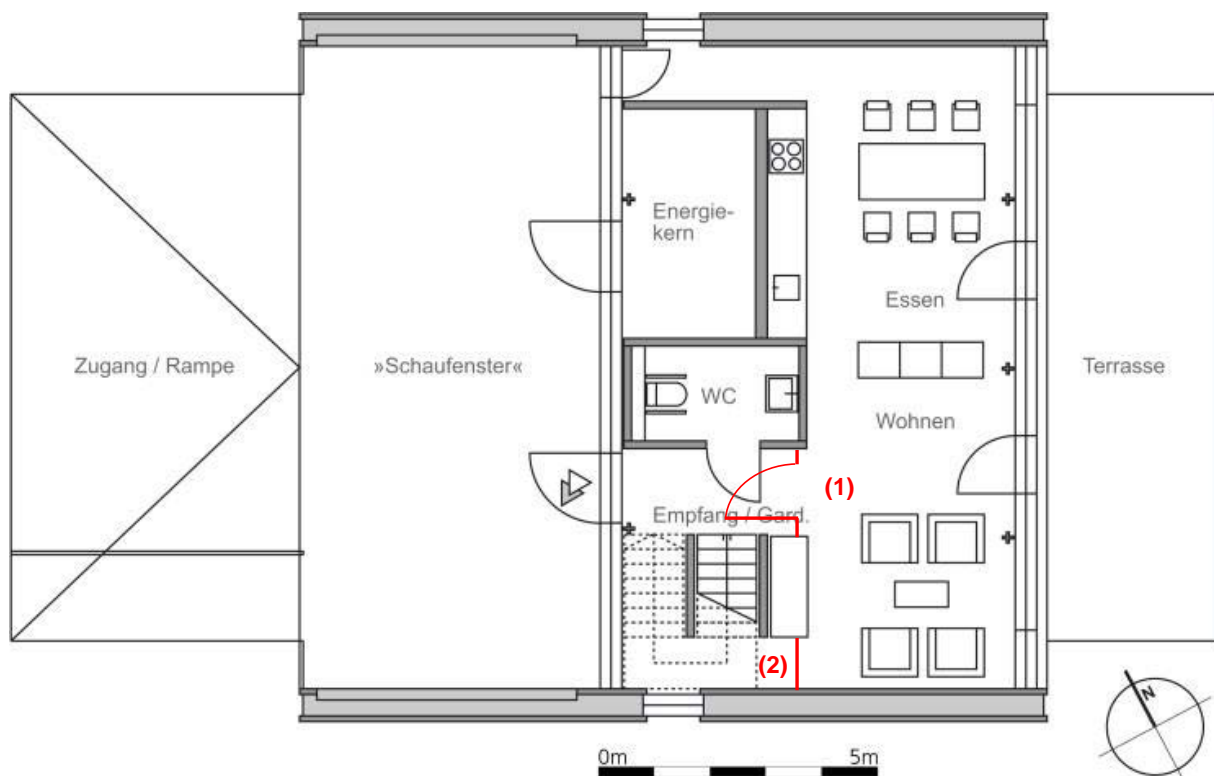
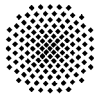


Bild 1 Grundriss des Erdgeschosses mit der geplanten Glastür bzw. -scheibe

Durch diese Abtrennung wird es dem Nutzer ermöglicht den Sollwert im OG abzusenken ohne das die Wärme aus dem Wohn-/Esszimmer in den Eingangsbereich und dann in Folge einer thermischen Auftriebsströmung weiter in das OG gelangt. Damit diese Maßnahme die erhoffte Wirkung zeigt, muss die Tür während der Heizperiode geschlossen bleiben. Darauf müssen zukünftige Bewohner des Hauses ausdrücklich hingewiesen werden.

3.2 Einstellen der ursprünglichen Vorlauftemperatur

Wenn die in Kapitel 3.1 beschriebene Maßnahme umgesetzt wird und die Massenströme in der Fußbodenheizung erhöht werden können, sollte es möglich sein die Vorlauftemperatur auf den Auslegungswert von 35 °C zu begrenzen. Dies ist die wichtigste Voraussetzung für eine Verbesserung der JAZ.



3.3 Einbau einer leistungsgeregelten Wärmepumpe

Die Leistungsregelung von Wärmepumpen (WP) erfolgt bei Geräten mit unregelmäßigem Verdichter durch einen taktenden Ein-/Aus-Betrieb. Das Bild 2 aus dem Bericht von *Büchel* [3] zeigt dieses Regelverhalten sehr deutlich. Der eigentliche Sollwert von 45 °C wird um fast 4-5K „überschwungen“, anschließend kühlt sich der Vorlauf wieder um 10K ab, bevor die WP wieder in Betrieb geht. Die in der Regelung der WP eingestellte Hysterese von 10 K ist sehr groß und für den Betrieb, bzw. für das Erreichen einer guten JAZ eher ungünstig.

Eine leistungsgeregelte Wärmepumpe kann durch Anpassung der Verdichterdrehzahl einen vorgegebenen Vorlaufsollwert genau einhalten und nahezu konstant halten. Dadurch wird die Wärmepumpe nicht mehr taktend sondern kontinuierlich betrieben. Dadurch steigen zwar die Betriebsstunden an, der Bedarf an elektrischer Energie sinkt jedoch aufgrund der geringeren benötigten Leistung und einer größeren Leistungszahl.

Da der bisher eingebaute Trinkwarmwasserspeicher auf den Betrieb mit der vorhandenen Wärmepumpe abgestimmt ist, sollte auch dieser ersetzt werden. Aus Platzgründen ist eine leistungsgeregelte Split-Wärmepumpe mit integriertem Trinkwarmwasserspeicher zu empfehlen. Durch die Split-Bauweise mit einer Außen- und einer Inneneinheit ist der Platzbedarf dieser Wärmepumpen so gering, dass diese auf der Fläche der bisher vorhandenen Wärmepumpe Platz hat.

Durch den Austausch der vorhandenen Wärmepumpe durch ein Gerät mit Leistungsregelung wird außerdem der Forschungs- und Experimentiercharakter des E+Hauses hervorgehoben. Durch den Austausch können, nachdem erste Betriebserfahrungen mit einer unregelmäßigem Wärmepumpe gesammelt wurden, noch Erfahrungen mit einer moderneren Wärmepumpentechnik gesammelt werden, die inzwischen von vielen Herstellern angeboten wird.

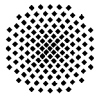
Abschätzung der JAZ einer leistungsgeregelten Wärmepumpe

Die Berechnung der Jahresarbeitszahl erfolgt nach der VDI-Richtlinie 4650 Blatt 1 [2]. Um einen besseren Vergleich zu erhalten wird auch für die bestehende Wärmepumpe die Jahresarbeitszahl nach VDI 4650 berechnet und nicht die gemessene Jahresarbeitszahl als Vergleichswert herangezogen. Die Berechnung erfolgt mit Gleichung (5).

$$\beta_h = (\varepsilon_{N1} \cdot F_{g1} + \varepsilon_{N2} \cdot F_{g2} + \varepsilon_{N3} \cdot F_{g3}) \cdot F_{\Delta g} \quad (5)$$

Mit

ε_N	Leitungszahl nach DIN EN 14511 bei
ε_{N1}	bei A-7/W35 (Lufttemperatur -7°C und Wassertemperatur 35°C)
ε_{N2}	bei A2/W35
ε_{N3}	bei A10/W35



$F_{\Delta\theta}$ Korrekturfaktoren für abweichende Temperaturdifferenzen bei Messung und Betrieb am Verflüssiger

$F_{\theta 1}, F_{\theta 2}, F_{\theta 3}$ Korrekturfaktoren 1-3 für unterschiedliche Betriebsbedingungen

Tabelle 1 zeigt die nach VDI 4650 ermittelte JAZ für die installierte Wärmepumpe. Die Korrekturfaktoren 1-3 sind abhängig von der Heizgrenztemperatur, der Auslegungsaußentemperatur am Standort des Gebäudes und von der Auslegungsvorlauftemperatur der Heizungsanlage. Die Annahmen hierfür sind:

- Heizgrenztemperatur 10 °C
- Auslegungsaußentemperatur -14 °C (Standort Berlin)
- Vorlauftemperatur 45 °C sowohl für die Heizung als auch für das TWW

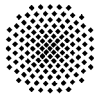
Die JAZ für die TW-Erwärmung ist bei gleicher Vorlauftemperatur höher als für die Heizung, was daran liegt das es auch bei höheren Außenlufttemperaturen einen Bedarf für TWW gibt. Die Wärme für die Heizung muss hingegen überwiegend bei niedrigen Außenlufttemperaturen bereitgestellt werden.

Die kombinierte JAZ wird mit dem Verhältnis der Energiebedarfe für Heizung und TWW berechnet. Das Verhältnis des Stromverbrauchs für Heizung und TWW wird aus dem IBP Bericht [1] entnommen. Die nach VDI 4650 berechnete JAZ liegt deutlich über dem gemessenen Wert der im Betrieb der Wärmepumpe erreicht wird.

Tabelle 1 Berechnung der JAZ nach VDI 4650 Blatt 1 für die vorhandene Wärmepumpe

		WP „Bestand“		
		Heizung	TWW	kombiniert
Korrekturfaktor 1	$F_{\theta 1}$	0,174	0,103	
Korrekturfaktor 2	$F_{\theta 2}$	0,746	0,903	
Korrekturfaktor 3	$F_{\theta 3}$	0,039	0,061	
Korrekturfaktor 4	$F_{\Delta\theta}$	1,00	1,00	
Leistungszahl bei A-7/W35	ϵ_{N1}	2,60		
Leistungszahl bei A2/W35	ϵ_{N2}	3,20		
Leistungszahl bei A10/W35	ϵ_{N3}	4,10		
Jahresarbeitszahl	β_h	3,00	3,28	3,11

Für die Abschätzung der Verbesserung der JAZ durch den Einsatz einer leistungsgeregelten Wärmepumpe sind Messwerte über den ganzen Leistungsbereich einer leistungsgeregelten



Wärmepumpe nötig. Diese Messung ist nicht Bestandteil der Leistungsprüfung von Wärmepumpen und deshalb nicht für alle Wärmepumpen vom Hersteller erhältlich.

An der Prüfstelle für Wärmepumpen am IGE, wo Leistungsprüfungen nach gängigen Prüfnormen wie der DIN EN 14511 durchgeführt werden, wurden bereits erste Testmessungen an leistungsgeregelten Wärmepumpen durchgeführt. Den Verlauf der Leistungszahl über der thermischen Leistung für eine exemplarische leistungsgeregelte Wärmepumpe zeigt Bild 2. Der Verlauf der Linien in diesem Bild verdeutlicht den Vorteil den leistungsgeregelte Wärmepumpen haben. Die Leistungszahl steigt im Teillastbetrieb deutlich an. Im realen Betrieb in einem Gebäude befinden sich die Heizungsanlage und damit die Wärmepumpe meist im Teillastbetrieb wodurch dieser Vorteil gut genutzt werden kann.

Betrachtet man als Beispiel den Verlauf der Linie am Punkt A2/W35, sieht man dass die Leistungszahl bei geringerer Verdichterdrehzahl bzw. thermischer Leistung von 3,1 auf 4,0 ansteigt. Dies bringt im Betrieb eine Steigerung der Jahresarbeitszahl mit sich.

Für die Abschätzung der Verbesserung der Jahresarbeitszahl durch den Einsatz einer leistungsgeregelten Wärmepumpe werden die Messwerte aus Bild 2 benutzt.

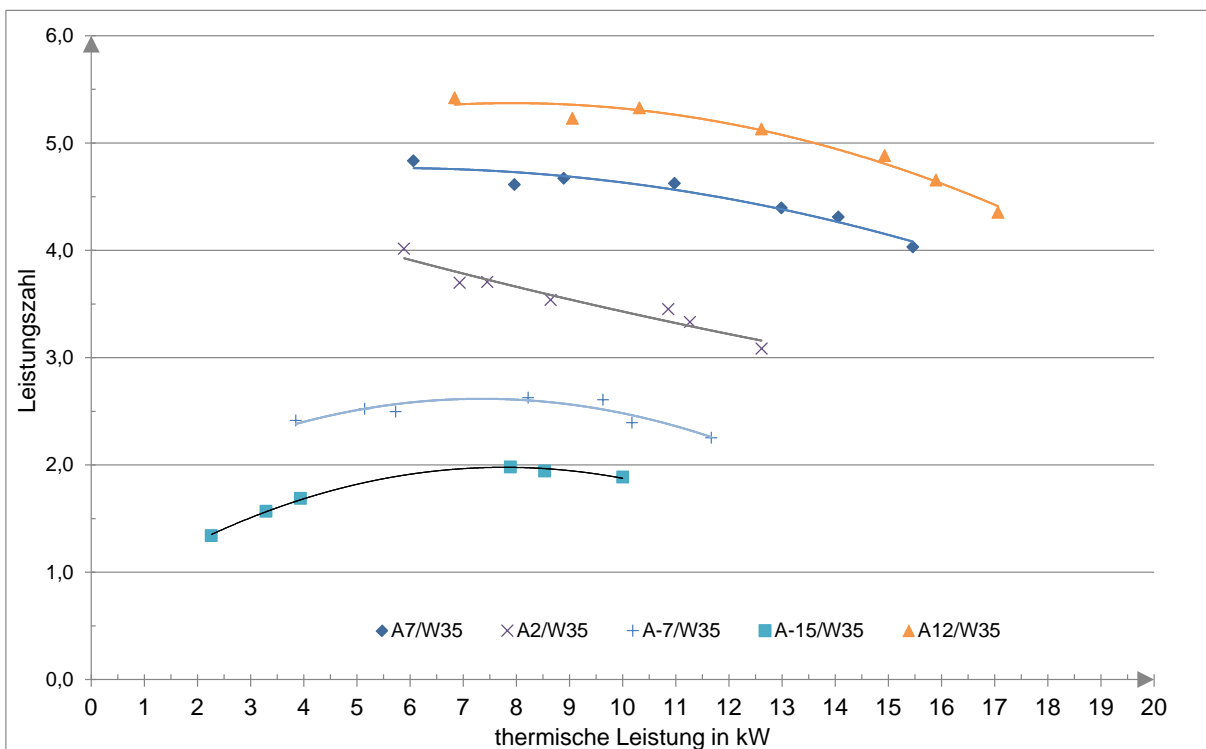
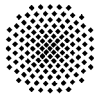


Bild 2 Verläufe der Leistungszahl über der thermischen Leistung für eine exemplarische leistungsgeregelte Wärmepumpe

Tabelle 2 zeigt die Berechnung der JAZ für die leistungsgeregelte Wärmepumpe aus Bild 2. Die Korrekturfaktoren 1-3 für den Betriebsmodus „Heizen“ haben sich in Tabelle 2 im Vergleich zu Tabelle 1 verändert, da hier jetzt die Vorlauftemperatur mit 35 °C angenommen



wird. Alle anderen Korrekturfaktoren bleiben unverändert. Die Leistungszahlen der leistungsgeregelten Wärmepumpe werden von den Kennlinien in Bild 2 abgelesen. Die Auswahl der Teillastverhältnisse (TL) erfolgt nach DIN EN 14825 [8]. Da es für A10/W35 keine Kennlinie gibt, wird für diesen Wert zwischen A7/W35 und A12/W35 linear interpoliert.

Die berechnete JAZ für die leistungsgeregelte Wärmepumpe beträgt 3,77, damit liegt sie ca. 20% über der berechneten JAZ der vorhandenen Wärmepumpe.

Tabelle 2 Berechnung der JAZ nach VDI 4650 Blatt 1 für eine exemplarische leistungsgeregelte Wärmepumpe

		WP „geregelt“		
		Heizung	TWW	kombiniert
Korrekturfaktor 1	F_{g1}	0,194	0,103	
Korrekturfaktor 2	F_{g2}	0,814	0,903	
Korrekturfaktor 3	F_{g3}	0,042	0,061	
Korrekturfaktor 4	$F_{\Delta g}$	1,00	1,00	
Leistungszahl bei A-7/W35 ,TL=76%	ϵ_{N1}	2,50		
Leistungszahl bei A2/W35, TL=46%	ϵ_{N2}	3,70		
Leistungszahl bei A10/W35, TL=30%	ϵ_{N3}	5,10		
Jahresarbeitszahl	β_h	3,71	3,91	3,77



4 Zusammenfassung

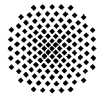
Die Ergebnisse der Untersuchung lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Der reduzierte Massenstrom in der FBH hat nur einen geringen Einfluss auf die Heizleistung. Bei 70% Massenstrom beträgt die Heizleistung noch 93% und bei 50% Massenstrom noch 85%. Dies gilt bei gleichbleibender Vorlauftemperatur.
- Um die Probleme mit der Heizung zu lösen, wurde die Vorlauftemperatur von 35 °C auf 45 °C angehoben. Dies entspricht nahezu einer Verdoppelung der Heizleistung für den Fall, dass der ursprüngliche Auslegungsmassenstrom verfügbar ist. Aufgrund des geringeren Massenstroms beträgt die Leistungssteigerung nur 80% (bei 70% des Auslegungsmassenstroms).
- Der geplante Einbau einer Glastür und –scheibe zwischen Wohn-/Esszimmer und Eingangsbereich wird empfohlen.
- Die Verbesserung der JAZ durch den Austausch der installierten unregulierten Wärmepumpe durch ein Gerät mit Leistungsregelung liegt voraussichtlich in der Größenordnung von 20%. Dies ist der Vergleich des Ist-Zustandes mit einer Vorlauftemperatur von 45 °C, und der Annahme dass die leistungsgeregelte Wärmepumpe mit 35 °C Vorlauftemperatur betrieben wird. Einen Vergleich der JAZ der Wärmepumpen „Bestand“ bei $\vartheta_{Vor}=40^{\circ}\text{C}$ und der WP „geregelt“ bei $\vartheta_{Vor}=35^{\circ}\text{C}$ zeigt Tabelle 3. Für den Vergleich werden unterschiedliche Vorlauftemperaturen betrachtet, da die unregulierte WP „Bestand“ die geforderte Vorlauftemperatur der FBH überschwingen muss um diese zu erfüllen. Bei diesem Vergleich beträgt die Verbesserung durch die geregelte WP ca. 17%. Würde man auch für die WP „Bestand“ eine Vorlauftemperatur von 35 °C annehmen, würde die Verbesserung noch 14% (JAZ=3,32) betragen.

Tabelle 3: Jahresarbeitszahlen der WP „geregelt“ und „Bestand“ bei 35 °C bzw. 40 °C Vorlauf-temperatur

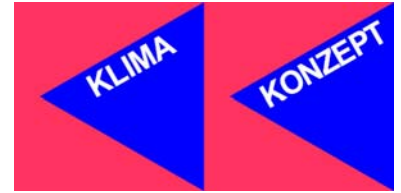
	WP "geregelt"	WP "Bestand"
	$\vartheta_{Vor}=35^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_{Vor}=40^{\circ}\text{C}$
JAZ	3,77	3,21
Veränderung in %		-17%

- Im Empfangsbereich zwischen „Schaufenster“ und der einzubauenden Glastür, sollte – wenn dies regelungstechnisch möglich ist – der maximal einstellbare Sollwert auf 18 °C beschränkt werden. Dieser Heizkreis befindet sich außerhalb der Glasscheibe des Bereichs „Wohnen/Essen“ und würde weiterhin das OG mittelbar Heizen.



5 Literaturverzeichnis

- [1] Erhorn, Hans et. al.: Messtechnische und energetische Validierung des BMVBS-Effizienzhaus-Plus in Berlin, IBP-Kurzbericht, Stuttgart, 2013
- [2] VDI 4650 Blatt 1:2009-03 Berechnung von Wärmepumpen Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresaufwandszahlen von Wärmepumpenanlagen Elektro-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung
- [3] *Büchel, Manfred*: Effizienzhaus+ mit Elektromobilität Berlin, Bericht, Gelsenkirchen 2013
- [4] DIN V 18599-10: 2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden–Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten
- [5] VDI 6030:2002-07 Auslegung von freien Raumheizflächen – Grundlagen Auslegung von Raumheizkörpern
- [6] *Schramek, Rudolf (Hrsg.)*: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 07/08 (73. Auflage). München: Oldenbourg Industrieverlag, 2006; ISBN: 978-3-8356-3104-5
- [7] DIN EN 14511-3:2008-02: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und Kühlung–Prüfverfahren
- [8] DIN EN 14825:2012-06 Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und Kühlung- Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl



Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Finke
Ingenieurgesellschaft bR

Olympische Str. 3 a
14052 Berlin

Telefon (030) 30108881
Telefax (030) 30108882

E-Mail fitzner@klimakonzept.de
Internet www.klimakonzept.de

Berlin, den 28. Feb. 2014

Bericht 201403

Begutachtung und Bewertung der Raumlufstromung im Heizfall: Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität

**10623 Berlin, Fasanenstr. 87 a
BBSR - Forschungsvorhaben
Aktenzeichen: SWD - 10.08.81 - 13.04**



Dieser Bericht umfasst 25 Seiten. Exemplar 1

(Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner)

(Dipl.-Ing. Florian Bräuer)

Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität, Begutachtung und Bewertung der Raumluftrömung im Heizfall

Endbericht

Forschungsprogramm

Energie- und Klimafonds (EKF), Forschung und Untersuchungen im Rahmen des Energie- und Klimafonds, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)

Projektlaufzeit

02. Januar 2014 bis 31. März 2014

Aktenzeichen

SWD – 10.08.81 –13.04

im Auftrag

des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

bearbeitet von

Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner und Dipl. Ing. Florian Bräuer, Klimakonzept Ingenieurgesellschaft bR

Inhalt

1	Aufgabenstellung.....	3
2	Verwendete Unterlagen.....	3
3	Durchführung der Messungen	4
4	Das Gebäude	4
5	Messstellen	8
6	Messgeräte.....	8
7	Messergebnisse	9
7.1	Strömung im Treppenhaus (qualitativ)	9
7.2	Strömung vom Flur in den Wohnraum.....	10
7.3	Temperaturprofile	12
7.4	Vergleich mit der Theorie	16
7.5	Heizlast der Luftströmung	18
7.6	Vermeidung der Kaltluftströmung.....	21
8	Zusammenfassung.....	22
	Anhang 1: Verlauf Außentemperaturen, Aufzeichnung Wetterstation	23
	Anhang 2: Temperaturverläufe in den Räumen.....	24
	Anhang 3: CD Strömungsvisualisierung	25

1 Aufgabenstellung

Am 17.12.2013 wurde unser Büro vom BBSR¹ beauftragt, strömungstechnische Untersuchungen im „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“ in 10623 Berlin, Fasanenstraße 87 a, durchzuführen.

Das Effizienzhaus hat zwei Etagen, die mit einem innenliegenden weitgehend offenen Treppenhaus verbunden sind. Wenn der Nutzer im Obergeschoss (OG) niedrigere Temperaturen als im Erdgeschoss (EG) bei geöffneten Türen wünscht und deshalb die Heizung oben ausschaltet, entsteht eine Ausgleichsströmung durch das Treppenhaus, die für einen konvektiven Wärmestrom nach oben sorgt und entsprechend einen Kaltluftstrom nach unten hervorruft. Dabei wird die Heizung des gesamten Gebäudes vom Erdgeschoss übernommen und es bleibt im Winter oben kälter als unten. Das erfordert im Erdgeschoss höhere Vorlauftemperaturen der Fußbodenheizung. Diese eigentlich nicht beabsichtigte Betriebsweise hat Auswirkungen auf die Heizwassertemperatur und damit auch auf die Energieeffizienz, oder genauer gesagt auf die Leistungszahl der Wärmepumpe. Die unerwünschte Ausgleichströmung zwischen Erd- und Obergeschoss kann zudem Zugerscheinungen im Erdgeschoss hervorrufen.

Andere Einflüsse auf die Leistungszahl der Wärmepumpe, wie Auslegung der Heizflächen oder Regelung der Heizung werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Zur Erklärung der Luftströmung sollen Temperaturprofil- und Luftgeschwindigkeitsmessungen durchgeführt werden. Dazu werden senkrechte Temperaturprofile im Ober- und Erdgeschoss sowie die Luftgeschwindigkeiten an repräsentativen Orten gemessen. Weiterhin wird die Strömung zur Beschreibung visualisiert. Das geschieht am Treppenhaus mit Rauchröhrchen sowie mit einem Nebelgenerator. Die Dokumentation erfolgt mit Fotos und kurzen Videoaufnahmen.

2 Verwendete Unterlagen

- Aufzeichnung Temperaturen Energieeffizienzhaus Plus, in Form einer Excel Tabelle per Email durch Herrn Walther, 29.01.2014
- [1] Kriegel, B.: Fallströmungen vor Abkühlflächen in Gebäuden und mögliche Schutzmaßnahmen, Dissertation TU Berlin, 1973
- [2] Rietschel: Raumklimotechnik, Band 2: Raumluftr- und Raumkühltechnik, 16. Aufl., Herausg. K. Fitzner

¹ Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

- [3] Grundrisse Energieeffizienzhaus Plus, Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität, Technische Information und Details, abgerufen Januar 2012 im Internet, BBSR_EffizienzhausPlus_Elektromobil_DE_Aufl2_barrierefrei.pdf

3 Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden am 26. und 27. Januar 2014 durchgeführt. Während der Untersuchungen sollten möglichst niedrige Außentemperaturen vorliegen, um eine große Temperaturspreizung zwischen innen und außen zu erreichen. Diese Bedingung wurde während der Messtermine erfüllt.

Die Untersuchungen wurden für zwei Zustände durchgeführt. Am 26.01.2014 wurden die sich einstellenden Luftvolumenströme bei normalem Betrieb und ausgeglichenen Innentemperaturen gemessen. Dabei waren alle Fußbodenheizungen in Betrieb und die Raumtemperaturen sollten 22°C betragen.

Die zweite Messung der Luftvolumenströme sollte nach dem Absenken der Temperatur in den Räumen im Obergeschoss erfolgen. Hierfür wurde am 26.1.2014 nach der ersten Messung die Heizung im Obergeschoss abgestellt und im Erdgeschoss wurde die Temperatur angehoben, um eine größere Differenz zur Außentemperatur zu erhalten. Am folgenden Tag, dem 27.1.2014 wurde die 2. Messung durchgeführt. Nach Angaben des Betreibers und gemäß der Temperaturaufzeichnungen, wurde das Abschalten der Heizung im OG nur teilweise erreicht. Im Elternschlafzimmer sprang in der Nacht die Heizung an² und konnte dann erst morgens manuell wieder abgestellt werden. Die Temperaturverläufe sind als Diagramm im Anhang 2 dargestellt.

Die Lüftungsanlage war während der Messungen eingeschaltet.

Die Außentemperatur wurde von der Wetterstation des Effizienzhauses aufgezeichnet und ist im Anhang 1 wiedergegeben.

4 Das Gebäude

Das Gebäude selbst wird in einer Broschüre des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [3] ausführlich beschrieben. Die allgemeine Beschreibung des Gebäudes wird hier deshalb nicht wiederholt.

Bild 1 zeigt die Westfassade, die vollkommen verglast ist. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird mit 0,5 bzw. 0,7 W/(m²*K) für das Glas bzw. Glas mit Profilen angegeben. Hinter einem 4,12 m breiten Streifen der Glasfassade, rechts auf Bild 1, liegt das Treppenhaus, dargestellt auf Bild 2.

² Als Folge einer bisher nicht bekannten Automatikfunktion.



Bild 1: Westfassade des „Effizienzhauses Plus“ im Winter am 27.1.2014



Bild 2: Außenansicht der Westfassade vor dem Treppenhaus

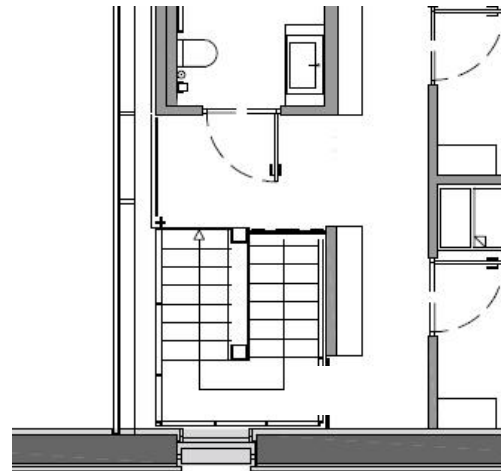
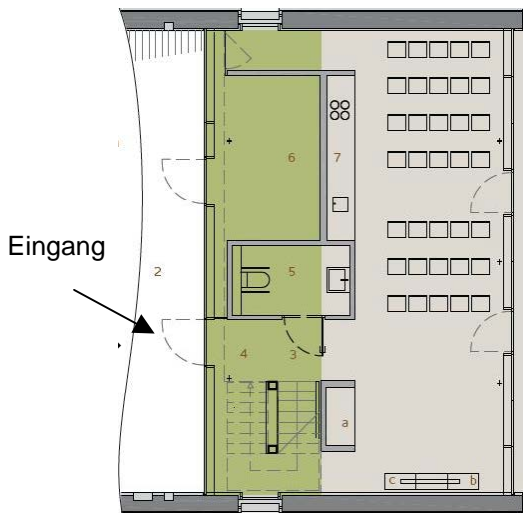


Bild 3: Grundriss EG Effizienzhaus

Bild 4: Grundriss Treppenhaus (vergrößert)

Bild 3 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses und Bild 4 das in der Süd-West-Ecke liegende Treppenhaus (OG) vergrößert.

Die Lage der Außentür ist unten links im Grundriss auf Bild 3 zu sehen. Ein kurzer Flur (2,26 m lang) führt von der Eingangstür zum Wohnbereich ohne eine weitere Abtrennung. Die Treppe führt auf der Wohnraumseite vom Flur nach oben, zunächst zu einem Podest (0,80 m x 2,80 m) in halber Höhe und dann nach Richtungsänderung weiter nach oben (Bild 4) .

Zum Wohnraum schließt der Flur unten ohne Tür ab. Bild 6 zeigt einen Blick vom Wohnraum in den Flur. Im Bereich der Stufen ist die Treppe zum Wohnraum hin durch einen u-förmigen Wandabschnitt über die gesamte Höhe abgeschlossen, auf dem Grundriss Bild 3 zu sehen. Das ist die einzige Abtrennung zwischen Treppenhaus und Wohnraum. Im Bereich des Treppenpodestes (0,80 m breit) ist der Wohnraum über die gesamte Höhe offen zum Treppenhaus, dargestellt auf dem Foto, Bild 5. Das Treppenhaus ist hier ebenfalls offen zum darüber liegenden Flur. Im Treppenkerne liegt eine über die gesamte Höhe dichte Wand. Die Treppe ist mit geschlossenen Stufen ausgeführt. Die Ansicht ins Treppenhaus vom Wohnraum her ist im folgenden Bild 5 zu sehen.

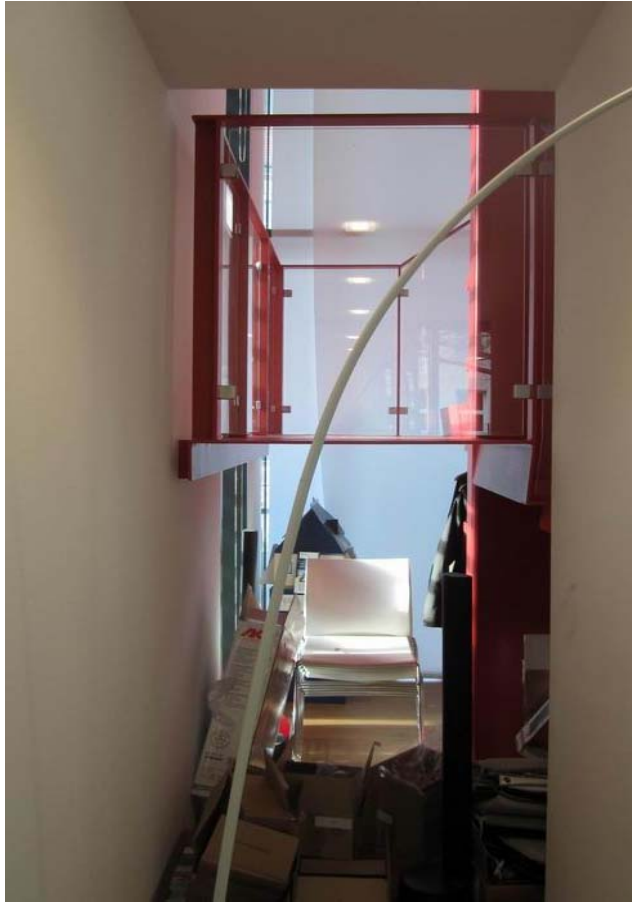


Bild 5: Blick vom Wohnraum zum Treppenpodest.



Bild 6: Blick vom Wohnraum zum Flur und Treppenhaus

Auf dem Bild 5 sieht man die Stahlkonstruktion des Treppenpodestes und die Brüstungen aus Glas. Die Glasscheiben der Treppenbrüstung haben unten und auf beiden Seiten einen umlaufenden Luftspalt, ungefähr 3 cm breit. Zwischen dem Handlauf oben und der Decke des Wohnraums befindet sich ein etwa 6 cm breiter Spalt. Die äußere Glasfassade ist auf diesem Foto abgedeckt durch einen verschiebbaren Sichtschutz.

Die Bilder 5 und 6 zeigen die beiden Verbindungen zum Treppenhaus im Erdgeschoss.

Das Treppenhaus hat eine lichte Höhe von 5,6 m.

Neben der Glasfassade auf der Westseite befindet sich auf der Südseite ein Fensterstreifen von unten bis oben im Treppenhaus. Die lichte Breite beträgt 0,84 m.

5 Messstellen

Es wurden drei Stative mit Thermoelementen zur Messung aufgestellt, um vertikale Temperaturprofile der Luft aufzunehmen. Die fünf Messstellen wurden am Stativ jeweils in einer Entfernung von 5 cm und 10 cm von Boden und Decke, sowie eine Messstelle in halber Raumhöhe angeordnet.

Folgende Messpositionen wurden ausgewählt (siehe Bild 7)

1. EG, an der linken Ecke Flur/Wohnraum (Bild 6)
2. EG, im Wohnraum
3. OG, an der rechten Ecke Treppe/OG - Flur

Die oberen und unteren Thermoelemente wurden wandnah angebracht, weil dort die stärkste Strömung zu erwarten ist.

Die Strömungsprofile wurden im EG am Eintritt des Flures in den Wohnraum gemessen. Dort liegt eine stabile, über die Flurbreite gleichmäßig verteilte Strömung vor.

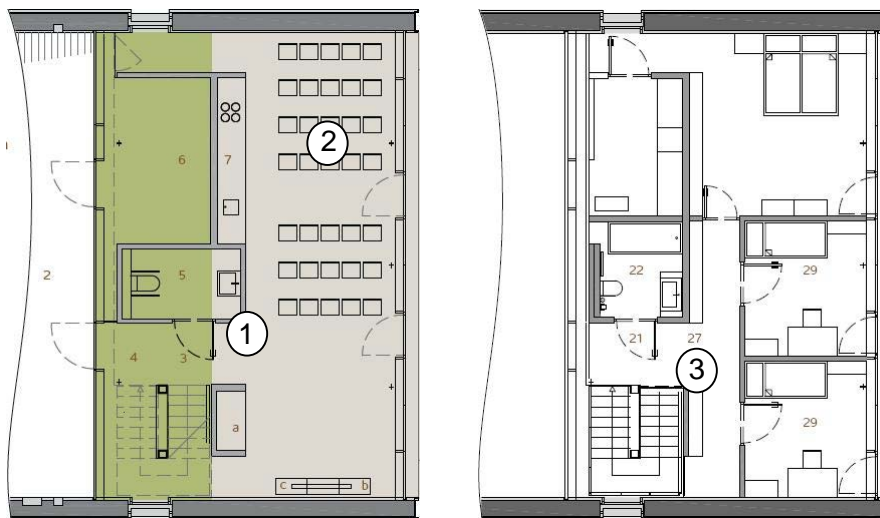


Bild 7: Messpunkte im Haus,

- 1: Temperatur EG, Luftgeschwindigkeit
- 2: Temperatur EG
- 3: Temperatur 1OG

6 Messgeräte

Folgende Messgeräte wurden benutzt

- Agilent Datalogger Typ 34970A in Verbindung mit Thermoelementen vom Typ K zur Temperaturmessung und Luftgeschwindigkeitssonden vom Fabrikat TSI Air Velocity Transducer Model 8470-10-A
- Messgerät Testo Typ 400 mit Geschwindigkeitssonde Typ 0628.000
- Rauchröhrchen, Firma Auer
- Nebelgenerator, Firma Safex mit langzeitbeständigem Nebelfluid

7 Messergebnisse

7.1 Strömung im Treppenhaus (qualitativ)

Die Strömung im Treppenhaus ist nicht zweidimensional darstellbar. Grob vereinfacht kann man aber sagen, dass die Luft an den Glasflächen im Treppenhaus nach unten strömt und sich in dem Teil des Treppenhauses, der auf der Wohnraumseite liegt, nach oben bewegt (Bild 8) .

Dieses einfache Bild gilt für die fassadennahen Bereiche und für den Teil des Treppenhauses auf der Wohnraumseite, der wie ein Auftriebsschacht wirkt (Bilder 8, 9 und 10) .



Bild 8: Auftriebsströmung im Treppenhaus auf der Wohnraumseite



Bild 9: Strömung über der Brüstung am Treppenpodest vom Wohnraum nach oben ins Treppenhaus



Bild 10: Auftriebsströmung über der Treppe auf der Wohnraumseite (OG)



Bild 11: Abwärtsströmung im Treppenhaus auf der Fassadenseite, wenn im OG nicht geheizt wird

Wenn im OG nicht geheizt wird, bewegt sich neben der Abwärtsströmung an der Fassade auch kalte Luft von oben in Bodennähe über den Flur zur Treppe auf der Fassadenseite und strömt über die Treppenstufen nach unten (Bild 11), aber nur bis zum Treppenpodest. Dadurch strömt keine kalte Luft vom Treppenpodest durch den schmalen Spalt in der Brüstung am Podest in den Wohnraum. Durch die gesamte Öffnung vom Wohnraum zum Treppenpodest (Bild 9) und im Treppenhaus auf der Wohnraumseite (Bilder 8 und 10) strömt die Luft nach oben. Dieses Strömungsbild stellt sich bis auf die erwähnte Abwärtsströmung auf der Treppe bei beheiztem und unbeheiztem Obergeschoss ein.

Die mit Hilfe von Strömungsröhrchen und einem Nebelgenerator visualisierte Strömung wurde ebenfalls durch Filmaufnahmen dokumentiert. Diese sind der CD in Anhang 3 zu entnehmen.

7.2 Strömung vom Flur in den Wohnraum

Nur im unteren Bereich des Flures (vom Boden bis 1,3 m Höhe) strömt Luft in den Wohnraum (Bild 12). Diese stabile Strömung lässt sich zur Volumenstrombestimmung nutzen.

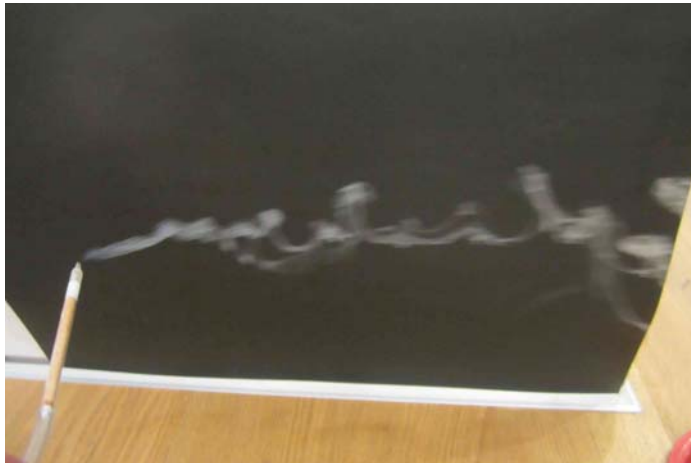


Bild 12: Strömung vom Flur in den Wohnraum in Bodennähe

Die Geschwindigkeit wurde mit einer Hitzdrahtsonde in verschiedenen Höhen in Flurmitte gemessen. In Bild 13 sind die Ergebnisse dargestellt. Dabei ist die Kurve $t_{\text{oben}} = \text{unten}$ für den Fall 1, beide Etagen beheizt, und die Kurve $t_{\text{oben}} < \text{unten}$ für den Fall 2, nur EG beheizt, erfasst worden.

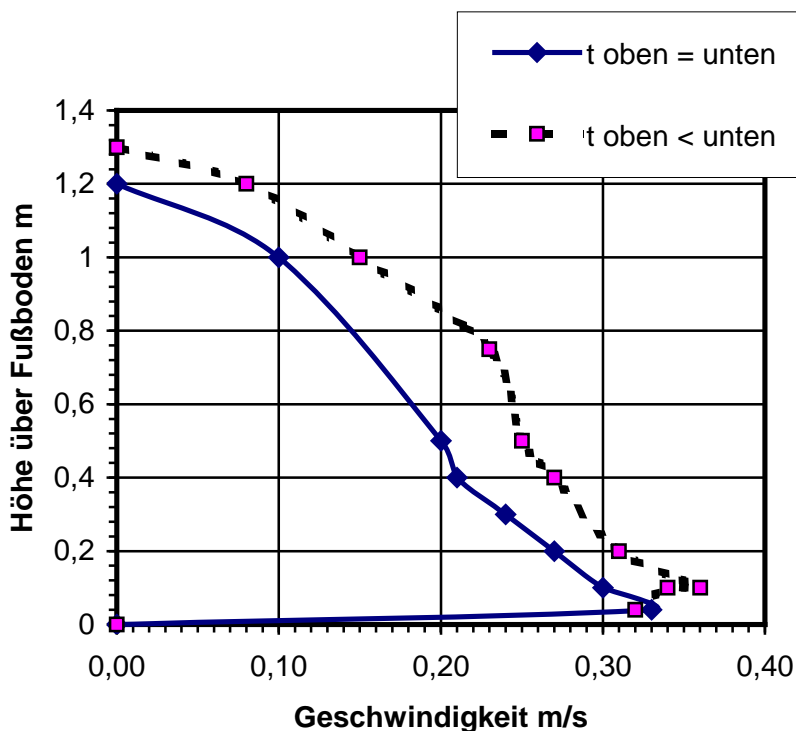


Bild 13: Luftgeschwindigkeit am Eintritt vom Flur in den Wohnraum im EG.

1. $t_{\text{oben}} = \text{unten}$: EG und OG beheizt (26.01.14)
2. $t_{\text{oben}} < \text{unten}$: nur EG beheizt (27.01.14)

Bei Kurve $t_{\text{oben}} < \text{unten}$ wurde im OG gar nicht oder wenig geheizt.

Mit den gemessenen Geschwindigkeiten lassen sich die Volumenströme berechnen. Die Breite des Flurs beträgt 1,50 m. Es liegt eine turbulente Strömung vor. Daher kann man den Mittelwert der Geschwindigkeit durch Multiplikation der in Strömungsmitte gemessenen Geschwindigkeit mit dem Faktor 0,85 berechnen. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Messungen für die beiden betrachteten Fälle zu sehen.

Tabelle 1: Luftvolumenströme am Wohnraumeintritt

Variante	Beheizung	Volumenstrom m ³ /h
1	EG und OG	1.121
2	nur EG	1.470

Die Luft tritt mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,36 m/s in den Wohnraum ein und breitet sich radial im Raum aus, so dass die Geschwindigkeit im Raum schnell abgebaut wird. Der Turbulenzgrad liegt im bodennahen Bereich unter 10 %. Der niedrige Turbulenzgrad mag eine Erklärung sein, warum es nur wenige Beschwerden über Zegerscheinungen gegeben hat. Die Lufttemperaturen sind u. a. in Bild 15 dargestellt.

7.3 Temperaturprofile

Die Temperaturprofile an den oben genannten 3 Messorten werden in den folgenden Bildern 14 bis 18 wiedergegeben:

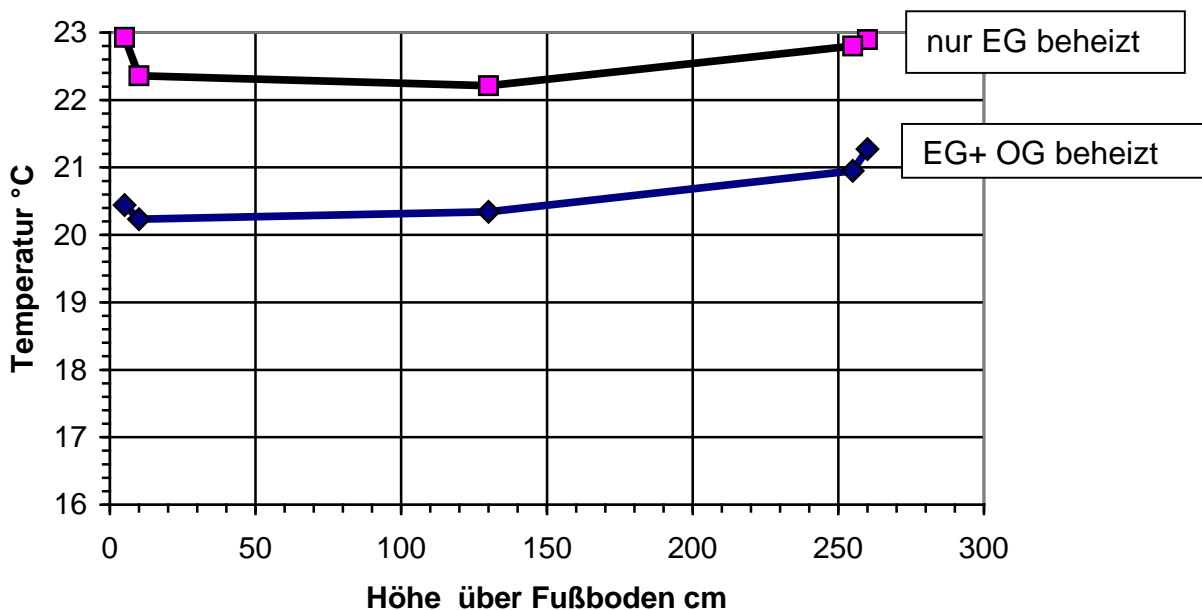


Bild 14: Vertikale Temperaturprofile im Wohnraum EG, Messpunkt 2

Im den Diagrammen sind jeweils zwei Temperaturprofile dargestellt. Die obere Kurve in Bild 14 (Fall 2) stellte sich am 27.1.14 ein, als nur das Erdgeschoss beheizt wurde, die untere Kurve (Fall 1) entsprechend für die gleichzeitige Beheizung von EG und OG am 26.01.14. Die Verschiebung des Temperaturniveaus erklärt sich durch eine Anhebung der Solltemperatur für den Fall 2 ohne Heizung im OG. Sie wurde wie schon erwähnt vorgenommen, um die Differenz zur Außentemperatur zu erhöhen.

In dem Bereich der Messstelle 2 treten keine erhöhten Geschwindigkeiten auf, weil die Messstelle weit vom Eingang entfernt liegt.

Auf Bild 14 sieht man die etwas erhöhte Temperatur am Boden und an der Decke bedingt durch die Fußbodenheizung. Die Fußbodenheizung erwärmt die Decke durch Strahlung. Der Temperaturverlauf insgesamt ist verhältnismäßig gleichmäßig ($\pm 0,4$ K). Die Profile sind ähnlich und lediglich um 2 K verschoben.

Die Messstelle 1 am Eingang in den Wohnraum im EG zeigt viel größere Unterschiede (Bild 15) zwischen Boden und Decke. Am Boden sind die Temperaturen um 3 bis 4 K niedriger als an der Decke. Das ist mit der Kaltluftströmung aus dem Treppenhaus zu erklären. Der Abstand zwischen beiden Profilen ist allerdings kleiner als bei der Messstelle im Raum. Die Temperaturdifferenz zwischen Boden und Decke ist mit 2,5 K kleiner als bei der Messung am 26.1.14. Das lässt sich durch zwei Einflüsse erklären. Der Volumenstrom ist größer und die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ist kleiner. Die Außentemperatur ist angestiegen, die Innentemperatur allerdings auch. Die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ist von 31,4 K am 26.1.14 auf 26,5 K am 27.1.14 gefallen.

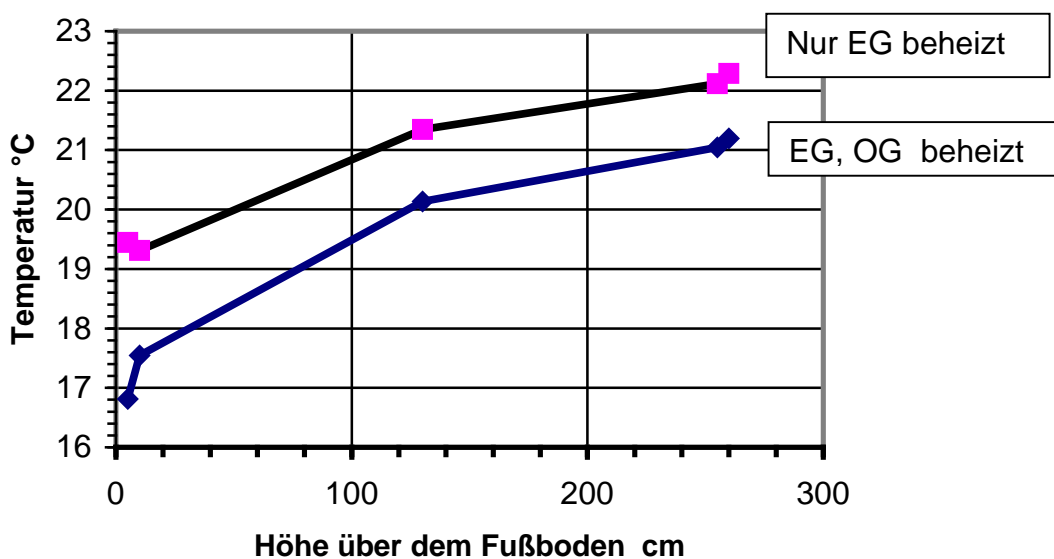


Bild 15: Vertikale Temperaturprofile am Eintritt des Flurs in den Wohnraum EG, Messpunkt 1

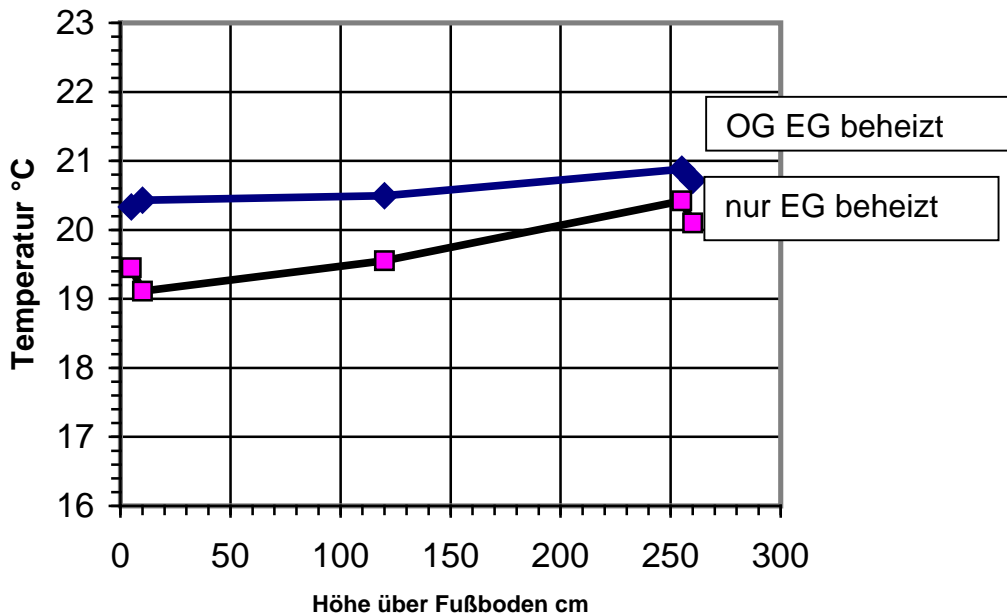


Bild 16: Vertikale Temperaturprofile am Eintritt des Flurs in das Treppenhaus im OG, Messpunkt 3

Bild 16 zeigt das Temperaturprofil am Eintritt des Flurs in das Treppenhaus im OG. Die obere Kurve bei beheiztem OG zeigt nur geringe Unterschiede zwischen oben und unten (ca. 0,5 K). Das kann aber bereits eine Strömung vom OG zum Treppenhaus zur Folge haben.

Entscheidend für die Strömung im Treppenhaus sind die Differenzen zwischen den Temperaturen in der Nähe des Treppenhauses, also die Differenzen in den Bildern 15 und 16. Um das besser sehen zu können, sind die Profile noch einmal anders aufgetragen. Bild 17 zeigt die Temperaturprofile in Treppenhausnähe vom 26.1.14 und Bild 18 die Profile vom 27.01.14.

Wenn oben und unten geheizt wird, sind die Differenzen zwischen den Temperaturen in der Nähe der Decke fast null. Deshalb findet kein bemerkbarer Luftaustausch zwischen den Etagen statt.

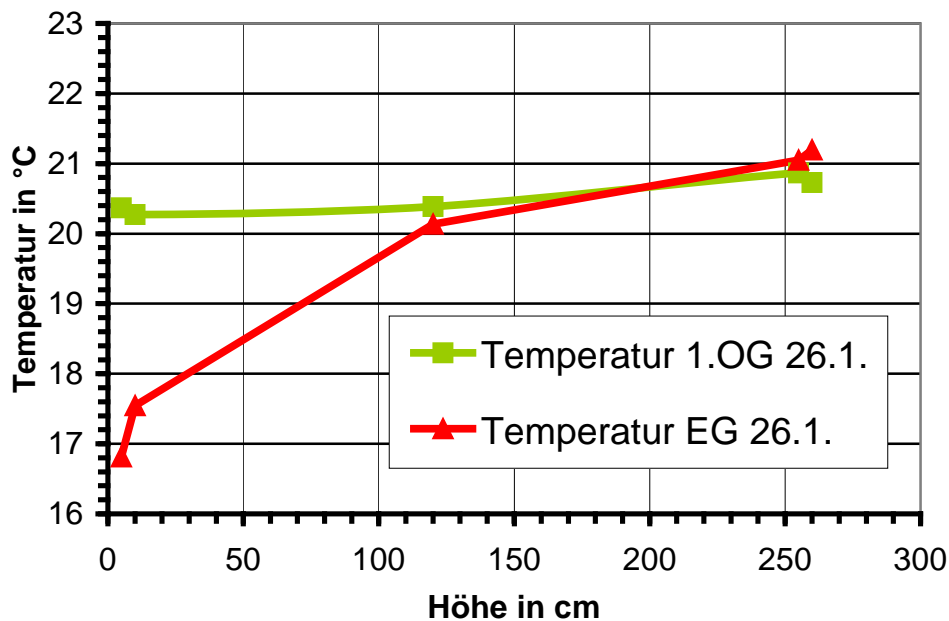


Bild 17: Vertikale Temperaturprofile bei beheiztem EG und OG (Fall 1)

Bild 17 zeigt, dass im Fall 1 die Temperatur an der Decke des EG ca. 0,6 K höher ist als die Temperatur im Fußbodenbereich des OG.

Bei der Strömung im Treppenhaus nach unten kühlt sich die Luft stark ab. Die Temperaturdifferenz zwischen Boden und Decke im Erdgeschoss ist mit ungefähr 4 K verhältnismäßig groß. Das ist durch den Kaltluftabfall an der Fassade des Treppenhauses zu erklären, der sich im OG nicht auswirkt. Er hat den gemessenen Volumenstrom von 1.121 m³/h zur Folge.

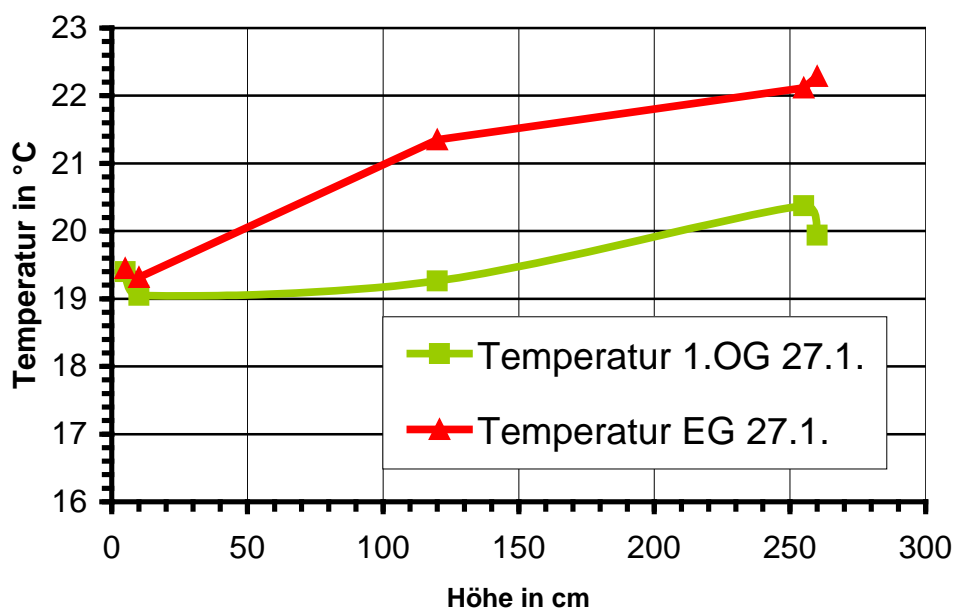


Bild 18: Vertikale Temperaturprofile beim unbeheizten OG

Wenn im OG nicht geheizt wird (Bild 18), ist die Temperatur an der Decke im EG ungefähr 2 K höher als an der Decke im OG. Dadurch strömt Luft im Flur entlang der Decke des EGs, durchs Treppenhaus in das Obergeschoss. Diese zusätzliche Luftbewegung erhöht den Gesamtvolumenstrom im Treppenhaus und am Eingang in den Wohnbereich auf 1.470 m³/h. Der höhere Volumenstrom führt dazu, dass die Differenz am Boden zwischen oben und unten im EG sogar kleiner wird als bei der Strömung am 26.01.14. Am Boden sind die Temperaturen im EG und OG gleich groß. Das ist möglicherweise damit zu erklären, dass die kalte Luft, die aus dem OG kommt, sich nicht oben im Treppenhaus mit der Auftriebströmung vermischt und nicht gemeinsam am Fenster nach unten strömt und sich dabei weiter abkühlt, sondern über den Flur und den oberen Teil der Treppe (Bild 11) nach unten strömt und sich erst im Bereich des Treppenpodestes mit der anderen Abwärtsströmung an der Fassade vermischt. Die Übereinstimmung der Temperaturen am Boden kann aber auch zufällig sein und wurde nicht näher untersucht.

7.4 Vergleich mit der Theorie

Nach Kriegel, B. [1]: „Fallströmungen vor Abkühlflächen in Gebäuden und mögliche Schutzmaßnahmen, Dissertation TU Berlin, 1973“ entsteht an kalten Raumwänden ein Kaltluftabfall, wie in Bild 19 als Massenstrom über der Höhe der Wand dargestellt.

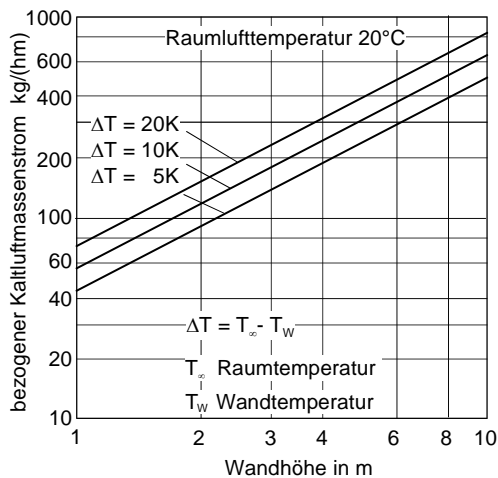


Bild 19: Kaltluftabfall an einer kalten Wand nach Kriegel [1]

Bild 19 gibt den Massenstrom an, der je Meter Fassadenbreite an kalten Flächen mit verschiedenen Höhen und Oberflächentemperaturen nach unten strömt. Die Temperaturdifferenz ΔT ist die Differenz der Temperatur im Raum und der Scheibenoberfläche innen. Man sieht, dass der Massenstrom ungefähr proportional zur Höhe und Breite, also der Fläche der Wand anwächst, während der Einfluss der Untertemperatur mit der 3. Wurzel der Temperatur-Differenz einwirkt. Eine Halbierung der Temperaturdifferenz zwischen Wand und Raumluft, also eine Verbesserung der Wärmedämmung der Scheibe um den Faktor 2, reduziert den Kaltluftstrom nur um den Faktor 1,3. Deshalb können auch Wände mit guter

Wärmedämmung sehr viel Luft in Bewegung setzen, wenn sie entsprechend groß sind.

Die Massenströme lassen sich näherungsweise durch die im Bild 19 wiedergegebenen Geraden darstellen. Für sie gilt näherungsweise ($\pm 10\%$) die Beziehung [2]:

$$\dot{m} = (25 - 30) l L \Delta t^{1/3} \quad (1)$$

\dot{m} auf die Wandbreite l bezogener Massenstrom in kg/(hm)

l Wandbreite in m

L Höhe der Wand in m; $1 < L < 10$,

Δt Temperaturdifferenz Raum-Wand in K; $5 < \Delta t < 20$

Für kleinere Temperaturdifferenzen gilt die Gleichung offenbar auch noch. Die Temperaturdifferenz wurde abgeschätzt mit folgernden Annahmen:

- Wärmedurchgangskoeffizienten U der Scheibe ($U = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$),
- der Temperaturdifferenz Innenraum - außen (30 K),
- Wärmeübergangskoeffizienten innen von $\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Die Temperaturdifferenz ergibt sich daraus zu ungefähr 2,1 K.

Weitere Annahmen:

- Dichte der Luft $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$.
- Glasfläche im Treppenhaus $5,6 \cdot 5 \text{ m}^2 = 28 \text{ m}^2$
- Glasfläche im EG oder OG $2,6 \cdot 11 = 28 \text{ m}^2$.

Alle drei Fensterflächen sind ungefähr gleich groß.

Die Volumenströme für eine Wand mit einer Fläche 28 m^2 sind nach Gleichung 1 mit einer Konstanten von 27,5 abhängig von der Temperaturdifferenz (Raum-Scheibenoberfläche) in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Kaltluftabfall an einer kalten Wand (28 m²)

Temperaturdifferenz Raum – Scheibe innen K	Volumenstrom in m³/h
1	642
2,1	822
3	925
4	1.018
5	1.097

Der so berechnete Volumenstrom ist um 27% kleiner als der gemessene. Dafür gibt es verschiedene Erklärungen. Die Gleichung 1 wird mit einer Unsicherheit von $\pm 10\%$ abgeschätzt, die zusätzliche Wärmeleitung durch die Wände und Speichereffekte der Wand wurden nicht berücksichtigt, und es ist möglich, dass auch schon bei Beheizung des OG ein schwacher Luftstrom aus dem Obergeschoss in das Treppenhaus strömt.

Das Temperaturprofil auf Bild 17 vom 26.01.14 zeigt im OG eine Differenz von oben nach unten von 0,6 K. Das bedeutet, dass auch bei der Beheizung beider Etagen ein Teilluftstrom über das Treppenhaus ausgetauscht wird.

7.5 Heizlast der Luftströmung

Mit den Volumenströmen aus Tabelle 1 und den Temperaturprofilen lässt sich die thermische Leistung der Strömungen schätzen. Bei den beiden Messzeiten war die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen wetterbedingt unterschiedlich. Deshalb wird der gemessene Volumenstrom 1a auf die Temperaturdifferenz der 2. Messung umgerechnet (1b), damit die Zunahme des Volumenstroms gebildet werden kann zwischen den Fällen 1 und 2.

Tabelle 3: Luftvolumenströme und Leistung der Luft am Wohnraumeintritt

Fall	Beheizung	Volumenstrom m³/h	Temperatur- Differenz K	Leistung W
1a	EG und OG	1.121	ca. 2,1	785
1b	EG und OG	1.060		
2a	nur EG	1.470	ca. 1,9	931
2b	Differenz 2a-1b	410	2	279

Die Leistungen in Tabelle 3 sollen verglichen werden mit den erwarteten Leistungen aus einer Abschätzung der Heizlasten in den Räumen. In der Tabelle 4 ist ein Überblick über die erfassten Temperaturen und Temperaturdifferenzen zur Außenluft dargestellt. Diese Zahlen wurden aus den Aufzeichnungen des Gebäudemonitorings entnommen.

Tabelle 4: Temperaturen der Räume und Spreizung zur Außentemperatur

Datum	26.01.2014 20:15 h	27.01.2014 12:30	26.01.2014 20:15 h	27.01.2014 12:30
Raum:	Temperatur in °C	Temperatur in °C	Delta t innen – außen, in K	
Außen	- 10,6	-3,7	-	-
Essen/ Wohnen	20,8	22,8	31,4	26,5
Kind 1	22,0	20,1	32,6	23,8
Kind 2	20,7	19,5	31,3	23,2
Eltern	21,1	20,5	31,7	24,2
Treppenhaus	21,0	21,5 (geschätzt)	31,6	25,2

In Tabelle 5 sind die Heizlasten dargestellt, welche mit den Temperaturen aus Tabelle 4 berechnet wurden. Es werden die Flächen der Fenster im Gebäude verwendet, welche die hauptsächliche Heizlast verursachen.

Tabelle 5: Heizlasten Räume Effizienzhaus in W

	Höhe*		26.01.2014	27.01.2014	26.01.2014	27.01.2014
	Breite	Fläche	20:15 h	12:30	20:15 h	12:30
Raum	m*m	m ²	Temperatur-Differenz in K	Temperatur-Differenz in K	Leistung W	Leistung W
Essen/ wohnen	2,6*11,3	29,4	31,4	26,5	(646)	(545)
Kind 1	2,6*4,5	11,7	32,6	23,8	(267)	195
Kind 2	2,6*3,3	8,6	31,3	23,2	(188)	139
Eltern	2,6*3,3	8,6	31,7	24,2	(191)	145
Treppen- haus	5,6*5	28	31,6	25,2	619	494
Summe ohne die Zahlen in Klammern					619	973

Ein Vergleich der Heizlast der Strömung (Tabelle 3) mit der geschätzten Heizlast durch Transmission an den Fenstern (Tabelle 5) wird noch einmal in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tabelle 6: Vergleich Leistung der Luftstrahlen und Heizlast der Fenster in W

		26.01.2014	27.01.2014
Leistung der Luftstrahlen	Gesamt	785	931
Heizlast	Gesamt	619	973
	Treppenhaus	619	494
	OG	-	479

Im Fall 1 (am 26.01.14) ist die Strahlleistung (785 W) größer als die Heizlast des Treppenhauses (619 W). Es wird also auch in diesem Fall ein Teil der Heizleistung des OG vom EG übernommen. Am 27.01.14 stimmt die Strahlleistung (931 W) recht gut mit der Summe der Heizlasten vom Treppenhaus überein, (931 W) und (973 W) Obergeschoss.

Aus den Berechnung ist ersichtlich, dass das Erdgeschoss bei abgeschalteter Heizung im OG die Beheizung des gesamten Gebäudes übernimmt, insbesondere auch die Beheizung des Obergeschosses. Darum ist die Abkühlung im

Obergeschoss auch verhältnismäßig niedrig (s. Anhang 2). Die tiefste Temperatur im Raum „Kind 1“ liegt bei 19,5 °C bei 22,5 °C im EG.

Bei beheiztem OG wird auch ein Teil des OG vom EG geheizt, wenn die Temperatur im OG etwas niedriger ist als im EG. Das zeigt die Messung am 26.01.14., bei der die Temperatur im OG etwas niedriger als im EG war. Das sollte durch entsprechende Regelung der Temperaturen verhindert werden.

Im Fall 2 zeigt sich, dass die Heizlast des Obergeschosses zu der Strömung im ganzen Gebäude einen zusätzlichen Luftstrom hinzufügt, wie es auch erwartet wurde.

7.6 Vermeidung der Kaltluftströmung

Die Kaltluftströmung aus dem Obergeschoss lässt sich wie erwähnt vermeiden, wenn die Temperatur im OG gleich oder etwas größer ist als im EG.

Für das Treppenhaus gibt es mehrere Möglichkeiten, die Kaltluftströmung zu vermeiden.

Bei klimatisierten Gebäuden werden häufig sogenannte Fensterblasanlagen verwendet, die mit erwärmter Luft dem Kaltluftabfall der Strömung entgegenarbeiten. Dabei sollte die Heizleistung der Fensterblasanlage der Heizlast des Kaltluftabfalls entsprechen. Das wird in [2] näher ausgeführt. Diese Lösung ist hier aber nicht angebracht.

Im vorliegenden Fall würde die Strömung erheblich reduziert, wenn die Heizlast des Treppenhauses durch eine Heizung im Treppenhaus abgedeckt würde. Die Heizlasten von EG, OG und Treppenhaus sind ungefähr gleich groß. Die Bodenfläche des Treppenhauses ist aber viel kleiner als die der Geschosse, so dass die Heizung im Boden allein ohne erhöhte Vorlauftemperaturen nicht ausreicht. Deshalb müsste eventuell eine Wand- oder Profilheizung im unteren Bereich zusätzlich angebracht werden, wenn die Bodenfläche dafür zu klein ist. An der Oberkante des Erdgeschosses muss im Treppenhaus und im Wohnraum die gleiche Temperatur herrschen.

Es bestätigt sich hier wie überall in der Raumluftechnik, dass die Heizung möglichst da anzubringen ist, wo die Heizlast anfällt.

Eine weitere klassische Möglichkeit besteht darin, das Treppenhaus durch Wände und eine Tür vom Wohnbereich vollkommen abzutrennen. Dabei würde die großzügige Architektur leiden, und im unteren Teil des Treppenhauses würde sich eine tiefere Temperatur einstellen. Beim Öffnen der Tür entsteht dann eine störende Kaltluftströmung im EG vom Flur in den Wohnraum.

8 Zusammenfassung

Im Effizienzhaus Plus, 10623 Berlin, Fasanenstraße 87 a, treten Kaltluftströmungen vom offenen Treppenhaus in den Wohnbereich auf. Besonders dann, wenn im Obergeschoss nicht geheizt wird, um dort eine niedrigere Lufttemperatur zu erzielen.

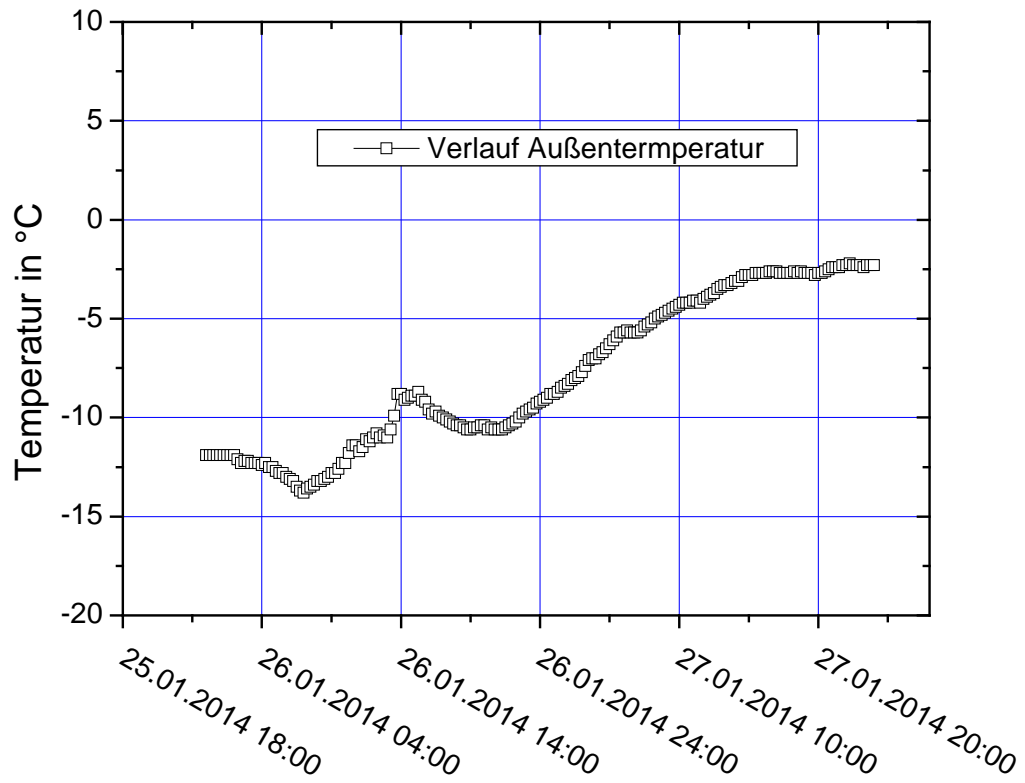
Die Ursache der Strömung und ihre Größenordnung sollte ermittelt werden. Bei niedrigen Außentemperaturen um $-8^{\circ} \pm 4^{\circ} \text{C}$ wurde die Strömung beobachtet und für zwei Fälle gemessen. Fall 1, bei dem oben und unten normal geheizt wurde und für den Fall 2, bei dem die Heizung oben weitgehend abgeschaltet war. Das Treppenhaus wird nur auf einer kleinen Fläche im Flur beheizt.

Es zeigte sich, dass im Fall 1 bereits große Luftströme durch den Kaltluftabfall an der Glasfassade auftreten. Sie entsprechen tendenziell den Erfahrungswerten aus der Literatur. Bei beheiztem Obergeschoss strömen $1.121 \text{ m}^3/\text{h}$ Luft in den Wohnraum. Wenn das Obergeschoss nicht beheizt wird, erhöht sich der Kaltluftstrom auf $1.470 \text{ m}^3/\text{h}$, und die Heizleistung des Strahles, der in den Wohnraum eindringt, von 785 W auf 931 W . Entsprechend muss die Heizleistung der Fußbodenheizung im EG und damit die Vorlauftemperatur zunehmen, die auch im Normalbetrieb schon verhältnismäßig hoch ist. Die Temperaturabsenkung im OG ist begrenzt, weil das Erdgeschoss die Heizung des Obergeschosses zum großen Teil übernimmt.

Eine mögliche Lösung zum Vermeiden des Kaltlufteintritts in den Wohnraum ist es, das Treppenhaus vom Wohnbereich durch eine Tür und Wände abzutrennen. Diese Maßnahme ist allerdings nur bei geschlossener Tür wirksam. Wird die Tür geöffnet, ist die auftretende Kaltluftströmung stärker als beim gegenwärtigen Zustand, weil sich die Luft im unteren Teil des Treppenhauses stärker abkühlt.

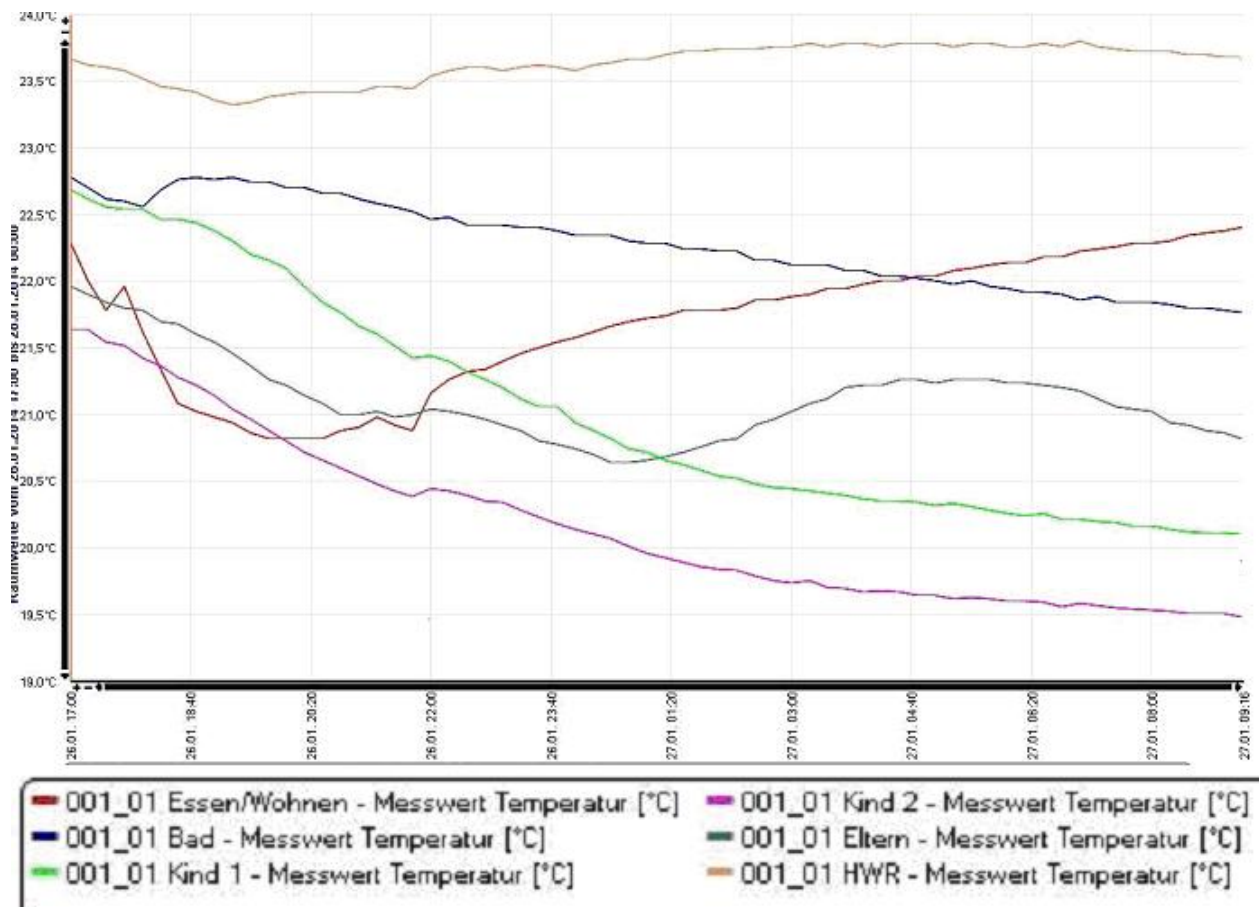
Die richtige Lösung wäre es, das Treppenhaus so zu beheizen, dass die anfallende Heizlast erbracht wird. Die Heizlast sollte generell durch gute Wärmedämmung so klein wie möglich gehalten werden, was im vorliegenden ausgeführten Fall nicht mehr möglich ist.

Anhang 1: Verlauf Außentemperaturen, Aufzeichnung Wetterstation



Anhang 2: Temperaturverläufe in den Räumen

(Auszug GLT, per Mail durch Herrn Walther, 29.1.2014)



Anhang 3: CD Strömungsvisualisierung

Auf der CD befinden sich die Videos zur Strömungsvisualisierung sowie der Bericht als Word und Adobe PDF Dokument. Folgende Filmdateien befinden sich auf der CD

- EG Flur Strömung Boden
- EG Flur Strömung Decke (1)
- EG Flur Strömung Decke (2)
- EG Flur Strömung Decke (3)
- EG Wohnbereich Boden Strömungsverteilung
- Treppenhaus Brüstung Überströmung aus dem EG
- Treppenhaus EG Einströmung
- Treppenhaus OG Auftriebsströmung (1)
- Treppenhaus OG Auftriebsströmung (2)