

## Bolin, Thermoaktive Bauteile... Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b> .....	1
1.1 Prädiktion und Adaption bei der Steuerung von thermoaktiven Bauteilsystemen: Möglichkeiten und Potenziale. ....	1
1.2 Steuerung versus Regelung. ....	5
<b>2 Heizen und Kühlen mit thermoaktiven Bauteilsystemen</b> .....	9
2.1 TABS: Begriffsbestimmung und Bauarten .....	9
2.2 Energiebereitstellung für TABS. ....	11
2.3 Typische Kennzahlen beim Betrieb von TABS. ....	12
2.4 TABS-Zonierung. ....	14
2.5 TABS-Hydraulik .....	16
2.6 Wärmeübertragung zwischen TABS-Oberfläche und Raumluft. ....	19
2.7 Behaglichkeit in TABS-beheizten Räumen. ....	22
<b>3 Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen</b> .....	25
3.1 Charakterisierung und Modellbildung der TABS-Regelstrecke .....	25
3.2 Stelleinrichtung TABS-Zirkulationspumpe. ....	32
3.3 Standard-TABS-Regelungen. ....	34
<b>4 Vorhersagemethoden in der TABS-Steuerung</b> .....	45
4.1 Multiple Lineare Regression MLR .....	45
4.2 Model Predictive Control (MPC). ....	49
<b>5 Adaptive und Prädiktive TABS-Steuerung AMLR</b> .....	53
5.1 Speichermodell zur Berücksichtigung der im Bauteil speicherbaren Energie. ....	53
5.2 TABS als dynamisches Widerstands-Kapazitäten-Modell (RC-Modell). ...	57
5.3 TABS als stationäres Widerstands-Kapazitäten-Modell (RC-Modell) ...	60
5.4 PID-Implementierung für die Regelung mit AMLR. ....	62
5.5 Prädiktion der dem Bauteil zuzuführenden Energie .....	63
5.6 Schematische Darstellung der AMLR-basierten TABS-Steuerung. ....	65
5.7 Einbindung von AMLR in die Gebäudeautomation .....	68
<b>6 Erprobung AMLR</b> .....	71
6.1 Validierung des dynamischen TABS-RC-Modells im Testlabor. ....	75
6.2 Evaluierung der AMLR-TABS-Steuerung mit Hilfe von Model-in-the-Loop (MiL) Simulationen. ....	76
6.3 Erprobung der AMLR-TABS-Steuerung in einer Laborumgebung. ....	89
6.4 Erprobung der AMLR-TABS-Steuerung in Real-Gebäuden. ....	96
6.4.1 IWB CityCenter. ....	97
6.4.2 Seminargebäude E der Hochschule Offenburg .....	106

6.5 Zusammenfassung der Messergebnisse aus dem Gebäudebetrieb. . . . .	123
7 Zusammenfassung und Ausblick. . . . .	125
Literatur. . . . .	127
Stichwortverzeichnis. . . . .	133

**1.1 Prädiktion und Adaption bei der Steuerung von thermoaktiven Bauteilsystemen: Möglichkeiten und Potenziale**

In den letzten Jahren erfahren Thermoaktive Bauteilsysteme, kurz TABS, in der Architektur mehr und mehr Zuspruch, da sie durch ihre Gebäudeintegration optisch nicht zu sehen sind und sowohl Heiz- als auch Kühloptionen für den Raum bieten. Sie sind mit der enormen thermischen Masse der Gebäudedecken, Gebäudeböden aber auch der Wände gekoppelt und sind daher speicherbehaftete Heiz- und Kühlsysteme. Bei der Wärmeübertragung an den Raum handelt es sich im Grunde um einen Speicherlade- und -entladevorgang. Bedingt durch die große Oberfläche der beheizten bzw. gekühlten Bauteile eines mit TABS klimatisierten Raumes, kann der Beladebetrieb mit geringen Übertemperaturen (30 °C Vorlauftemperatur beim Heizen und 16 °C beim Kühlen) vorgenommen werden.

Ist ein Bauteil erst einmal beladen, läuft der Entladevorgang vollkommen eigenständig und unregelt mit enormer Zeitverzögerung ab. Für die Regelungstechnik steckt hier genau die Herausforderung. Setzt man für die Automatisierung der Regelvorgänge für das Heizen und Kühlen mit TABS herkömmliche Regelstrategien, wie eine witterungsgeführte Vorlauftemperatur-Regelung (kurz WVR) ein, können diese lediglich auf die momentan gemessene Außentemperatur als Hauptstörgröße reagieren und die Soll-Vorlauftemperatur der aktuellen Außentemperatur anpassen. Die thermische Trägheit bei der Wärmeübertragung an den Raum mit TABS wird dabei kaum berücksichtigt. Auf den beheizten Raum wirken jedoch zahlreiche Störgrößen ein. Neben der Außentemperatur sind das vor allem die solare Einstrahlung durch die Fenster und die wechselnde Raumbelastung und -nutzung inklusive den darin befindlichen elektrischen Geräten. Die WVR kann jedoch zunächst nur die Störgröße Außentemperatur berücksichtigen und deren Wirkung auf den Raum abfangen, die anderen Störgrößen muss die Einzelraumregelung, falls vorhanden, ausgleichen.

**Einführung 1**

**2 1 Einführung**

sichtigen und deren Wirkung auf den Raum abfangen, die anderen Störgrößen muss die Einzelraumregelung, falls vorhanden, ausgleichen.

Ein weiterer Schwachpunkt der herkömmlichen WVR-TABS-Regelung ist, dass die zeitlichen Entwicklungen der Störgrößen bisher nicht berücksichtigt werden können. Wird beispielsweise in den Übergangszeiten aufgrund einer momentan niedrigen

Außentemperatur das Bauteil mit relativ hohen Temperaturen beladen, kann es durch einen plötzlichen Temperaturwechsel der Außentemperatur verbunden mit hohen Einstrahlungswerten am Folgetag dazu kommen, dass sich der Raum überhitzt, weil das TABS heizt, obwohl kaum Wärmebedarf im Raum besteht. Das führt zu unangenehmen Bedingungen im Raum und zu Beschwerden der Nutzer.

Es sind zwar Regelungen bekannt, die nicht die momentane Außentemperatur, sondern den Mittelwert der Außentemperatur der letzten 24 h und bereits die Prognose der mittleren Außentemperatur des Folgetages in der WVR berücksichtigen. Diese basieren aber letztlich noch immer auf der herkömmlichen WVR-Technologie. Bekannt ist auch, dass sich die Ermittlung der für die WVR erforderlichen sogenannten Heiz- bzw. Kühllinien (Solltemperaturvorgabe für die TABS-Vorlauftemperatur als Funktion der Außentemperatur) als äußerst schwierig und langwierig gestaltet. Durch aufwendige Beobachtungen des Regelverhaltens muss diese Kennlinie an den TABS-Betrieb des jeweiligen Gebäudes angepasst und ständig nachjustiert werden. Aus der Sicht der Autoren dieses Buches ist jedoch das verwendete Regelkonzept der WVR, das über keinerlei Kenntnisse des Zeitverhaltens des TABS bzw. des Verlaufs der Störgrößen verfügt, unzureichend und Ursache für die Fehlfunktionen, die letztlich zu einer Überhitzung oder Unterkühlung des Raumklimas führen, verbunden mit Unbehaglichkeit und unnötigem Energieverbrauch.

In Zeiten der digitalen Transformation mit neuen Technologien wie KI – Künstliche Intelligenz – und IoT – Internet of Things – stehen heute neue Möglichkeiten für die Steuerung und Regelung in der Gebäudetechnik zur Verfügung. So kann eine Gebäudeautomationseinrichtung

problemlos mit einem Server verbunden werden, der lokale Wetterprognosen bezüglich Außentemperatur und solarer Einstrahlung zur Verfügung stellt. Die Belegungsdaten für die zu temperierenden Räume stehen ebenfalls digital zur Verfügung.

Des Weiteren sind die Automationsstationen in Verbindung mit einem Mikro-PC in der Lage, bei der Ausführung von Stellbefehlen modellbasierte Algorithmen zu berücksichtigen, die auf die spezifischen bautechnischen Eigenschaften der zu temperierenden Zonen abgestimmt sind. So kann beispielsweise die TABS-Steuerung mit derartigen modellbasierten Algorithmen das enorm verzögerte Verhalten der jeweiligen TABS-Zone berücksichtigen und unter Kenntnis der Entwicklung von Außentemperatur, Einstrahlung und Raumbelastung genau die Menge an Heiz- bzw. Kühlenergie dem TABS zuführen, die dort auch benötigt wird. Dies geschieht dann bereits in der Nacht vorausschauend und nicht erst am nächsten Tag, wenn die Störung bereits wirksam ist und wegen der TABS-Trägheit nicht mehr ausgeglichen werden kann. Diese Problemlagen waren einer

der Hauptgründe für die Entwicklung der prädiktiven TABS-Steuerung AMLR.

3

Ein weiterer Aspekt ist die Adaption (Selbstlernfähigkeit) von Steuerungen. Bei der prädiktiven TABS-Steuerung bestand hier die Frage: Wodurch kann man davon ausgehen, dass die nächtliche Beladung wirklich zum gewünschten Erfolg, nämlich zu einem angenehmen Raumklima führt? Was passiert bei unangekündigter Nutzungsänderung, was bei Einsatz von Zusatzheiz- bzw. -Kühlsystemen im Raum, die nicht mit der TABS-Steuerung gekoppelt sind? Diese unkontrollierten Einflüsse können letztendlich die Raumtemperatur so beeinflussen, dass es trotz prädiktiver TABS-Steuerung im Raum unbehaglich wird.

Deshalb wurde bei der Entwicklung der adaptiven und prädiktiven multiplen linearen Regression, kurz AMLR, eine Adaption dieser weiteren Störeinflüsse durch Erfassung der Raumtemperatur und der eingebrachten Zusatzheiz- bzw. Zusatzkühlenergie ermöglicht. Diese momentan auftretenden Störungen können vom AMLR-Modell erfasst und so berücksichtigt werden, dass beim Ladevorgang für das TABS die vom AMLR-Algorithmus berechneten Energiepakete entsprechend angepasst werden. So kann eine über den Tag gewünschte, mittlere Raumtemperatur eingehalten werden. Damit ist es letztlich auch möglich, eine Soll-Raumtemperatur vorzugeben und die AMLR-TABS-Steuerung wird zur Regelung. In [1] wurde der adaptive und prädiktive Algorithmus AMLR für TABS in den Jahren 2011–2017 an der Hochschule Offenburg entwickelt und in verschiedenen Objekten erprobt. Die grundlegenden Überlegungen und Herleitungen, die zur Entwicklung der AMLR geführt haben, werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt sowie deren Erprobung in den verschiedenen Bauobjekten.

In Deutschland beträgt der Anteil an erneuerbaren Energiequellen bei der Bereitstellung von Strom derzeit mehr als 40 % [2]. Energiequellen aus Sonne und Wind weisen eine hohe Volatilität und erhebliche Leistungsschwankungen auf. Im Unterschied zu fossilen Energieträgern stehen sie bei Bedarf nicht per Knopfdruck zur Verfügung. Dadurch entsteht ein Bedarf an Regelleistung um Angebots- und Bedarfsspitzen auszugleichen. Speicherfähige Systeme, wie auch TABS, bieten hier die Möglichkeit Bedarfsspitzen zu glätten oder auftretende Energieüberschüsse aufzunehmen und diese zeitlich versetzt an den Nutzer abzugeben. Diese Flexibilisierung der Stromnachfrage wird auch als Demand Side Management (DSM) bzw. Laststeuerung bezeichnet.

Werden Speichersysteme, gesteuert mit diesen Methoden (DSM), beim Nutzer installiert, ermöglicht dieses Flexibilisierungspotential neue Spielräume bei der Tarifgestaltung beispielsweise für die Versorgung einer Wärmepumpe mit Antriebsstrom. Die

thermischen Speichermassen eines Gebäudes sind immens. Mit TABS lassen sich diese Massen thermisch beladen: Wärme im Winter, Kälte im Sommer, beides lässt sich aus elektrischem Strom mittels Sektorenkopplung generieren. Die für den Gebäudebedarf erforderliche Energie lässt sich mit der AMLR im Voraus berechnen. Der Zeitpunkt der Beladung der Speichermasse ist dabei in einem gewissen Maß flexibel wählbar. Mithilfe der neuentwickelten AMLR ist es nun möglich, die Beladung der TABS mit Energie neu zu denken und für die Flexibilisierung der Stromversorgung zu nutzen. Bis-

### 1.1 Prädiktion und Adaption bei der Steuerung von thermoaktiven ...

#### 4 1 Einführung

her sind hierzu noch wenige Untersuchungen erfolgt. Die Hochschule Offenburg hat, wie in diesem Buch gezeigt wird, ein Seminargebäude über mehrere Monate mit AMLR betrieben, wobei ein dynamischer Strompreis nach dem Vorbild der EEX (European Energy Exchange) Strompreise als Basis für die Flexibilisierung gewählt wurde. Untersucht wurde hierbei, wie sich die preisoptimierte Beladung der TABS auf den Komfort sowie den zu bezahlenden Strompreis auswirken [3].

Die Idee, die thermische Masse eines Gebäudes als Kurzzeitenergiespeicher für das öffentliche Stromnetz zu nutzen, wurde bereits in diversen Forschungsarbeiten, insbesondere mit Hilfe von Simulationen genauer untersucht. Dabei unterscheiden sich die Arbeiten vor allem in der Methodik, um dieses Ziel zu erreichen.

Zur Kompensation von fluktuierenden Einspeisungsspitzen von Windenergie in das Stromnetz schlagen Andersen et al. in [4] die Nutzung der Wärmekapazität von Fußböden in Einfamilienhäusern vor. Dazu setzen sie eine Wärmepumpe mit Fußbodenheizung ein. Eine große Anzahl an Wärmepumpen wird zu einem Netz zusammengeschlossen. Von jedem Haus muss ein dynamisches Modell erstellt werden, damit im Falle einer Lastverschiebung die Verletzung des thermischen Komforts verhindert wird.

Arteconi et al. untersucht in [5] das Potenzial für Lastverschiebungen durch TABS mithilfe einer Simulationsstudie anhand eines Nichtwohngebäudes. Verwendet wurde die Vorlauftemperaturregelung anhand des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur der letzten sechs Stunden. Es wurden drei unterschiedliche „Demand Side Management“ (DSM) Strategien untersucht. Da diese DSM-Strategien in ähnlicher Form in diversen anderen Forschungsarbeiten zur Anwendung kommen, werden sie im Folgenden kurz aufgelistet:

- Eine Reduzierung des Energieverbrauchs zu Zeitpunkten, in denen es Lastspitzen im Stromnetz gibt. Der Autoren geben hier als Standort Belgien an und wählen die Zeiträume zwischen 11:00 Uhr und 13:00 Uhr sowie 16:00 Uhr und 18:00 Uhr.

- Eine Zufalls-Anforderungs-Strategie, die die TABS für einen Zeitraum von 15 min deaktiviert. Damit soll das Verhalten von erneuerbaren Energien und deren fluktuierende Einspeisung in das Stromnetz simuliert werden.

- Eine Verschiebung der TABS Beladung in die Nachtstunden von 20 Uhr bis 8 Uhr.

Die Autoren fassen zusammen, dass TABS sehr gut für diese drei Arten des DSM geeignet sind. Durch eine Gebäude-, Nutzer- und eine spezifische DSM-Modifikation der Heiz- und Kühllkurve kann zudem der thermische Komfort verbessert werden. Quantitative Aussagen zur Einsparung durch DSM mit TABS werden in dieser Studie nicht vorgestellt.

Bei Braun et al. werden in [6] in Simulationen, Laborversuchen und Feldtests Einsparpotenziale durch die Nutzung der thermischen Masse eines Gebäudes ermittelt. Dabei nutzen die Autoren die Möglichkeit der Lastverschiebung in die Zeiten, in denen der Strom günstiger ist. Sie stellen signifikante Einsparpotenziale fest, die jedoch erheblich von Faktoren wie dem Energiepreis des Stromanbieters, der Nutzung sowie dem Aufbau des Gebäudes, den klimatischen Bedingungen und der Steuerstrategie abhängig sind. Insbesondere sehen die Autoren Defizite in den bisher verfügbaren Steuerstrategien. Diese beziehen die Gebäudemasse nicht in ein Lastmanagement ein.

Halvgaard et al. nutzen in [7] einen Modellbasierten Prädiktiven Controller (MPC), um eine Wärmepumpe und eine Fußbodenheizung in einem Smart Grid zu steuern. Die thermische Masse des Wohngebäudes wird für eine Lastverschiebung genutzt. Bei dem verwendeten Modell handelt es sich um ein lineares Zustandsraummodell. Es beinhaltet Wetter- und Strompreisvorhersagen. Bei der DSM-Strategie handelt es sich um eine preisbasierte Steuerung, d. h. dynamische Strompreise werden vorausgesetzt. Verglichen mit dem konventionellen Betrieb von Wärmepumpen und konstanten Strompreisen, geben die Autoren eine Einsparung von 25 % bis 35 % der Energiekosten an. Ebenfalls durch variable Strompreise und Lastverschiebungen und durch die Nutzung der thermischen Masse eines Gebäudes konnten durch einen optimalen prädiktiven Regler, je nach Gebäude Kosteneinsparungen von bis zu 14 % von Greensfelder et al. in [8] ermittelt werden.

Molitor et al. untersuchen in [9] das Lastverschiebepotential von Wärmepumpen in einem Einfamilienhaus mit konventionellen Gebäudeheizungen und Brauchwarmwasser-Erwärmung. Die Wärmepumpe versorgt zwei thermische Speicher und nutzt einen dynamischen Strompreis (acht unterschiedliche Preise pro Tag). Der übliche wärmegeführte und ein strompreisgeführter Wärmepumpenbetrieb werden miteinander verglichen. Der mittlere Strompreis für die Wärmepumpe konnte durch den strompreisgeführten Betrieb von 19,25 ct/kWh auf 14,27 ct/kWh reduziert werden.

Die hier vorgestellten Forschungsarbeiten zeigen, dass die thermische Masse von

Gebäuden bzw. deren Flächenheizsysteme durchaus Potenziale für die Flexibilisierung der öffentlichen Stromversorgung haben. Dies ist jedoch nicht Schwerpunkt des vorliegenden Buches über AMLR. Vielmehr soll damit gezeigt werden, dass durch den Einsatz von prädiktiven TABS-Steuerungen weitere Optionen für die Nutzung von TABS bei der Tarifgestaltung bestehen.

## 1.2 Steuerung versus Regelung

Am Beispiel von TABS soll die regelungstechnische Denkweise erläutert werden. In einem Regelkreis werden die Signalflüsse dargestellt, welche der Automatisierung von Abläufen dienen. Regelungstechnisches Ziel ist eine physikalische Größe, im Folgenden Regelgröße  $x(t)$  genannt, möglichst konstant auf einem vorgegebenen Sollwert  $w(t)$  zu halten. Mittels eines Reglers kann eine Anlage wie bspw. TABS, auch Regelstrecke genannt, mithilfe der Stellgröße  $y(t)$  so beeinflusst werden, dass die Einflüsse möglicher Störgrößen  $z_i(t)$  ausgeglichen werden.

Dabei wird unterschieden zwischen dem Konzept der Steuerung und der Regelung.

Eine Regelung (auch geschlossener Regelkreis und im Englischen closed loop control

## 1.2 Steuerung versus Regelung

### 6 1 Einführung

genannt) besitzt im Unterschied zu einer Steuerung (auch offener Regelkreis und im Englischen open loop control genannt) eine Rückführung der Regelgröße  $x(t)$  und vergleicht im Regler die Regelgröße kontinuierlich mit dem vorgegebenen Sollwert  $w(t)$ .

Somit entsteht ein geschlossener Regelkreis. Im Gegensatz zur Regelung wirkt bei der Steuerung die Ausgangsgröße nicht auf die Eingangsgröße zurück. Die entsprechenden Wirkungspläne sind unter Abb. 1.1 zu finden. Vorteil der Regelung ist es, dass keine Kenntnisse über die Störgrößen vorhanden sein müssen um die Regelgröße konstant zu halten. Durch eine sinnvolle Wahl des Regelalgorithmus und Kenntnisse über das Verhalten der Regelstrecke kann eine genaue und stabile Regelung realisiert werden.

Bei der Steuerung sind neben Kenntnissen über den Aufbau der Strecke auch detaillierte Informationen über die Verläufe der auftretenden Störgrößen  $z_i(t)$  erforderlich.

Erst wenn bekannt ist, wie sich die Störgrößen auf die Strecke mit der Regelgröße auswirken, führt die Steuerung auch ohne Überprüfung der Regelgröße zur Einhaltung des Sollwertes  $w(t)$  und damit zu einer erfolgreichen Steuerung.

Bei der eigentlichen TABS-Regelung oder -Steuerung stellt das TABS die Regelstrecke dar. Hier entspricht im Allgemeinen die Regelgröße  $x(t)$  der Raumtemperatur.

Wie die genaue Analyse der Regelstrecke TABS noch zeigen wird, verfügt sie über eine enorme thermische Masse mit entsprechender Speicherwirkung. Das macht sie regelungstechnisch äußerst träge, was signaltechnisch dazu führt, dass sich Störwirkungen

und Stellwirkung erst mit großer zeitlicher Verzögerung auf die Regelgröße Raumtemperatur auswirken. Dadurch ist das klassische Regelungskonzept mit Rückführung der Regelgröße infrage gestellt.

Bei der Reglerausgangsgröße, also der Stellgröße  $y(t)$ , handelt es sich bei TABS um Steuersignale für die Ansteuerung von Stellventilen, Pumpen und Regelventilen. Diese können binär, also *auf* bzw. *zu* oder *an* bzw. *aus* sein. Es können aber auch stetige Stellgrößen mit Werten zwischen 0 % und 100 % vorkommen.

7

Prinzipiell können für die Be- und Entladung von TABS der Massenstrom und die Vorlauftemperatur variiert werden. Der Massenstrom wird über Pumpen und Stellventile gesteuert. Die Vorlauftemperatur wird typischerweise mittels eines eigenen Regelkreises über ein Regelventil mit Rücklaufbeimischung geregelt. Je nach eingesetzter Anlagentechnik und Hydraulikvariante kann es ebenfalls vorkommen, dass anstatt einer Regelung der Vorlauftemperatur nur ein binäres Signal (bspw. Ein/Aus einer Wärmepumpe) als Stellgröße zur Verfügung steht. Hier wird dann mit konstanter Vorlauftemperatur gearbeitet. Zu den Hauptstörgrößen  $z_i(t)$  bei TABS gehören die inneren Lasten (verursacht durch Menschen und elektrische Geräte), die Außentemperatur und die solare Einstrahlung durch Fenster.

Im Folgenden werden einige existierende Steuer- und Regelungsstrategien zum Heizen und Kühlen mit TABS aufgezeigt. Dabei können diese in klassische Regelstrategien mit stetigen bzw. unstetigen Reglern und Regelungen mit modellbasierten Strategien unterteilt werden. Modellbasierte Strategien kommen bisher ausschließlich in Forschungsprojekten zum Einsatz.