



**Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung**

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



BBSR-Online-Publikation, Nr. 01/2015

Sondierungsstudie zur Quantifizierung von Rebound-Effekten bei der energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden/ Bundesliegenschaften

Impressum

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn

Projektleitung (Auftraggeber)

Jörg Lammers, BBSR

Bearbeitung

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin

Dr. Julika Weiß

RWTH Aachen, Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), Aachen

Dr. Ray Galvin, Prof. Dr. Reinhard Madlener

BTU Cottbus-Senftenberg, Senftenberg

Doreen Großmann, Prof. Dr. Bernd Hirschl

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Zitierhinweise

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): Sondierungsstudie zur Quantifizierung von Rebound-Effekten
bei der energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden/Bundesliegenschaften.
BBSR-Online-Publikation 01/2015, Bonn, Februar 2015.

Die von den Autoren vertretenen Auffassungen sind nicht unbedingt mit denen des
Herausgebers identisch.

ISSN 1868-0097

© BBSR Februar 2015



Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

bisherige Studien für den Wohnungsbau zeigen, dass bei der energetischen Sanierung von Gebäuden in der Realität längst nicht so viel Energie eingespart wird wie ursprünglich geplant. Danach werden nur ein Teil der theoretisch möglichen Einsparungen tatsächlich realisiert. Denn häufig verhalten sich die Gebäudenutzer nicht so energiebewusst wie erhofft.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie ergänzen Befunde für den Wohnungsbau. Untersucht wurden die Rebound-Effekte bei der Sanierung von Büro- und Verwaltungsgebäuden. Zwei Bundesbauten und zwei Gebäude des Landes Sachsen dienten als Fallstudien. Auf Basis von Interviews mit Nutzern und Fachleuten haben die Wissenschaftler Erkenntnisse über das Nutzerverhalten gewinnen können.

Die Ergebnisse zeigen, dass Sanierung und energiebewusstes Verhalten der Nutzer Hand in Hand gehen müssen. Ansonsten bleiben die Einspareffekte vergleichsweise gering. Kampagnen wie „mission E“ der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben setzen dort an. Durch Informationsangebote soll das Bewusstsein für das Energiesparen am Arbeitsplatz gestärkt werden.

Ihnen eine anregende Lektüre.

Ihr

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'H. Herrmann'.

Harald Herrmann, Direktor und Professor des BBSR

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Summary	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einführung	1
2 Begriffsdefinition und Methodik	3
2.1 Begriffsdefinition	3
2.2 Methodik	9
2.2.1 Auswahlkriterien für Fallstudienobjekte	9
2.2.2 Aufbereitung der Daten und Kalkulation des Rebound-Effekts	10
2.2.3 Durchführung von Interviews	10
2.2.4 Auswertung der Fallstudien	11
3 Stand des Wissens zum Energieverbrauch in Nichtwohngebäuden und zum Nutzerverhalten	13
3.1 Energieverbrauch und -einsparung in Nichtwohngebäuden	13
3.2 Nutzungsverhalten in Nichtwohngebäuden und Interventionen zum Energiesparen	14
3.3 Heizenergiebedarf und -verbrauch in Nichtwohngebäuden	17
3.3.1 Vergleich mit Querschnittsdatensätzen	17
3.3.2 Datensatz des IWU mit 93 Nichtwohngebäuden	17
3.3.3 Datensatz von Oschatz et al. mit Bürogebäuden	20
3.3.4 Sekundärauswertung eines zusammengesetzten Datensatzes	21
4 Fallstudien	23
4.1 Vorgehensweise	23
4.1.1 Auswahl Fallstudienobjekte	23
4.1.2 Aufbereitung der Objektdaten	23
4.1.3 Durchführung der Interviews	24
4.2 Beschreibung der Fallstudienobjekte	25
4.2.1 Hochschule für Musik Dresden Carl Maria von Weber, Außenstelle Leubnitzer Str. ...	25
4.2.2 Polizeirevier Dresden Mitte, Außenstelle Blasewitz	26
4.2.3 Zollverwaltung Flensburg	27
4.2.4 Zollamt Bremen	28
4.3 Verhalten der Nutzer/innen und Zufriedenheit	29
4.3.1 Charakterisierung der Nutzer/innen	29
4.3.2 Lüftungsverhalten	30
4.3.3 Heizungsverhalten	31
4.3.4 Sommerlicher Wärmeschutz	33
4.3.5 Unterschiede zum Verhalten im privaten Bereich	33
4.3.6 Erwartungen an die Sanierung	33
4.3.7 Interesse an den Themen Energieverbrauch und Energiesparen	34
4.3.8 Fazit zum Nutzungsverhalten	35

4.4	Energiebedarf und -verbrauch in den Fallstudienobjekten	37
4.5	Rebound-Effekte in den Fallstudiengebäuden	40
4.5.1	Hochschule für Musik, Dresden	41
4.5.2	Polizeirevier Dresden	42
4.5.3	Zollverwaltung – Flensburg.....	43
4.5.4	Zollamt – Bremen	44
4.5.5	Vergleich der Ergebnisse.....	44
5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	46
5.1	Zentrale Ergebnisse	46
5.2	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebäude	47
5.3	Bewertung und Weiterentwicklung der Methodik	48
5.3.1	Definition des Rebound-Effekts und Vergleichswerte.....	48
5.3.2	Beschaffung von Energieverbrauchs- und Bedarfswerten	49
5.3.3	Interviews mit Nutzer/innen und Fachpersonal.....	50
5.4	Handlungsempfehlungen zur Reduktion des Rebound-Effekts bzw. des Energieverbrauchs	51
6	Literaturverzeichnis	53

Anhang

Methodik zur Berechnung des Rebound-Effekts

Interview-Leitfaden Fachpersonal

Interview-Leitfaden Nutzer/innen

Einzelwerte thermischer Energieverbrauch

Vergleichswerte für den thermischen Energieverbrauch/-bedarf

Kurzfassung

Im Rahmen des Sanierungsfahrplans Bundesbauten (ESB) sollen in den nächsten Jahren zahlreiche Bundesliegenschaften umfassend energetisch saniert werden. Vor diesem Hintergrund ist die Frage von Bedeutung, ob bei der energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden Rebound-Effekte zu erwarten sind, was ggf. Ursachen dafür sind und vor allem wie diese Effekte ggf. reduziert werden können. Diesen Fragen ging das vorliegende Forschungsvorhaben im Auftrag des BBSR nach. Da anders als für Wohngebäude bisher kaum Untersuchungen zu Rebound-Effekten von Nichtwohngebäuden vorlagen, wurde mit dieser Sondierungsstudie Neuland betreten. Daher wurde zunächst eine Methodik zur Ermittlung des Rebound-Effekts und dessen Ursachen in Nichtwohngebäuden entwickelt und anschließend in vier Fallstudien erprobt. Ergänzend wurden weitere Datensätze von Nichtwohngebäuden ausgewertet, um die Erkenntnisse zu den Fallstudienobjekten einordnen zu können.

Um die Höhe des Rebound-Effekts zu ermitteln, erfolgte im Vorhaben zunächst eine Definition der unterschiedlichen Indikatoren für den Rebound-Effekt. Favorisiert wurde hierbei die **Definition des Rebound-Effekts** als Elastizität, da dieses Maß mit Verbrauch und Bedarf vor und nach Sanierung alle für den Rebound-Effekt relevanten Größen in die Berechnung mit einbezieht und robuste Ergebnisse liefert. Daneben wurden im Vorhaben zwei weitere Definitionen des Rebound-Effekts, die Energie-Performance-Lücke (EPL) sowie das Energieeinspardefizit (EED), untersucht.

Zur empirischen Untersuchung der Fragestellung wurden **Fallstudien** in zwei Bundesliegenschaften (Zollamt Bremen und Zollverwaltung Flensburg) sowie zwei Liegenschaften des Landes Sachsen (Polizeirevier Dresden und Hochschule für Musik Dresden) durchgeführt. Die Fallstudien umfassten die Ermittlung und Überprüfung der Energiebedarfs- und -verbrauchswerte, eine Begehung des Objekts und Interviews mit dem Fachpersonal sowie Nutzer/innen. Im Rahmen der Auswahl der Fallstudienobjekte sowie bei der Ermittlung der Energiebedarfs- und -verbrauchswerte zeigte sich, dass zum einen häufig keine entsprechenden Daten für den Zeitraum vor und nach einer energetischen Sanierung in Bundes- und Landesliegenschaften vorliegen bzw. zugänglich sind. Zum anderen wurde bei der Plausibilitätsprüfung festgestellt, dass diese Daten, wenn sie vorliegen, oft nicht korrekt sind. Die **Überprüfung der vorhandenen Energiekennwerte** in den Fallstudienobjekten war deshalb sehr umfangreich. Dies ist bei der weiteren Untersuchung des Themas zu berücksichtigen.

Nach erfolgreicher Ermittlung der Energiekennwerte wurden für die vier Fallstudienobjekte die **Rebound-Effekte** durch die Sanierung ermittelt. In drei der Fallstudienobjekten (Zollamt Bremen, Zollverwaltung Flensburg, Polizeirevier Dresden) traten keine (Elastizitäts-)Rebound-Effekte auf bzw. waren diese Effekte so gering, dass sie im Rahmen der Ungenauigkeit der Energiekennwerte lagen. In der Hochschule für Musik Dresden trat sogar ein deutlicher negativer Rebound-Effekt auf, das heißt nach der Sanierung werden wesentlich weniger Energiedienstleistungen als vorher in Anspruch genommen. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt ist, dass ein Teil des Gebäudes schallisoliert wurde – was zu einer zusätzlichen (nicht in der Bedarfsberechnung berücksichtigten) Dämmung führt. Neben der Berechnung des Elastizitäts-Rebound-Effekts erwies sich der Vergleich der Energie-Performance-Lücke vor und nach der Sanierung als hilfreich für die Interpretation der auftretenden Effekte. In den drei Fallstudienobjekten mit irrelevanten Elastizitäts-Rebound-Effekten lag der Verbrauch vor und nach der Sanierung geringfügig unter den Bedarfswerten.

Die Ergebnisse der Interviews zeigen, dass die Erwartungen der Nutzer/innen der Gebäude an die Sanierungen weitgehend erfüllt wurden. Allerdings bezogen sich diese Erwartungen selten auf die Energieeinsparung, sondern eher auf Komfortgewinne (weniger Zug, Schallschutz, Bedienbarkeit der Heizung, Innensanierung). Das **Lüftungs- und Heizungsverhalten** der Nutzer/innen hat sich im Vergleich zu vor der Sanierung kaum geändert. Es gibt nur sehr vereinzelt Hinweise auf Verhalten, das zu

Rebound-Effekten führen kann, zum Beispiel hat sich die Raumtemperatur vereinzelt erhöht und die Luftqualität subjektiv verschlechtert, was möglicherweise die Lüftungshäufigkeit oder -dauer erhöht. Deutlich zeigte sich dagegen bei den Interviews, dass viele Befragte an ihrem Arbeitsplatz weniger auf einen sparsamen Umgang mit Energie achten als zuhause. Dies betrifft sowohl das Lüftungs- als auch das Heizungsverhalten. Am Arbeitsplatz wird häufiger mittels Kippstellung der Fenster gelüftet (anstatt energieeffizientes Lüftungsverhalten in Form von Stoßlüftung zu praktizieren), die Heizung bei Abwesenheit seltener abgeschaltet und die Raumtemperatur ist eher höher. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass gebäudeexterne Faktoren auch Einfluss auf das Verhalten haben: So wird das Lüftungsverhalten beispielsweise aufgrund von Umweltlärm eingeschränkt.

Neben den Fallstudien erfolgte eine **Auswertung von Datensätzen** mit thermischen Verbrauchs- und Bedarfswerten von Nichtwohngebäuden. Auch wenn die Daten nicht repräsentativ für Nichtwohngebäude im Allgemeinen sind deuten die Ergebnisse dieser Auswertung darauf hin, dass es auch bei Nichtwohngebäuden relevante Rebound-Effekte gibt (die Abschätzung anhand der Datensätze liegt bei 17 bzw. 30 %) – diese aber deutlich niedriger sind als bei Wohngebäuden. Auch die Energieperformancelücke ist bei diesen Datensätzen im Schnitt höher als bei Wohngebäuden, das heißt gerade bei hohem Energiebedarf weisen die Nichtwohngebäude deutlich höhere Verbräuche als Wohngebäude auf. Der Vergleich der Fallstudienobjekte mit den anderen Datensätzen von Nichtwohngebäuden zeigt, dass die untersuchten Gebäude vor allem vor der Sanierung wiederum im Vergleich zu anderen Nichtwohngebäuden vergleichsweise hohe Verbräuche aufwiesen. Dies passt gut zu dem Befund, dass die Nutzer/innen sowohl vor als auch nach Sanierung eher wenig auf ein energiesparendes Verhalten achten.

Auf Basis der vorhandenen kleinen Vergleichsdatsätze lässt sich kaum abschätzen, ob die Ergebnisse der Fallstudien sich auch auf andere Nichtwohngebäude übertragen lassen. Die hohe Übereinstimmung zwischen den Fallstudienresultaten in drei Liegenschaften mit sehr ähnlicher Nutzung und Sanierungsmaßnahmen spricht für eine gute **Übertragbarkeit** auf Gebäude mit ähnlicher Nutzung (Bürogebäude mit hohem Anteil an Nutzer/innen im Außendienst). Dagegen lassen sich die Ergebnisse der Musikhochschule Dresden mit einer sehr speziellen Nutzung und einem Wechsel der Nutzung nach der Sanierung kaum verallgemeinern.

Im Rahmen der Fallstudien konnten in den untersuchten Gebäuden eine Reihe von **organisationalen und sozialen Einsparpotenzialen** identifiziert werden, also nicht-technische Einflussfaktoren durch die Gebäudenutzer/innen und Betreiber/innen. Um den Energieverbrauch in Bundesliegenschaften zu senken ist es deshalb wichtig, neben rein technischen Maßnahmen auch diese Potenziale zu adressieren. Die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) hat mit der Durchführung der Kampagne „mission E“ in zahlreichen Bundesliegenschaften bereits begonnen, diese Potenziale gezielt zu adressieren. Neben einer Ausweitung solcher Maßnahmen auf alle Bundesliegenschaften könnten auch energetische Sanierungen als Anlass für die Adressierung der sozialen und organisationalen Einsparpotenziale genutzt werden. Darüber hinaus haben die Interviews ergeben, dass sich eine Reihe von Nutzer/innen Anreize für energiesparendes Verhalten wünschen, bspw. indem Teile der eingesparten Kosten der Behörde oder dem Team zur Verfügung gestellt würden. Dies wäre möglicherweise ein weiterer Ansatzpunkt für die Senkung des Energieverbrauchs in den Liegenschaften.

Mittels der Fallstudien konnten erste Erkenntnisse zu Rebound-Effekten in Nichtwohngebäuden gewonnen werden. Für ein vertieftes Verständnis dieser Effekte und ihrer Ursachen wäre es sinnvoll, eine **umfangreichere Studie mit mehr Gebäuden** durchzuführen. Die entwickelte Methodik hat sich in der Praxis grundsätzlich bewährt und sollte weiterverwendet werden. Um die gewonnenen Ergebnisse zu Rebound-Effekten in Nichtwohngebäuden besser einordnen zu können, wäre es außerdem wichtig, eine große Anzahl von Datensätzen mit Verbrauchs- und Bedarfswerten zur Verfügung zu haben. Diese

sollte möglichst nach Art des Gebäudes und insbesondere der Nutzung unterteilbar sein, da diese Faktoren Einfluss auf die Energiebedarfsberechnung und die Energieverbräuche haben.

Summary

A large number of Federal properties are to be comprehensively thermally retrofitted in the not too distant future, within the scope of the government's 'retrofit road map'. Against this background an important question is whether space heating rebound effects can be expected in thermal retrofits of non-residential buildings, and if so what their causes are and how they could be reduced. These questions are addressed in the research project presented here, which was commissioned and sponsored by the BBSR. In contrast to research on residential buildings, there is currently little if any existing research on rebound effects in non-residential buildings, and therefore this pilot study has broken new ground. A method for determining the rebound effect and its possible causes has been developed, and this has been tested in an investigation of four case study buildings. This has been complemented with an analysis of datasets of energy consumption figures in further non-residential buildings, so as to contextualise the findings of the four case studies.

In order to estimate the magnitude of the rebound effects, definitions of various rebound effect metrics were first clarified. The most preferred definition was the rebound effect as an 'elasticity'. This metric encompasses all the relevant factors, as it takes into account pre- and post-retrofit calculated and actual consumption, and thereby gives robust results. Rebound effects using two further definitions were also considered, namely the energy performance gap (EPG – in German EPL) and the energy savings deficit (ESD – in German EED). For the empirical investigation the case study buildings included two Federal properties (Customs Office Bremen and Customs Office Flensburg) and two properties of the state of Saxony (Police Station Dresden and Academy for Music Dresden). The case study investigation included the estimation and verification of pre- and post-retrofit calculated and actual consumption, an inspection of the buildings, and interviews with both technical staff and occupants.

In the context of selecting case study buildings it was found that often there was no available data for their calculated and actual consumption for the time periods prior to and after retrofitting, and no means of finding such data. Further, when such data was found, plausibility checks indicated that it was often not accurate. Comprehensive checks and recalculations were therefore made on energy consumption data for the four case study buildings.

After ascertaining the consumption figures for the four case study buildings the rebound effects as a result of the retrofits were calculated. In three of these buildings (Customs Office Bremen, Customs Office Flensburg and Police station Dresden) the (elasticity) rebound effects were so close to zero as to be within the margins of error of the consumption measurements. However, In the Academy for Music Dresden a significant negative rebound effect was found, meaning that the level of energy services consumed was lower after the retrofit than prior to it. A possible reason for this effect is that parts of the building were sound-proofed, leading to thermal insulation effects which had not been taken into account in the consumption calculations. Alongside the elasticity rebound effect, a comparison of the energy performance gap before and after the retrofit proved to be helpful in obtaining a fuller interpretation of the observed effects. In the three case study buildings with negligible elasticity rebound effects the actual consumption was marginally lower than calculated consumption both before and after the retrofits.

The results of the interviews indicate that the expectations of the users of the buildings regarding the retrofit were largely fulfilled. These expectations seldom had to do with energy saving. They mostly concerned gains in comfort such as less draught, better sound-proofing, easier control of heating, and indoor renovation. Users' reported ventilation and heating behaviour hardly changed after the retrofits. There were, however, various indications of behaviour that could lead to rebound effects. For example, in some cases the indoor temperature was higher and the air quality was perceived as lower, which led

to longer or more frequent periods of ventilation. On the other hand it was clear from the interviews that many respondents pay less heed to energy saving in their workplace than they do in their homes. This occurs in regard to both ventilation and heating behaviour. In the workplace, ventilation is often achieved through keeping windows slightly open rather than quick, comprehensive energy-efficient ventilation routines, the heating is less often turned off when workers are absent, and the indoor temperature is kept higher. Further, it was clear that outdoor factors had an influence on (indoor) behaviour. For example, occupants restricted ventilation due to outdoor noise.

Alongside the case studies an analysis of two small datasets of actual and calculated heating energy consumption in non-residential buildings was undertaken. Although these data may not be representative for non-residential buildings in general, the results of this analysis indicate that there are relevant elasticity rebound effects in these non-residential buildings. At 17-30%, these are significantly lower than those in Germany's residential buildings. Nevertheless the energy performance gap is higher (less deeply negative) in these buildings than in residential buildings. This indicates that actual consumption in these non-residential buildings tends to be higher in relation to calculated consumption, than in residential buildings. Comparing the case study objects with these datasets of other non-residential buildings indicates that the case study buildings were showing comparatively high actual consumption, especially prior to their retrofits. This fits well with the finding that the heating in these case study buildings was not easy to regulate prior to retrofitting, and that users paid little heed to energy saving both before and after retrofitting.

On the basis of the existing available datasets it was difficult to estimate whether the results were generalizable over a wider range of non-residential buildings. The close similarity between the rebound effect findings for the three case study buildings with similar usage might indicate some transferability of results to further cases of a similar kind (office buildings with a large number of users in outside work). On the other hand the results for the Academy of Music Dresden, with its highly specialised usage and a change of personnel after the retrofit, speaks for greater difficulty in seeking to generalise results.

In the context of the case studies it was possible to identify energy savings potential through social and organisational means. In order to reduce energy consumption in Federal properties, this savings potential has to be identified alongside the savings potential through technical upgrades. The Federal Institution for Property Development (Bundesanstalt für Immobilienaufgaben – BimA) has begun to address this potential in its campaign 'Mission E'. As the move to reduce energy consumption through technical retrofit measures is extended through the portfolio of Federal properties, there needs to be discussion as to whether social and organisational savings potential also needs to be addressed. In this respect the interviews have shown that many occupants would welcome incentives for energy saving behaviour, for example if a portion of the cost savings were put at the disposal of the institution or the employee team.

By means of the case studies, initial findings of rebound effects in non-residential buildings have been made. To deepen the knowledge and understanding of these effects a next logical step would be to undertake a comprehensive study encompassing a greater number of buildings. The research methodology developed here has proven to be effective in an empirical situation, and should be utilised in subsequent research. Further, in order to better contextualise and frame the rebound results obtained in case studies of specific buildings, it will be very important to have large datasets to hand of calculated and actual consumption in non-residential buildings. Where possible these should be disaggregated according to the type and especially the usage of buildings, since these factors are important for the calculated consumption as well as the actual consumption.

Abkürzungsverzeichnis

BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BImA	Bundesanstalt für Immobilienaufgaben
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BWZK	Bauwerkszuordnungskatalog
EED	Energieeinspardefizit
ESB	Sanierungsfahrplan Bundesbauten
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPL	Energie-Performance-Lücke
HS	Hochschule
SIB	Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement

1 Einführung

Der Bund hat sich um die Vorbildwirkung der öffentlichen Hand umzusetzen u. a. vorgenommen, bis 2020 den Wärmebedarf der Bundesbauten um 20 % zu reduzieren. Die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) verwaltet im Rahmen eines einheitlichen Liegenschaftsmanagements rund 4.700 Dienstliegenschaften des Bundes (Kunze 2012). Für diese Liegenschaften wurde im Auftrag des Bundes ein **Sanierungsfahrplan** erstellt. Zur Erreichung des 2020-Ziels sollen zunächst insbesondere Liegenschaften mit hohen Einsparpotenzialen identifiziert und in den nächsten Jahren saniert werden (vgl. Kunze 2012 und Leide 2013). Für den Sanierungsfahrplan wurden bisher die energierelevanten Daten der Liegenschaften zusammengestellt.

Sanierungsplanungen basieren in der Regel auf Bedarfswerten. Werden im Rahmen des Sanierungsfahrplans die Einsparpotenziale darüber abgeschätzt könnte es zu einer deutlichen Überschätzung kommen, denn zumindest für Wohngebäude ist bekannt, dass aufgrund von **Rebound-Effekten** die berechneten Energieeinsparungen in der Praxis meist nicht erreicht werden. Um die tatsächlichen Einsparpotenziale besser abschätzen zu können ist deshalb ein Abgleich zwischen Verbrauchs- und Bedarfswerten auf der Basis bereits erfolgter energetischer Sanierungen notwendig.

Das vorliegende Forschungsvorhaben geht der Frage nach, welche **Rebound-Effekte bei der Sanierung von Büro- und Verwaltungsgebäuden** zu erwarten sind, was die Ursachen hierfür sind und wie ggf. diese Effekte reduziert werden können. Anders als für Wohngebäude liegen für Nichtwohngebäude bisher keine Untersuchungen zu Rebound-Effekten vor und lassen sich auch nicht einfach so übertragen. Bei Wohngebäuden, wo die Nutzer/innen in der Regel die Energiekosten tragen, wird die Reduzierung dieser Kosten als wichtiger Faktor für die auftretenden Effekte benannt. Dieser Faktor hat jedoch bei den hier zu untersuchenden Büro- und Verwaltungsgebäuden vermutlich kaum Relevanz. Hinzu kommt, dass der Energieverbrauch am Arbeitsplatz aus anderen Verhaltensweisen und Routinen resultiert als zuhause. Gleichzeitig haben in den Büro- und Verwaltungsgebäuden professionell im Bereich Haustechnik und Gebäudebetreuung tätige Akteure (z. B. Gebäudetechniker / Facility Manager/in / Hausmeister) vermutlich eine wichtigere Rolle als bei Wohngebäuden. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein methodischer Ansatz zur Untersuchung von Rebound-Effekten in Nichtwohngebäuden entwickelt. Auf der Basis von Fallstudien wurde folgenden Forschungsfragen nachgegangen:

- Treten **Rebound-Effekte** grundsätzlich auch bei der energetischen Sanierung von Büro- und Verwaltungsgebäuden auf?
- Welche **Ursachen** für Rebound-Effekte sind bei der energetischen Sanierung von Büro- und Verwaltungsgebäuden zu identifizieren?
- In welcher **Größenordnung** treten Rebound-Effekte bei der energetischen Sanierung von Büro- und Verwaltungsgebäuden auf?
- Wie lässt sich zukünftig die Wirkung von Rebound-Effekten bei der energetischen Sanierung von Büro- und Verwaltungsgebäuden **detaillierter untersuchen**?
- Wie lassen sich die Rebound-Effekte in ihrer **Wirkung eindämmen**?
- Auf welche Nutzungen im Nichtwohngebäudebereich sind die Ergebnisse aus der Untersuchung von Büro- und Verwaltungsgebäuden **übertragbar**?

Die Ermittlung der Höhe des Rebound-Effekts hängt stark davon ab, welche Definition verwendet wird und damit, welche Effekte konkret betrachtet werden. In der Wissenschaft ebenso wie in der politischen und öffentlichen Debatte - existieren derzeit viele unterschiedliche Vorstellungen davon, was diese Effekte umfassen. Deshalb wurde im Vorhaben neben der Entwicklung der Untersuchungsmethodik zunächst eine Begriffsklärung vorgenommen (siehe Kapitel 2). Kernaufgabe der Studie war die Durchführung von Fallstudien in vier Verwaltungsgebäuden, die in den letzten Jahren umfassend saniert wurden (siehe Kapitel 0). Zur Untersuchung der Fragestellung und Einordnung der Ergebnisse der Fallstudien erfolgte außerdem eine Literaturlauswertung zum Energieverbrauch und -bedarf von Nichtwohngebäuden und dem Verhalten der Nutzer/innen (siehe Kapitel 0). Abschließend wurden basierend auf den gewonnenen Ergebnissen Schlussfolgerungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse und zur verwendeten Methodik gezogen sowie Empfehlungen für die zukünftige Berücksichtigung von Rebound-Effekten und zur Reduktion des Energieverbrauchs in Bundesliegenschaften entwickelt (Kapitel 0).

2 Begriffsdefinition und Methodik

2.1 Begriffsdefinition

Um den Einfluss des Rebound-Effektes abschätzen und diesen auch von anderen Effekten abgrenzen zu können, ist eine genaue Definition der jeweiligen Begriffe zwingend notwendig. Nachfolgend wird eine Definition der Begriffe und zu untersuchenden Effekte geliefert.

Allgemein können Rebound-Effekte zunächst nach der **Wirkungsebene** eingeteilt werden (vgl. Peters et al 2012):

- **Direkter Rebound-Effekt:** Als direkter Rebound-Effekt wird die verstärkte Nachfrage eines Produktes oder einer Dienstleistung bezeichnet, nachdem diese/s eine Effizienzsteigerung erfahren hat.
- **Indirekter Rebound-Effekt:** Als indirekter Rebound-Effekt wird die verstärkte Nachfrage eines anderen energieverbrauchenden Produktes oder einer Dienstleistung bezeichnet. Die durch die Effizienzsteigerung in einem Bereich eingesparte Energie wird in einem anderen Bereich wiederum verstärkt nachgefragt, somit wird der Einspareffekt substituiert.
- **Gesamtwirtschaftlicher Rebound-Effekt:** Als gesamtwirtschaftlicher Rebound-Effekt wird die verstärkte gesamtwirtschaftliche Nachfrage von Produkten, Dienstleistungen oder Verteilungsstrukturen bezeichnet, die durch den Einsatz effizienzsteigernder Technologien und Verfahren entstehen.

Im Rahmen des Vorhabens sollen vertiefend die **direkten Rebound-Effekte** untersucht werden. Der indirekte sowie der gesamtwirtschaftliche Rebound-Effekt werden im Zuge dieser Studie nicht weiter berücksichtigt. Zur Bearbeitung des vorliegenden Projekts erfolgt im Weiteren eine Präzisierung des zu betrachtenden direkten Rebound-Effekts. Dafür ist insbesondere zu klären, mit welcher **Definition des Rebound-Effekts** die Ziele des Forschungsvorhabens am besten zu erreichen sind. In der Literatur gibt es eine Reihe von Definitionen des Rebound-Effektes (z. B. Maxwell und McAndrew 2011; Sorrell 2007; Sorrell und Dimitropoulos 2008). In den meisten Bereichen der Ökonomie wird der Rebound-Effekt als eine 'Elastizität' definiert, ein Konzept aus der Wirtschaftswissenschaft, das weiter unten und im Anhang näher beschrieben wird. Diese Definition soll im vorliegenden Projekt verwendet werden. In Bezug auf Gebäudeenergieeffizienz werden oft zwei weitere Definitionen verwendet, das 'Energie-Einspardefizit' (EED) und die 'Energie-Performance-Lücke' (EPL) (Bordass et al. 2004; Galvin 2014; Lam und Hui 1996). Nachfolgend werden diese drei Größen kurz erläutert und dargelegt, warum in diesem Vorhaben der Rebound-Effekt als Elastizität betrachtet wird. Eine ausführliche Erläuterung und mathematische Ableitung des Elastizitäts-Rebound-Effekts findet sich im Anhang.

Es ist wichtig, die drei **unterschiedlichen Definitionsgrößen** präzise zu verstehen, weil ihnen sehr unterschiedliche Überlegungen zugrunde liegen. Für ein und dasselbe Gebäude kann der 'Rebound Effekt' je nach Definition 0 % oder 150 % betragen. Mit den verschiedenen Definitionen können unterschiedliche Informationen über das Nutzungsverhalten gewonnen werden. Ein weiterer in diesem Zusammenhang relevanter Begriff ist der von Sunikka-Blank und Galvin (2012) geprägte „Prebound-Effekt“, der sich auf das Verhältnis von Verbrauch und Bedarf vor der Sanierung bezieht. Häufig ist der Verbrauch vor der Sanierung geringer als der Bedarf. Deshalb werden Einsparpotenziale überschätzt, wenn der Bedarf vor der Sanierung als Bezugsgröße gewählt wird.

Wenn ein Gebäude energetisch saniert wird, gibt es vier grundsätzliche Energiegrößen, die gemessen oder berechnet werden können: Der Energiebedarf vor der Sanierung B_1 , der Energieverbrauch vor der

Sanierung V_1 , der Energiebedarf nach der Sanierung B_2 und der Energieverbrauch nach der Sanierung V_2 . In der Praxis kann es auftreten, dass nicht alle vier Werte zur Verfügung stehen. Für die Berechnung des ‚Elastizität-Rebound-Effektes‘ werden jedoch alle vier Größen benötigt. Steht der Energiebedarf vor der Sanierung nicht zur Verfügung, so kann trotzdem das Energie-Einspardefizit berechnet werden. Bei der Berechnung der Energie-Performance-Lücke werden nur die Werte nach der Sanierung benötigt. Für eine vollständige und klare Abbildung der Ursachen des Rebound-Effektes ist es günstig, wenn möglichst viele Angaben zur Verfügung stehen.

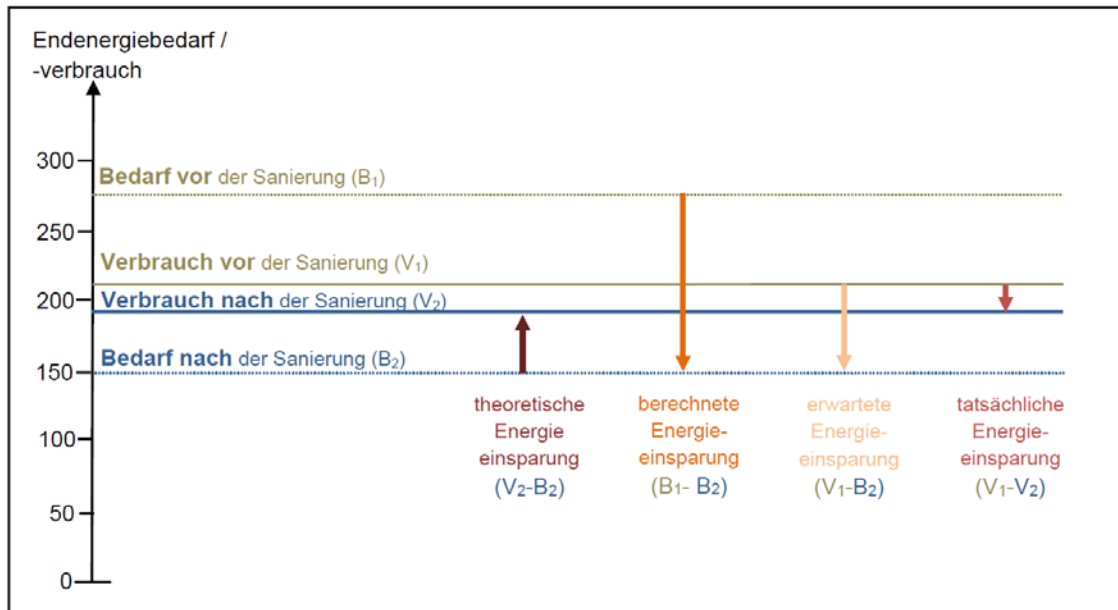


Abbildung 1: Darstellung der für die Diskussion des Rebound-Effekts relevanten Größen anhand von Beispielgebäude 2

Quelle: Eigene Darstellung

Um die drei Definitionsgrößen des Rebound-Effektes

- Elastizitäts-Rebound-Effekt ($R\epsilon(S)$)
- Energie-Einspardefizit (EED)
- Energie-Performance-Lücke (EPL)

anschaulich zu erklären, werden nachfolgend anhand von zwei Praxisbeispielen einer energetischen Sanierung von Wohngebäuden (siehe Tabelle 1) die Größen berechnet und die Aussagekraft der Ergebnisse erläutert.

Tabelle 1: Energiekennwerte der Beispielfälle

	Beispiel 1: Wohnung in Baden-Württemberg (siehe Galvin 2013b)	Beispiel 2: Wohnhaus in Ludwigshafen am Rhein (siehe Galvin 2012)
Bedarf vor der Sanierung B_1	320 kWh/m ² a	275 kWh/m ² a
Verbrauch vor der Sanierung V_1	170 kWh/m ² a	210 kWh/m ² a
Bedarf nach der Sanierung B_2	50 kWh/m ² a	150 kWh/m ² a
Verbrauch nach der Sanierung V_2	50 kWh/m ² a	192 kWh/m ² a

Beispiel 1 mit Energie-Performance-Lücke (EPL)

Die Energie-Performance-Lücke bezieht sich nur auf die Situation nach der Sanierung. Definiert wird sie als Differenz zwischen Energieverbrauch und Energiebedarf, als Prozentanteil bezogen auf den Bedarf:

$$EPL = \frac{V_2 - B_2}{B_2} \times 100\% \quad (1)$$

Im Beispiel 1 ist dies:

$$EPL = \frac{50 - 50}{50} \times 100\% = 0\%$$

d. h. die *EPL* liegt bei Null. Nach dieser Definition gibt es keinen Rebound-Effekt. Der Energieverbrauch der Wohnung entspricht dem erwarteten Verbrauch.

Beispiel 1 mit Energie-Einspardefizit (EED)

Das Energie-Einspardefizit (*EED*) vergleicht die *Unterschreitung* der *erwarteten* Energieeinsparungen nach der Sanierung mit den *erwarteten* Energieeinsparungen und wird ebenfalls als prozentualer Anteil ausgedrückt:

$$EED = \frac{V_2 - B_2}{V_1 - B_2} \times 100\% \quad (2)$$

Im Beispiel 1 ist dies:

$$EED = \frac{50 - 50}{170 - 50} \times 100\% = 0\%$$

d. h. auch das *EED* ist null. Die erwarteten Energieeinsparungen wurden vollkommen erreicht. Die Bewohner/innen verbrauchen genau die Heizenergie-Menge, die als erwarteter Bedarf nach der Sanierung errechnet wurde. Was sagt das über die Bewohner/innen aus? Laut Berechnung sind dies auf den ersten Blick die idealen Nutzer/innen. Eine große Schwäche hat diese Definition des Rebound-Effekts dennoch: Das *EED* liefert keine Informationen über das Verhalten der Bewohner/innen *vor* der Sanierung, weil der Bedarf vor der Sanierung nicht mit einbezogen wird. Das heißt wir wissen nicht, ob

es sich um fleißige Energiesparer oder undisziplinierte Energieverschwender handelte. Deswegen brauchen wir ein Maß, das alle vier Energiemengen berücksichtigt – den Elastizitäts-Rebound-Effekt¹.

Beispiel 1 mit dem Elastizitäts-Rebound-Effekt ($R_\varepsilon(S)$)

Die Mathematik hinter der Definition ist etwas anspruchsvoller. Wichtig ist, dass der Elastizitäts-Rebound-Effekt die Verhaltensänderungen der Verbraucher/innen als Folgen einer energetischen Sanierung beschreibt. Diese Definition bietet ein Modell, das den Verbrauch und Bedarf vor *und* nach der Sanierung einbezieht und somit Schlussfolgerungen zulässt, ob sich das Verhalten als Folge der Sanierung ändert. Es werden durch den Elastizitäts-Rebound-Effekt zwei wichtige Vergleiche angestellt:

- Erstens wird die Menge von Energiedienstleistungen, welche die Bewohner/innen vor der Sanierung in Anspruch genommen haben, mit der Menge von Energiedienstleistungen nach der Sanierung verglichen. Vor der Sanierung betrug der Energiebedarf 320 kWh/m²a um - dem Normnutzungsverhalten entsprechend - ein komfortables Temperaturniveau zu erreichen. Es wurden allerdings nur 170 kWh/m²a verbraucht. Die Bewohner/innen haben also nur 53 % des Energiebedarfs tatsächlich verbraucht. Nach der Sanierung hingegen werden 100 % der Energiedienstleistungen in Anspruch genommen, die notwendig sind, um ein komfortables Raumklima unter Normnutzungsbedingungen zu erzielen. Das lässt auf eine radikale Änderung des Verhaltens und der Einstellungen schließen.
- Zweitens vergleicht der Elastizitäts-Rebound-Effekt die Energieeffizienz der Wohnung vor und nach der Sanierung. Vor der Sanierung war die Wohnung sehr „ineffizient“: sie benötigte theoretisch 320 kWh/m²a (Bedarf), um ein komfortables Raumklima zu erzielen. Nach der Sanierung war sie viel effizienter und es waren theoretisch nur 50 kWh/m²a (Bedarf) notwendig. Das bedeutet eine Erhöhung der Energieeffizienz um rund 540 %.

Die beträchtliche Erhöhung der Energieeffizienz führte also zu einer wesentlichen Änderung des Verbraucherverhaltens: früher war der Haushalt sehr sparsam; jetzt ist er gemessen am Verhalten vor der Sanierung vergleichsweise verschwenderisch. Der Elastizitäts-Rebound-Effekt $R_\varepsilon(S)$ bringt diese beiden Veränderungen zusammen in einen Wert, der in der Literatur auch als „Energiedienstleistungs-Rebound-Effekt“ bezeichnet wird. Im Anhang erfolgte eine ausführliche mathematische Herleitung dieser Größe anhand von Literaturangaben. Darin wird gezeigt, dass gilt:

$$R_\varepsilon(S) = \frac{\ln\left(\frac{V_2 \cdot B_1}{B_2 \cdot V_1}\right)}{\ln\left(\frac{B_1}{B_2}\right)} \quad (3)$$

Für das Beispiel 1 gilt:

$$R_\varepsilon(S) = \frac{\ln\left(\frac{50 \cdot 320}{50 \cdot 170}\right)}{\ln\left(\frac{320}{50}\right)} = 0,341 \text{ oder } 34,1\%$$

¹ Die Methodik setzt voraus, dass die Bilanzierungsmethodik die sanierten und unsanierten Gebäude konsistent zueinander abbildet.

Das bedeutet, dass 34,1 % der Steigerung der Energieeffizienz dazu benutzt werden um den Komfort der Nutzer/innen der Wohnung zu erhöhen. Entsprechend wurden mehr Energiedienstleistungen (Wärme) konsumiert. Hätten die Nutzer/innen des Gebäudes ihr bisheriges sparsames Verhalten beibehalten, wäre die Energieeinsparung höher. Der übrige Anteil von 65,9 % wurde genutzt, um den Energieverbrauch zu reduzieren. Durch den Elastizitäts-Rebound-Effekt $R_e(S)$ erhält man deutlich mehr Informationen als bei der Berechnung des Energie-Einspardefizites (EED) und der Energie-Performance-Lücke (EPL), wodurch man zu der Annahme gelangt wäre, dass es sich um ein ideales Verbraucherverhalten handelte.

Der Wert von 34 % kann nun auch in verschiedene Komponenten aufgeteilt werden. Zum Beispiel: 10 % davon wurden für eine höhere durchschnittliche Raumtemperatur aufgewandt; 15 % für eine großzügigere Lüftung; weitere 5 % für eine Verlängerung der Heizperiode; und die restlichen 4,1 % scheinen damit zu tun zu haben, dass die Bewohner/innen Probleme bei der Kontrolle ihrer neuen Heizungsanlage haben. Mittels Rückrechnung des Elastizitäts-Rebound-Effekt $R_e(S)$ ist es nun auch möglich unter Annahme eines identischen Nutzungsverhaltens vor und nach der Sanierung den zu erwartenden Energieverbrauch nach der Sanierung zu berechnen. Im Beispiel 1 würde dieser ungefähr 26 kWh/m²a betragen.

Beispiel 2 mit der Energie-Performance-Lücke (EPL)

$$EPL = \frac{192 - 150}{150} \times 100\% = 28\%$$

Der Energieverbrauch dieser Bewohner/innen liegt 28 % höher als der Bedarf des Gebäudes. Was bedeutet das? Die EPL enthält keine Informationen über die Bewohner/innen (oder das Gebäude) vor der Sanierung. Somit können keine Rückschlüsse gezogen werden, ob Verhaltensänderungen eingetreten sind.

Beispiel 2 mit dem Energie-Einspar-Defizit (EED)

$$EED = \frac{192 - 150}{210 - 150} \times 100\% = 70\%$$

Mit 70 % ist das EED deutlich höher als die EPL. Grund dafür ist die relativ kleine ‚erwartete Einsparung‘ (210 - 150 = 60 kWh/m²a) und die relativ große Unterschreitung der Einsparungen (192 - 150 = 42 kWh/m²a). Was bedeutet das? Es können keine Rückschlüsse auf das Verbraucherverhalten vor der Sanierung gemacht werden. Es ist lediglich bekannt, dass vor der Sanierung 210 kWh/m²a verbraucht wurden. Dennoch gibt uns das EED wertvolle zusätzliche Informationen für die Planung der Energieeinsparung. Mit einem hinreichend großen Datensatz (bei bekannten V_1 , V_2 und B_2) kann ein durchschnittliches Energie-Einspar-Defizit (EED) ermittelt werden. Dieses durchschnittliche Energie-Einspar-Defizit (EED) gibt einen Hinweis darauf, um wie viel Prozent die gesetzten Energie-Einsparziele durchschnittlich verfehlt werden.

Beispiel 2 mit dem ‚Elastizitäts-Rebound-Effekt‘ ($R_e(S)$)

Bei diesem Wert können wieder Rückschlüsse auf das Verbraucherverhalten gezogen werden. Zunächst einmal haben die Verbraucher/innen ihre Nachfrage nach Energiedienstleistungen von 76 % (= 210/275) vor der Sanierung auf 128 % (= 192/150) nach der Sanierung erhöht – eine proportionale Steigerung von 68 %. Gleichzeitig stieg die Energieeffizienz des Gebäudes um 83 %.

Der Elastizitäts-Rebound-Effekt ist:

$$Re(S) = \frac{\ln\left(\frac{192 \cdot 275}{150 \cdot 210}\right)}{\ln\left(\frac{275}{150}\right)} = 0,852 \text{ oder } 85,2\%$$

Was bedeutet das? Es sagt aus, dass 85 % der Steigerung der Energieeffizienz dazu genutzt wurde, die Energiedienstleistungen zu erhöhen, während nur 15 % dazu benutzt wurden, den Energieverbrauch zu reduzieren. Die Verbraucher haben ihr Verhalten also sehr radikal verändert.

Die Ergebnisse des Rebound-Effekts für alle drei Definitionen und die beiden Beispiele sind in Abbildung 2 dargestellt.

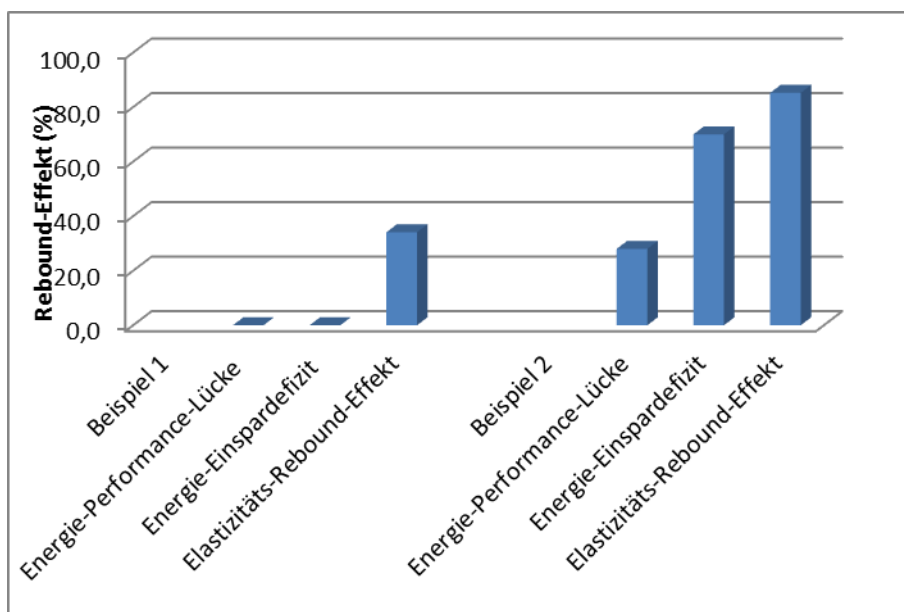


Abbildung 2: Darstellung der Rebound-Effekt-Ergebnisse der beiden Beispiele

Quelle: Eigene Darstellung

Fazit

Die Energie-Performance-Lücke *EPL* und das Energie-Einspardefizit *EED* sind für die Energieplanung nützlich, liefern aber nur eine begrenzte Menge an Informationen über das Verhalten der Verbraucher/innen. Charakteristisch für beide Größen ist, dass sie nichts über die *Änderungen* des Nutzungsverhaltens verraten. Auf den ersten Blick scheint es, als biete das *EED* diese Möglichkeit, weil es den Verbrauch vor der Sanierung berücksichtigt. Allerdings lassen sich daraus keine brauchbaren Informationen über das Nutzungsverhalten ableiten, weil es nicht in Bezug zum Bedarf vor der Sanierung gesetzt wird.

Nur der Elastizitäts-Rebound-Effekt setzt alle Informationen in Bezug zueinander und bietet ein Modell, mit dem die Auswirkungen einer Sanierung auf das Verbraucherverhalten bewertet werden können. In dieser kurzen Einführung wurde lediglich darauf eingegangen, dass die Differenz zwischen Energiebedarf und –verbrauch dem Nutzungsverhalten zuzuschreiben ist. Häufig beeinflusst jedoch nicht nur das Verhalten der Benutzer/innen den Mehrverbrauch, sondern auch Fehler bzw.

Interaktionsprobleme mit der neuen Technik. Diese Probleme bestehen bei allen drei Definitionen des Rebound-Effekts. Ein weiterer Einflussfaktor kann die Bilanzierungsmethodik der Bedarfsgrößen sein, die unter Umständen für den Zustand vor und nach Sanierung nicht im selben Maß geeignet ist. Dies wird nur relevant, wenn Bedarf vor und nach Sanierung bei der Berechnung des Rebound-Effekts berücksichtigt wird.

Es gibt noch einen weiteren Vorteil der Verwendung des Elastizitäts-Rebound-Effekts: Die Werte können unmittelbar mit Rebound-Effekten in anderen Sektoren verglichen werden. Denn es werden die gleichen mathematischen Definitionen des Rebound-Effekts benutzt wie in anderen Sektoren. Ein Beispiel hierfür ist das Projekt „Empirische Analyse von Rebound-Effekten und Folgerungen für die Gestaltung des umweltpolitischen Instrumentariums“ des Umweltbundesamts², das den Rebound-Effekt ebenfalls als eine Energieeffizienz-Elastizität definiert. Daher können die dortigen Beispiele direkt mit den Ergebnissen aus der vorliegenden Studie verglichen werden.

2.2 Methodik

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Fallstudien durchgeführt. Zur Durchführung und Auswertung dieser Fallstudien wurde eine Methodik entwickelt. Nachfolgend wird diese genauer beschrieben, wobei soweit relevant auch Veränderungen der Methodik im Verlauf der Umsetzung benannt werden.

2.2.1 Auswahlkriterien für Fallstudienobjekte

Bei der Auswahl der Fallstudienobjekte wurden folgende Auswahlkriterien berücksichtigt:

- Die Fallstudienobjekte sollen Büro- und Verwaltungsgebäude mit einer möglichst konstanten Nutzung sein. Objekte mit einer stark fluktuierenden Nutzung wurden als weniger geeignet eingeschätzt.
- Die Gebäude sollen möglichst umfassend energetisch saniert sein, d. h. möglichst sowohl eine Sanierung der Gebäudehülle als auch eine Sanierung der Anlagentechnik. Mindestens jedoch eine durchgeführte energetische Sanierung an mehreren Bauteilen der Gebäudehülle.
- Gebäude, die eine umfangreiche Nutzflächenerweiterung oder -änderung erfahren haben, sollen eher nicht berücksichtigt werden.
- Die Gebäude sollen vor der energetischen Sanierung von der gleichen Personengruppe genutzt werden, so dass Veränderungen im Nutzungsverhalten / Gebäudeverhalten durch subjektive Wahrnehmung bei der Befragung erfasst werden können.
- Die energetische Sanierungsmaßnahme sollte möglichst bereits vor drei Jahren abgeschlossen sein.
- Zur Berechnung des Rebound-Effektes sollen objektspezifische Energieverbrauchswerte nach und idealerweise auch vor der Sanierung vorliegen. Ebenso sollte der Energiebedarf nach und idealerweise auch vor der Sanierung aus dem Energiekonzept vorliegen.
- Es sollen vorrangig Bundesliegenschaften ausgewählt werden. Ergänzend können auch Landesimmobilien in die Auswahl miteinbezogen werden.

² <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/n/projekte/Rebound-Effekte.php>

2.2.2 Aufbereitung der Daten und Kalkulation des Rebound-Effekts

Für die festgelegten Fallstudienobjekte wurde für eine erste Einschätzung der Objekte die Energie-Performance-Lücke (EPL), das Energie-Einspardefizit (EED) und der Elastizitäts-Rebound-Effekt ($R\epsilon(S)$) berechnet. Dazu wurden die verfügbaren objektspezifischen Daten des thermischen Energiebedarfes aus den Energieausweisen und des thermischen Energieverbrauchs genutzt.

Aufgrund von inkonsistenten Angaben bei den objektspezifischen Energieausweisen und den thermischen Energieverbrauchswerten wurde eine nähere Datenüberprüfung als sinnvoll erachtet. Dazu erfolgte ein Abgleich der Energieausweise mit den Annahmen der Energiekonzepte sowie die Berechnung der thermischen Energieverbrauchswerte anhand von absoluten Verbrauchswerten (Abrechnungswerten der Energieversorgungsunternehmen). Die dazu notwendigen Daten wurden durch Recherche von zuständigen Ansprechpartnern bei den Objekten sowie durch Kontakt zu externen Ingenieurbüros beschafft.

2.2.3 Durchführung von Interviews

Den Schwerpunkt der Fallstudien stellten Interviews mit Nutzer/innen und Fachpersonal in den Fallstudienobjekten dar. Je Fallstudienobjekt wurden jeweils rund fünf Nutzer/innen vor allem zu ihrem Verhalten am Arbeitsplatz und den Veränderungen durch die Sanierungsmaßnahmen interviewt. Ergänzende Hinweise zu möglichen Ursachen der Rebound-Effekte sollten basierend auf Gesprächen mit dem für die Gebäude zuständigen Fachpersonal (Planer/in, Bauüberwacher/in, Objektmanager/in, Hausmeister/in) ermittelt werden. Außerdem dienten diese Interviews dem Abgleich der Annahmen in den Energiekonzepten vor und nach der Sanierung mit dem tatsächlich Zustand des Gebäudes sowie den durchgeführten energetischen Sanierungsmaßnahmen.

1. Vorbereitung

Zur Durchführung der Interviews mit dem Fachpersonal und den Nutzer/innen wurden Leitfäden für halbstrukturierte Interviews entworfen (s. Anhang). Nachdem diese den zuständigen Stellen zur Genehmigung vorgelegt wurden, fand die Recherche nach Interviewpartnern statt.

Interviews mit dem Fachpersonal

Die Befragung des Fachpersonals wurde in sechs Themenkomplexe unterteilt:

- Möglichkeiten der Beeinflussung des Erfolgs der energetischen Sanierungsmaßnahme (Zuständigkeiten, Aufgaben)
- Gründe für die energetische Sanierungsmaßnahme
 - Was waren Gründe für die Wahl dieser Maßnahmen
- Abgleich der Annahmen aus dem Energiekonzept mit dem Istzustand:
 - Zustand der Gebäudehülle und der Anlagentechnik vor und nach der Sanierung
 - geplante Sanierungsmaßnahmen entsprechend Planungsunterlagen ausgeführt
 - Nutzung des Gebäudes entsprechend Angaben, bauliche Veränderungen, Leerstand
 - Annahmen zur Gebäudetechnik: Regelungsprogramme, Nacht-, Wochenendabsenkung
- Rückmeldungen der Nutzer/innen zu der energetischen Sanierung

- Mögliche Gründe warum nach der Sanierung der thermische Energieverbrauch oberhalb des Energiebedarfs liegt
- Sonstige Anmerkungen

Neben einer Befragung zum Ist-Zustand des Gebäudes wurde in jedem Fallstudienobjekt mit einer Fachperson eine Objektbegehung durchgeführt. Ziel dieser Vor-Ort-Begehung war die In-Augenscheinnahme der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen, die Überprüfung der vorhandenen Gebäudetechnik und von Annahmen zu beheizten Flächen sowie die Besichtigung von einigen typischen Büros der Nutzer/innen und die Beobachtung von objektspezifischen Besonderheiten.

Interviews mit den Nutzer/innen

Die Befragung der Nutzer/innen wurde in die folgenden Themenkomplexe unterteilt:

- Kontinuität und Dauer der Büronutzung
 - Büronutzung vor und nach der Sanierung
 - Anteil Büroarbeit und Außeneinsatz
 - Anzahl Kollegen im Büro und Zusammensetzung der Bürobelegung
- Erwartungen an die energetische Sanierungsmaßnahme
 - Gab es Erwartungen und wenn ja, haben sich diese erfüllt
- Veränderungen durch die Sanierung und Anpassung daran
 - Veränderungen hinsichtlich welcher Bauteile und wie bemerkbar
- Fühlen sich Nutzer/innen im Gebäude wohl
- Sind die Energieverbrauchswerte des Gebäudes interessant
 - Energieverbrauchswerte bekannt, von Interesse
 - Ist Energieeinsparen am Arbeitsplatz interessant bzw. wie könnte es interessant werden?
- Anderes Heizungs-, Lüftungsverhalten im dienstlichen und privaten Bereich
 - mögliche Gründe dafür
- Sonstige Anmerkungen

2.2.4 Auswertung der Fallstudien

Abgleich der Daten mit Erkenntnissen aus der Ortsbesichtigung

Nach den erfolgten Interviews und der Ortsbegehung der einzelnen Fallstudienobjekte wurden die gewonnenen Erkenntnisse mit den Annahmen des Energieausweises und des Energiekonzeptes verglichen und auf Plausibilität geprüft.

Vergleich des thermischen Endenergieverbrauchs /-bedarf der Fallstudienobjekte mit Katalogwerten

Um den thermischen Energiebedarf / -verbrauch der Fallstudienobjekte besser einschätzen zu können, wurden Vergleichswerte von ähnlichen Gebäuden den Werten gegenüber gestellt. Als Vergleichswerte wurden die Werte der Systematik des Bauwerkszuordnungskataloges (BWZK) (Bekanntmachung des

BMVBS (2009a)) und das „Benchmark für Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden“ des BMVBS (2009a) genutzt.

Qualitative Ermittlung der Ursachen des Rebound-Effektes

In der Auswertung der durchgeführten Interviews mit den Nutzer/innen und dem Fachpersonal wurden die ermittelten Ursachen des Rebound-Effektes in Ursachengruppen eingeteilt. Als eine generelle Einteilung der Ursachengruppen des direkten Rebound-Effektes beim thermischen Energieverbrauch / -bedarf bei Nichtwohngebäuden wurde folgende Zuordnung erstellt:

- Zuwachs an Komfort $R\epsilon(C)$
- rein technisch bedingte Verluste $R\epsilon(K_1)$
- Verluste durch Technologien, die nicht dem Lebensstil der Nutzer/innen entsprechen $R\epsilon(K_2)$
- Verluste durch fehlende Nutzungsfreundlichkeit der Technologie $R\epsilon(K_3)$
- Weitere Wechselwirkungen zwischen Technologie und Nutzer/innen $R\epsilon(K_4)$
- Verluste durch veränderten, sorgloseren Umgang mit Energie $R\epsilon(K_5)$

Quantitative Ermittlung der Anteile der verschiedenen Ursachen des Rebound-Effektes ($R\epsilon(S)$)

Im Anschluss an die qualitative Einordnung der Ursachen des direkten Rebound-Effektes war eine quantitative Ermittlung der Anteile der Ursachengruppen geplant. Die Quantifizierung sollte für den Elastizitäts-Rebound-Effekt ($R_\epsilon(S)$) anhand folgender mathematischer Gleichung objektspezifisch vorgenommen werden:

$$R\epsilon(S) = R\epsilon(C) + R\epsilon(K_1) + R\epsilon(K_2) + R\epsilon(K_3) + R\epsilon(K_4) + R\epsilon(K_5)$$

Für die Ermittlung der Höhe der einzelnen Faktoren gibt es bisher keine betriebssichere, gut geprüfte Methode, um den Wert jeder einzelnen Ursache zu bewerten. Als Basis für die Abschätzung wurde eine Literaturschau zu den Einflussgrößen des thermischen Energieverbrauchs (siehe Anhang) durchgeführt, um die Größenordnungen der Ursachengruppen abschätzen zu können.

Für drei der vier Fallstudienobjekte liegt der Elastizitäts-Rebound-Effekt ($R_\epsilon(S)$) im negativen Bereich und für das vierte Objekt wurde ein sehr geringer Elastizitäts-Rebound-Effekt ($R_\epsilon(S)$) von ca. 5 % berechnet. Eine Quantifizierung des sehr geringen Elastizitäts-Rebound-Effektes ($R_\epsilon(S)$) in die Ursachengruppen wird als nicht sinnvoll erachtet, da die ursächlichen Effekte nur sehr gering ausgeprägt sein können. Daher ist zu erwarten, dass bei der Zuordnung der Effekte in die Ursachengruppen erhebliche Unsicherheiten bei der Quantifizierung entstehen würden.

Datenschutz

Die durchgeführten Interviews in den Fallstudien-Objekten wurden transkribiert und nur als nicht-personenbezogene Daten weiter verwendet. Zum Abschluss des Vorhabens werden die erhobenen Daten vernichtet. Bei der Erhebung, Verarbeitung und Verwendung der persönlichen Daten wurden die gültigen Datenschutzbestimmungen Bundesdatenschutzgesetz (BDSG), Brandenburgisches Datenschutzgesetz (BdbgDSG) und Datenschutz-Regeln der HS-Lausitz sowie Nordrhein-Westfalens Datenschutzgesetz (DSG-NRW) und die Datenschutz-Regeln der RWTH-Aachen beachtet und eingehalten.

3 Stand des Wissens zum Energieverbrauch in Nichtwohngebäuden und zum Nutzerverhalten

3.1 Energieverbrauch und -einsparung in Nichtwohngebäuden

Der Energieverbrauch (Heizung, Beleuchtung und Haushaltsgeräte) von Nichtwohngebäuden in der EU liegt mit 930 Terawattstunden (TWh) deutlich unter dem von Wohngebäuden, die rund 2.440 TWh pro Jahr verbrauchen (Economidou 2011). In Deutschland verursachen Nichtwohngebäude etwa 14 % der CO₂-Emissionen, von denen die Hälfte auf die Raumwärme entfallen. Damit verursacht die Bereitstellung von Raumwärme in Nichtwohngebäuden mit 60 Mt. CO₂ rund 7 % der deutschen CO₂-Emissionen; verglichen damit entfallen 151 Mt. CO₂ auf die Raumwärme in Wohngebäuden (IWU 2008). Die Proportionen beim Energieverbrauch sind ähnlich: 264 TWh/a werden für Heizung und Warmwasser in Nichtwohngebäuden benötigt im Vergleich zu 617 TWh/a in Wohngebäuden; und 339 TWh/a Verbrauch von Heizung, Warmwasser und Beleuchtung in Nichtwohngebäuden im Vergleich zu 629 TWh/a in Wohngebäuden (DENA 2012). Diese Zahlen sind im Vergleich noch mal in Abbildung 3 dargestellt.

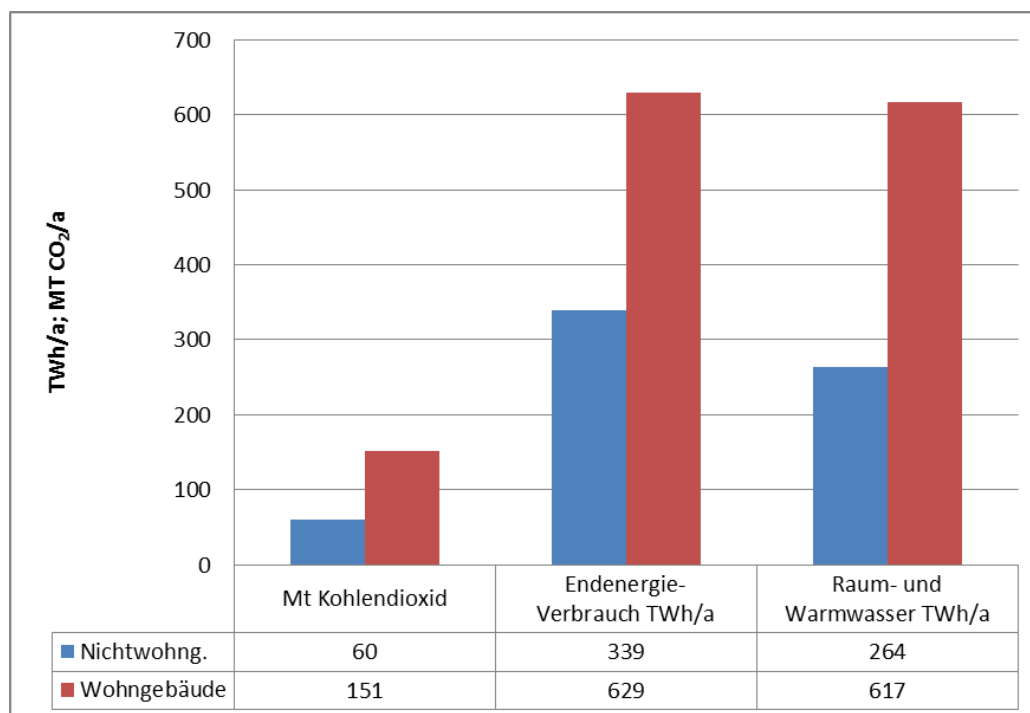


Abbildung 3: Vergleich: Energieverbrauch und CO₂ Emissionen, Wohn- und Nichtwohngebäude

Quelle: Eigene Darstellung

Die "low carbon road map" (EC 2011) der EU-Kommission zielt auf eine wettbewerbsfähige, kohlenstoffdioxidarme Wirtschaft bis 2050 ab. Die Kommission schätzt, dass die Treibhausgasemissionen aus der Baubranche um 90 % reduziert werden müssen, um ihren Anteil an der Verwirklichung der spezifischen Ziele zu verwirklichen (Economidou 2011: 99). Die

Bundesregierung hat in ihrem Energiekonzept 2010 als Ziel bis 2050 eine Reduktion des Primärenergiebedarfs im Gebäudebestand um 80 % beschlossen. Bereits bis 2020 soll der Wärmebedarf um 20 % sinken. Um diese Ziele zu erreichen, ist auch eine deutliche Senkung des Energieverbrauchs in Nichtwohngebäuden notwendig. Für die tatsächliche Reduktion des Energieverbrauchs durch energetische Sanierungen stellt sich deshalb die Frage, welchen Einfluss Rebound-Effekte auf diesen haben.

Bisher scheinen noch keine Studien zum Rebound-Effekt in Nichtwohngebäuden nach der Realisierung von energetischen Sanierungen veröffentlicht worden zu sein. Die vorhandenen Studien zum Rebound-Effekt untersuchen teilweise eine große Anzahl von Wohngebäuden - mit geringer oder keiner Erwähnung des Nichtwohnbereichs (siehe Reviews in Maxwell und McAndrew 2011; Sorrell 2007). Es gibt jedoch eine Reihe von Studien, die das Potential zur Energieeinsparung in Nichtwohngebäuden untersuchen. Viele dieser erforschen das sogenannte "technische Potenzial" für Energieeinsparungen, also mit welchen Sanierungen man die optimale Reduzierung des (theoretischen) Energieverbrauchs erzielt. Lam und Hui (1996) entwickelten eine Sensitivitätsanalyse, die Sanierern aufzeigt, wie bei der Sanierung von Bürogebäuden die größten Energieeinsparungen mit den geringsten Kosten und dem kleinsten Aufwand hinsichtlich Material und technischer Komplexität erreicht werden können. Kniefel (2010) zeigte wie der Energieverbrauch bei einer Reihe von Nichtwohngebäuden simuliert werden kann um einen optimalen Kohlenstoff-Emissions-Kreislauf zu erhalten. Juan et al. (2010) überprüften die Bandbreite der Methoden und Computersimulationen zur Vorhersage von Energieverbrauch oder Einsparungen durch die Sanierung von Nichtwohngebäuden und schlugen eine neue "Hybrid"-Methode für eine bessere Optimierung der Energieeinsparung durch wirtschaftlichere Kombinationen von Sanierungsmaßnahmen vor.

Mit Hilfe eines eher empirisch basierten Ansatzes, untersuchte Berger et al. (2014) wie Bausubstanz und Lage den Energieverbrauch in Bürogebäuden in Wien, Österreich beeinflussen, unter Betrachtung des zu erwartenden Anstiegs der Außentemperatur durch Klimawandel in den nächsten 35 Jahren.

3.2 Nutzungsverhalten in Nichtwohngebäuden und Interventionen zum Energiesparen

Das Potenzial zur Reduktion des Energieverbrauchs lässt sich aufteilen in das technische und nicht-technische Potenzial, welches Matthies et al. (2011) weiter aufteilen in das Potenzial durch das Nutzungsverhalten sowie das organisatorische Potenzial. Wie bereits im vorherigen Abschnitt dargestellt, gibt es einige Untersuchungen zum Energieverbrauch in Nichtwohngebäuden. Diese zeigen, dass große Potenziale zur Reduktion des Energieverbrauchs an Büroarbeitsplätzen durch Veränderungen im Nutzerverhalten bestehen (vgl. EnergieAgentur.NRW 2009). Dies betrifft sowohl den Strom- als auch den Wärmeverbrauch. Der Wärmekonsum könnte insbesondere durch ein verändertes Lüftungsverhalten (Stoß- statt Kipplüftung) und durch das Ab- bzw. Runterschalten der Heizung verringert werden (vgl. Klesse 2010). Bei einer Untersuchung von Hochschulgebäuden wurde eine potentielle Reduktion des Wärmeverbrauchs von 9 % durch eine Kombination dieser beiden Maßnahmen berechnet (Matthies et al. 2011).

Alternative Ansätze konzentrieren sich oft auf das "soziale Potenzial" der Energieeinsparung in Gebäuden. Unter sozialem Potenzial versteht man den Einfluss, den alle Personen haben, die das Gebäude nutzen oder betreiben. Meerbeek et al. (2014) berichten über eine Untersuchung in Eindhoven, Niederlande, bei der Büroarbeiter stündlich die Außenjalousien kontrollierten um die Menge

und das Timing der zu erreichenden Sonneneinstrahlung zu kontrollieren. Gossauer (2008) zeigt, dass Optimierungspotentiale für Gebäude auch durch eine Befragung der Nutzer/innen ermittelt werden können.

Vor allem in besonders energieeffizienten Gebäuden kann es zu Problemen im Hinblick auf das Nutzungsverhalten kommen. So werden tlw. energetische Ziele nicht erreicht, da es auch durch energetische Sanierungen (ggf. infolge von Fehlern) z. B. zu Störgeräuschen oder Zuglufterscheinungen kommt. In Folge werden die neuen Technologien nicht genutzt oder beim Fehlen von Ansprechpartnern ggf. auch „Selbsthilfe-Maßnahmen“ (z. B. Verkleben von Belüftungskanälen) durchgeführt, wodurch das ganze System gestört wird (vgl. Schmidthals 2014; Windlinger 2012).

Ein spezifischer Ansatz zur Energieeinsparung wurde im Bereich der Geschäftsgebäude entwickelt: Entsprechende Studien sind prominent geworden seit "Going Green" ein wichtiges Thema in der Unternehmenswelt geworden ist, (Nelson 2008; Pivo 2008). Viele dieser Studien versuchen, die Kluft zwischen "technischen Potenzialen" und "sozialen Potenzialen" zu überbrücken. Studien, wie die von Janda (2014) und Axon et al. (2012) untersuchen, wie soziale Faktoren verändert werden können um in Verbindung mit dem technischen Potenzial eines Gebäudes signifikante Energieeinsparungen zu erreichen.

Diese Studien versuchen, die Lücke zwischen technischen und sozialen Potenzial mit Hilfe eines "sozio-technischen" Rahmens (MacKenzie und Wajcman 1985) zu überbrücken. In diesem Rahmen werden Technologie und Menschen als eng miteinander verflochten betrachtet. Oft ist es nicht möglich diese zu trennen und Aussagen zu treffen wie "Das ist ein technischer Effekt, aber das ist eine menschliche, soziale Wirkung." Energieverbrauch in Gebäuden wird bestimmt durch das Zusammenspiel zwischen Heizungstechnik, deren Überwachung und Regelungstechnik, den Routinen und Verhaltensweisen der Gebäudenutzer/innen, den Handlungen der Gebäudemanager/in sowie der Organisation des Personals, die ein Interesse an dem Gebäude haben und dies nutzen. Soziale und technische Einflüsse auf den Energieverbrauch sind deshalb oft untrennbar miteinander verbunden.

Ein Beispiel für dieses Phänomen zeigt die Studie von Vázquez (2013), in der drei Bürogebäude im Baskenland in Spanien untersucht werden. Abgesehen von der Außentemperatur (vergleiche Katunsky et al. 2013) sind die größten Determinanten des Heizungs- (und Kühlungs-)Verbrauchs das Management und das Monitoring. Gebäudemanager/in stellen das Bindeglied zwischen der Gesamtsteuerung der Heizungstechnik und den Aktivitäten der Gebäudenutzer/innen dar. Wo Manager/innen versäumten, eine aktive Rolle bei der Anpassung und Steuerung der Heizung vorzunehmen, um den Bedürfnissen der Nutzer/innen gerecht zu werden, war der Energieverbrauch zu hoch. Oft wurde einfach solange die Temperatur erhöht, bis keine Beschwerden mehr von Nutzer/innen kamen. Sie scheiterten auch oft daran, detaillierte Daten der Temperaturüberwachung in Gebäuden zu analysieren und darauf zu reagieren, wenn diese verfügbar waren. Durch diese hätten sie möglicherweise technische Unzulänglichkeiten oder unangemessenes Heizverhalten identifizieren können. Ein Gebäude-Manager/in kann eine sozio-technische Schlüsselrolle bei der Erleichterung einer optimalen Anpassung der technologischen Leistungsfähigkeit und bei der Zusammenarbeit der Insassen einnehmen.

Auch Kothe (2014) weist basierend auf Erfahrungen bei der Sanierung zahlreicher öffentlicher Gebäude in Berlin darauf hin, dass angesichts häufig fluktuierender Nutzer/innen in Nichtwohngebäude Hausmeister/innen oder andere entsprechende „Mittler“ einen großen Einfluss auf Energieeinsparungen haben. „Ein Hausmeister, der die Energieeinsparziele aktiv unterstützt, meldet demolierte oder gestohlene Thermostatventile, schließt offen stehende Fenster und Türen, schaltet unnötig brennendes Licht aus, spricht Lehrer und Schüler an, wenn diese sich energetisch schädlich verhalten, misst bei

Beschwerden erst mal die Raumtemperatur, prüft, ob die Fenster geschlossen sind und „wimmelt Beschwerden ab“, wenn sie unberechtigt sind.“ (Kothe 2014 S. 15).

Veränderungen des Energieverbrauchs sind auch durch reine Veränderungen im Verhalten der Nutzer/innen zu erzielen. Matthies und Thomas (2011) begründen, dass es sich bei den energierelevanten Verhaltensweisen am Arbeitsplatz um habitualisiertes Verhalten handelt, so dass für Veränderungen handlungsunterstützende Techniken eine sinnvolle Maßnahme darstellen. Sie untersuchten unterschiedliche Interventionsstrategien und kommen zum Ergebnis, dass im Hinblick auf die Veränderung des Lüftungsverhaltens (Stoß- statt Kipplüften) eine Kombination aus motivationsfördernden Maßnahmen (Poster, Flyer, E-Mails etc.) und handlungsunterstützenden Maßnahmen (Aufkleber an Fenstern, Selbstverpflichtungen, Aktionstage, etc.) besonders wirkungsvoll sind. Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe konnte der Heizenergieverbrauch durch diese Maßnahmen um bis zu rund 5 % reduziert werden.

Ein weiteres wichtiges Instrument zur Reduktion von Energieverbräuchen durch eine Änderung des Nutzerverhaltens ist Feedback (European Environment Agency 2013). Während in Wohngebäuden die Nutzer/innen durch die Rechnung zumindest jährlich ein Feed-Back bekommen haben die Nutzer/innen in Nichtwohngebäuden oft vermutlich noch nicht mal Zugang zu Verbrauchsdaten. In einer britischen Studie von Tetlow et al. (2014) wird die Psychologie des "Post-Completion-Fehlers" (Chung und Byrne 2008) verwendet, um zu testen wie Büroangestellten beigebracht werden kann, das Licht nach der Beendigung von Meetings auszuschalten.

Aufbauend auf der Erkenntnis, dass durch eine Änderung des Nutzungsverhaltens in Büro- und Verwaltungsgebäuden eine Reduktion des Energieverbrauchs möglich ist, wurden u. a. von Klimaschutz- und Energieagenturen Kampagnen und Initiativen zur Adressierung dieser Zielgruppe entwickelt. Besonders bekannt und groß angelegt war die im Jahr 2006 gestartete Kampagne „mission E“ bei der Bundeswehr, die von der EnergieAgentur.NRW entwickelt wurde.

Die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) hat – unabhängig von der Bundeswehr – die Kampagne „mission E“ zusammen mit der EnergieAgentur.NRW den Rahmenbedingungen des Einheitlichen Liegenschaftsmanagements des Bundes angepasst und weiterentwickelt. Seit der Heizperiode 2012/2013 wird die „mission E“ der BImA nach und nach flächendeckend in den zivilen Dienstliegenschaften des Bundes umgesetzt. Ziel der Kampagne ist eine Sensibilisierung der zivilen Beschäftigten des Bundes in Bezug auf Klimaschutz und Ressourcenschonung. Dafür werden in den zivilen Dienstliegenschaften Aktionstage oder -wochen durchgeführt. Diese umfassen beispielsweise Messungen in den Gebäuden, Seminare zum Thema „Zweite Miete senken“ und Bürorundgänge, Info- und Beratungsstände, etc.. Ergänzend wurden Informationsmaterialien entwickelt (Plakate, Aufkleber, Flyer, etc.). Die Energie- und Umweltmanagementbeauftragten der BImA stehen auch nach Ablauf der Aktionen als Ansprechpartner/innen zur Verfügung. Seit Beginn der Kampagne werden bis zum Ende der Heizperiode 2014/2015 ca. 34.000 Bedienstete durch Aktionstage bzw. -wochen in mehr als 135 unterschiedlichen Liegenschaften direkt und vor Ort erreicht.

Weitergehende Reduktionen können durch sozio-technische Ansätze erzielt werden. Ein aktueller Bericht über Sparprojekte in fünf Geschäftshäusern in London kann als ein erfolgreiches Beispiel eines solchen Ansatzes gesehen werden (Jones Lang LaSalle 2014 und Web-Links). Jedes Projekt begann mit intensiven Gesprächen zwischen allen direkten Stakeholdern: Bauherren, Gebäudemanager/innen, Betreiber/innen, Angestellte, Mietverwaltungsmanager/innen, Bauingenieure/innen, usw. Das Ziel war, das wirtschaftlich optimale Energiesparpotenzial zu ermitteln unter Berücksichtigung technischer und organisatorischer Potenziale sowie der Beiträge von Management und Angestellten. Obwohl die

Ergebnisse dieser Projekte nicht einer Peer-Review unterzogen wurden, legen die vorliegenden Berichte Energieeinsparungen von 15-56 % nahe, die mit Investitionen in Höhe von € 8-125 €/m² erreicht werden können. Dies ist zu vergleichen mit typischen Kosten von über 200 €/m² für umfassende energetische Sanierungen in Wohngebäuden (Galvin 2010; Jakob 2006).

Jenseits dieser sozio-technischen Ansätze gibt es auch umfassende energetische Sanierungen von Nichtwohngebäuden – und um die gesetzten politischen Ziele zu erreichen ist dies wohl auch notwendig. Bisher scheint es zur Wirkung dieser Sanierungen sowie dabei auftretender Rebound-Effekte noch keine Studien zu geben.

3.3 Heizenergiebedarf und –verbrauch in Nichtwohngebäuden

3.3.1 Vergleich mit Querschnittsdatsätzen

Es existieren keine Daten zum Bedarf und Verbrauch von Nichtwohngebäuden vor und nach einer energetischen Sanierung. Allerdings gibt es drei kleinere Datensätze von zusammengehörenden Bedarfs- und Verbrauchswerten von Nichtwohngebäuden. Diese können auf zwei Arten verwendet werden, um zum Verständnis von Heizenergieverbrauchsänderungen in Nichtwohngebäuden durch Energieeffizienzmaßnahmen beizutragen:

- Erstens kann auf Basis der Datensätze die „Energie-Performance-Lücke (EPL)“ der Gebäude berechnet werden, die anzeigt wie stark der Verbrauch vom Bedarf abweicht. Dies kann als Grundlage für einen Vergleich mit der Situation in den Fallstudien-Gebäuden vor und nach der Sanierung verwendet werden, also ob die Energie-Performance-Lücke typisch, hoch oder niedrig ist.
- Zweitens kann unter Verwendung der Querschnittsmethode zur Schätzung des Elastizitäts-Rebound-Effektes (Galvin 2013a) der durchschnittliche Rebound-Effekt für Gebäude in diesen Datensätzen abgeschätzt werden. Mit diesem kann dann der Rebound-Effekt in den Fallstudien-Gebäuden verglichen werden.

Die Genauigkeit dieser beiden Schätzungen hängt von der Größe und Repräsentativität der Datensätze ab. Für Wohngebäude in Deutschland stehen große Datenmengen zur Verfügung mit einer Gesamtsumme von mehr als 3.400 Wohnungen (siehe Sunikka-Blank und Galvin, 2012). Die Datensätze für Nichtwohngebäude sind viel kleiner, daher sind die Schätzungen der typischen Rebound-Effekte und Energie-Performance-Lücken als vorläufig zu betrachten.

3.3.2 Datensatz des IWU mit 93 Nichtwohngebäuden

Das IWU (2014) stellte einen Datensatz von Wärmeenergiebedarf und -verbrauch in 93 deutschen Nichtwohngebäuden zusammen (darunter 34 Büro- und Geschäftsgebäude, 19 Universitätsgebäude, 16 Konferenz- und Veranstaltungszentren; 15 Schulen und Kindergärten, 8 Hotels und 1 Sportzentrum). Abbildung 4 zeigt das Streudiagramm des Verbrauchs und Bedarfs für diese Gebäude mit der Best-fit-Potenzkurve.

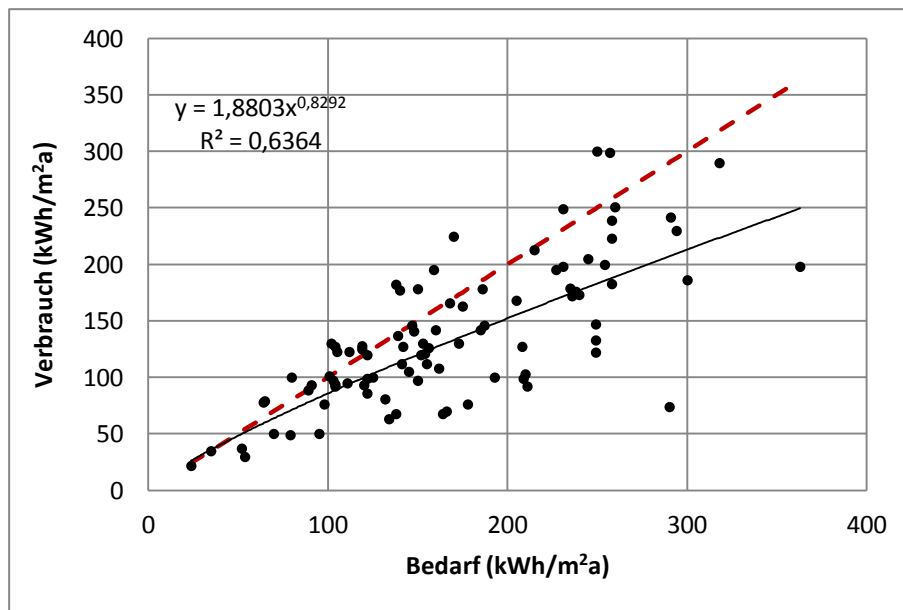


Abbildung 4: Verbrauch und Bedarf für 93 deutsche Nichtwohngebäude mit Best-Fit-Potenzkurve

Quelle: IWU (2014)

Die Beziehung zwischen dem Bedarf und durchschnittlichen Verbrauch ist hier gegeben durch:

$$V = 1,88023B^{0,8292} \quad (4)$$

Dies entspricht einem durchschnittlichen Rebound-Effekt von $1 - 0,8292 = 0,1708$ oder 17,08 % (s. Methodik im Anhang). Dieser ist signifikant niedriger als die Schätzung des durchschnittlichen Rebound-Effektes von 36 % für deutsche Wohngebäude (Galvin 2013a), der mit der gleichen Querschnittsmethode ermittelt wurde. Dieser Wert sollte in Verbindung mit der Energieperformancelücke (EPL) betrachtet werden. Die durchschnittliche EPL für jeden spezifischen Bedarfswert wird durch Einsetzen der Gleichung (4) in Gleichung (1) erhalten, dies ergibt:

$$EPL = 1,8803B^{0,8292-1} - 1 \quad (5)$$

Abbildung 5 bildet die Gebäude-EPL und die Schätzung des durchschnittlichen EPL für jeden spezifischen Bedarfswert basierend auf Gleichung (5) ab.

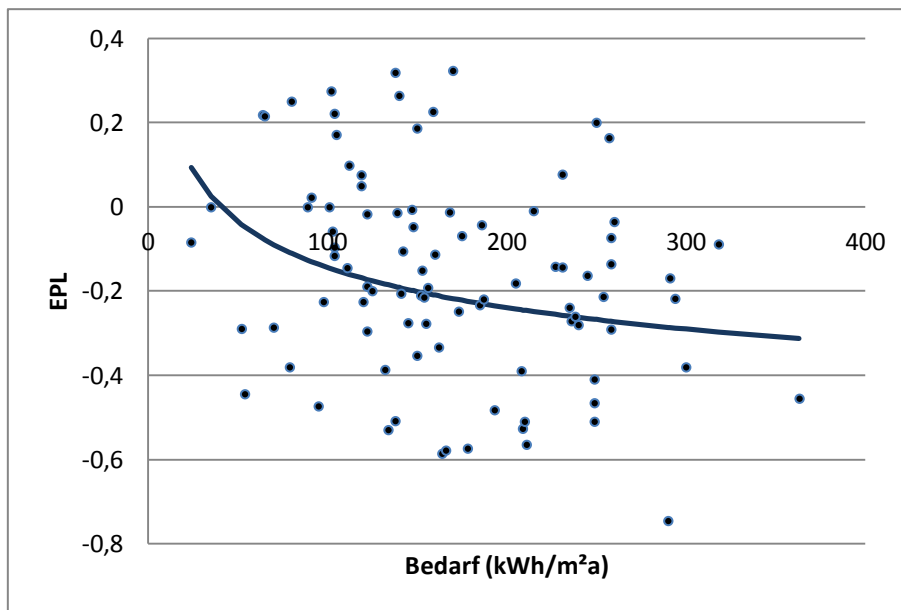


Abbildung 5: Energieperformancelücke gegenüber dem Bedarf für 93 deutsche Nichtwohngebäude

Quelle: IWU (2014)

Die EPL erreicht ein Minimum von -0,31 für einen Bedarfslevel über 350 kWh/m²a und wird Null für einen Bedarf von knapp über 40 kWh/m²a. Für Wohngebäude sind diese Werte -0,50 und 70 kWh/m²a. Dies deutet darauf hin, dass der Verbrauch relativ zum Bedarf in diesen Nichtwohngebäuden für Bedarfswerte oberhalb von etwa 100 kWh/m²a signifikant höher ist als in Wohngebäuden. In diesem Bereich liegen die weitaus meisten der Gebäude. Dagegen ist der Verbrauch im Verhältnis zum Bedarf bei geringeren Bedarfswerten in den Nichtwohngebäuden niedriger als in den Wohngebäuden. Allerdings gibt es zu wenige Niedrigenergiehäuser in diesem Datensatz, um einen zuverlässigen Vergleich für dieses untere Ende der Skala zu machen.

Ein umfassenderes Bild erhält man, wenn der durchschnittliche Wert der EPL betrachtet wird. Durch die Verwendung einer Integralfunktion zur Berechnung des Durchschnitts, wird jeder Bias durch eine ungleichmäßige Verteilung der Bedarfswerte in dem betrachteten Bereich beseitigt. Bei Integration von Gleichung (4) wird die durchschnittliche EPL im Bedarfsbereich von 70-400 kWh/m²a ermittelt:

$$\widehat{EPL} = \frac{\int_{70}^{400} (A \cdot B^{D-1} - 1) dB}{400 - 70} \quad (6)$$

wobei A der Koeffizient von B in Gleichung (4) ist, und D ist der Exponent in dieser Gleichung. Die durchschnittliche EPL in diesen 93 Gebäuden ist daher -0,245. Im Vergleich dazu haben Wohngebäude in diesem Bereich eine wesentlich niedrigere durchschnittliche EPL von -0,35.

Sowohl der Rebound-Effekt als auch die EPL müssen bei der Bewertung der Vorteile einer Sanierung von Nichtwohngebäuden sowie Wohngebäude betrachtet werden. Wenn der Rebound-Effekt im Vergleich zu anderen Gebäuden gering ist, kann dies auf eine erfolgreiche Sanierung hindeuten; aber wenn die EPL sowohl vor als auch nach einer Sanierung hoch ist, kann dennoch das Problem eines übermäßigen Energieverbrauchs bestehen. Auf der anderen Seite könnte ein hoher Rebound-Effekt als akzeptabel betrachtet werden, wenn die EPL vor der Sanierung gering ist und sich danach in Richtung

Durchschnitt entwickelt, da dies darauf hindeuten kann, dass übermäßige Einschränkungen im Nutzungskomfort behoben wurden.

3.3.3 Datensatz von Oschatz et al. mit Bürogebäuden

Oschatz et al. (2014) stellten einen Datensatz vom Verbrauch und Bedarf von 32 deutschen Bürogebäuden zusammen. Die Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Elastizitäts-Rebound-Effekte und EPLs für diese

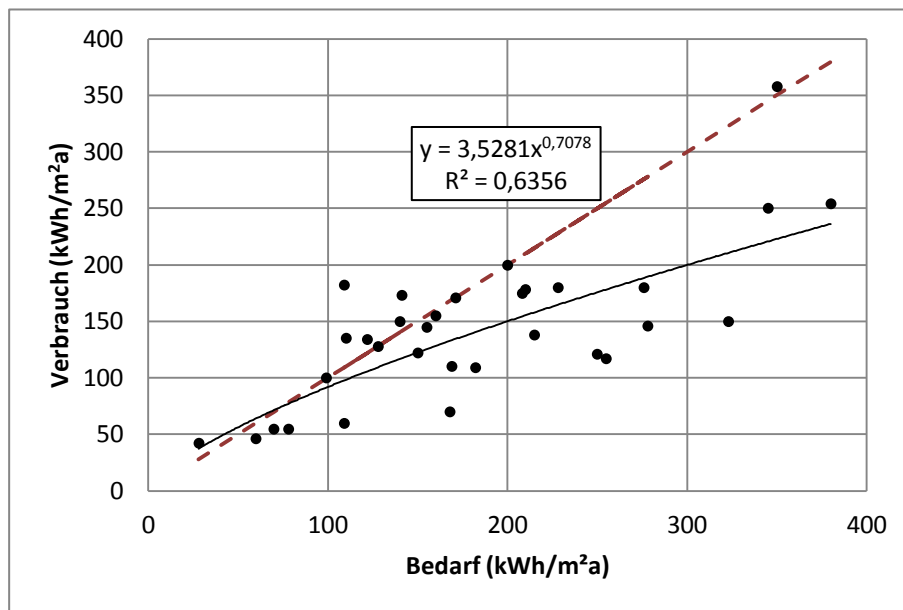


Abbildung 6: Verbrauch und Bedarf für 32 deutsche Bürogebäude mit Best-Fit-Potenzkurve

Quelle: Oschatz et al. (2014)

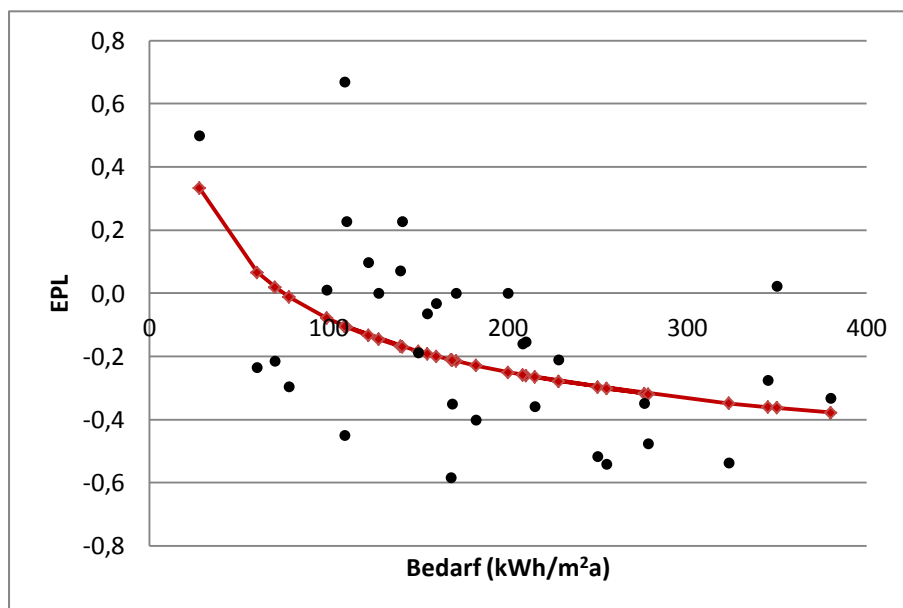


Abbildung 7: Energieperformancelücke für 32 deutsche Bürogebäude

Quelle: Oschatz et al. (2014)

In diesem Fall wird der durchschnittliche Verbrauch für jeden spezifischen Bedarfswert ermittelt:

$$V = 3,5281B^{0,7078} \quad (7)$$

Dies ergibt einen Rebound-Effekt von $1 - 0,7078 = 0,2922$ oder 29,22 %. Dieser ist höher als der Rebound-Effekt für den Datensatz von IWU (2014), aber immer noch niedriger als der für Wohngebäude. Der EPL wird gegeben durch:

$$EPL = 3,5281C^{0,7078-1} - 1 \quad (8)$$

Anders als der Rebound-Effekt ist die EPL in diesem Datensatz niedriger als in dem von IWU (2014). Sie nähert sich für Bedarfswerte von über 350 kWh/m²a -0,4 an und wird Null, wenn der Bedarf knapp 75 kWh/m²a erreicht. Die Verwendung von Gleichung (6) ergibt eine durchschnittliche EPL von -0,256, die damit niedriger ist als die für den IWU-Datensatz, aber höher als für Wohngebäude.

3.3.4 Sekundärauswertung eines zusammen gesetzten Datensatzes

Ein dritter Datensatz wurde zusammengestellt mit den beiden oben genannten Datensätzen zuzüglich 59 Datenpunkte an Wärmeverbrauch und -bedarf in staatlichen Nichtwohngebäuden, die im Rahmen des Vorhabens vom BBSR zur Verfügung gestellt wurden. Eine graphische Darstellung des zusammengesetzten Datensatzes wird in Abbildung 8 gezeigt. Neben den genannten Datensätzen umfasst dieser auch die Daten der Fallstudiengebäude (jeweils vor und nach Sanierung).

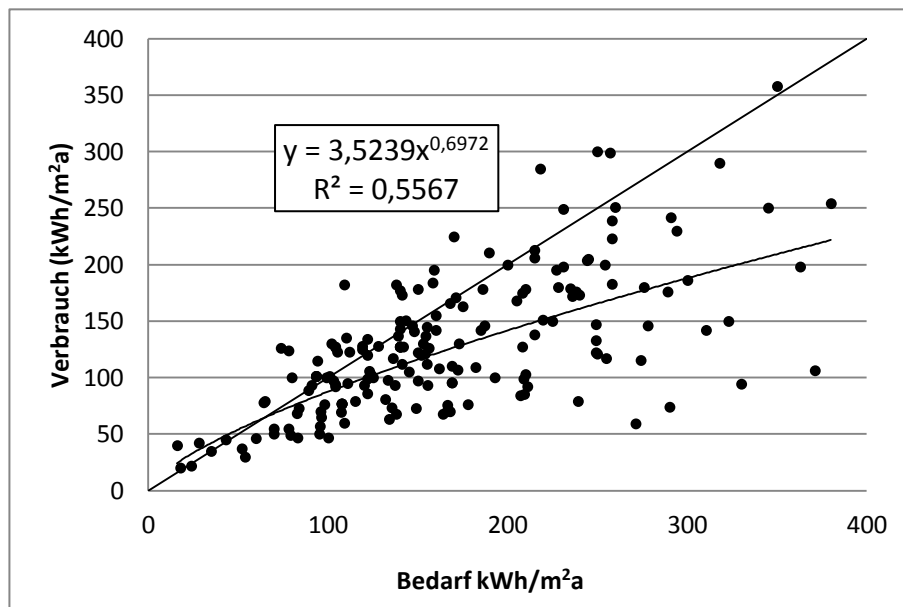


Abbildung 8: Verbrauch und Bedarf, 182 Nichtwohngebäude in Deutschland

Quelle: IWU; Oschatz et al. (2014); BBSR (persönliche Mitteilung)

Hier wird der durchschnittliche Verbrauch für jeden spezifischen Bedarfswert gegeben durch:

$$V = 3,5239B^{0,6972} \quad (9)$$

Damit errechnet sich ein Rebound-Effekt von 0,3022 oder 30,22% - höher als in den beiden einzeln betrachteten Datensätzen, aber immer noch niedriger als der für Wohngebäude.

Die EPL ist etwas niedriger als für die 32 Bürogebäude:

$$EPG = 3,5239C^{0,6972-1} - 1 \quad (10)$$

Unter Verwendung der Gleichung (6) ergibt sich eine durchschnittliche EPL von -0,2978 im Bedarfsbereich von 70-400 kWh/m²a. Auch das ist höher als für Wohngebäude.

Obwohl die Datensätze klein sind (93, 59 und 32 Datenpunkte sowie 4 Datenpunkte aus den Fallstudien) bieten sie eine erste Grundlage für den Vergleich mit den Fallstudien-Ergebnissen. Und auch wenn sie nicht repräsentativ für Nichtwohngebäude im Allgemeinen sind, deuten sie darauf hin, dass:

- Rebound-Effekte in Nichtwohngebäuden niedriger sind als in Wohngebäuden (17 % bis 30 % gegenüber 36 % für Wohngebäude)
- Die Energieperformancelücken im Schnitt höher liegen als für Wohngebäude (-0,25 für einen Bedarf zwischen 70 und 350 kWh/m²a verglichen mit -0,35 für Wohngebäude)

Weitere empirische Studien sind notwendig, um die Zahl der zuverlässigen Verbrauchs- / Bedarfsdatenpunkte für Nichtwohngebäude zu erhöhen. Die oben genannten Zahlen für Nichtwohngebäude müssen daher als vorläufige angenommen werden.

4 Fallstudien

4.1 Vorgehensweise

4.1.1 Auswahl Fallstudienobjekte

Die Auswahl der Fallstudienobjekte erfolgte grundsätzlich anhand der in Kapitel 4.2.1 genannten Kriterien. Aus einer vom BBSR zur Verfügung gestellten Liste mit energetisch sanierten Bundesliegenschaften wurden potentiell als geeignet erscheinende Objekte ausgewählt. In der Praxis stellte sich die Ermittlung der notwendigen Energiedaten (Energieverbrauch- und bedarf vor und nach Sanierung) für die potentiellen Fallstudienobjekte als schwierig dar. Somit wurde die Datenverfügbarkeit bei der Auswahl der Objekte zu einem zentralen Kriterium. Insbesondere besteht bei vielen Objekten das Problem, dass die Energieverbräuche nur pro Liegenschaft und nicht objektbezogen erfasst werden. Aufgrund der schwierigen Datenlage bei der Beschaffung der notwendigen Eingangsdaten bei den Bundesimmobilien wurden darüber hinaus Landesimmobilien ermittelt.

Als Fallstudienobjekte wurden zwei Bundesliegenschaften, die sich im Eigentum und der Verwaltung der Bundanstalt für Immobilienaufgaben (BlmA) befinden, sowie zwei Immobilien des Freistaates Sachsen, die sich im Eigentum und der Verwaltung des Staatsbetriebes Sächsisches Immobilien- und Baumanagement (SIB) Dresden befinden, als Fallstudienobjekte ausgewählt. Es handelt sich dabei um Gebäude der folgenden Liegenschaften:

- Zollamt Bremen, Große Sortillienstraße
- Zollverwaltung Flensburg, Kielseng
- Hochschule für Musik Dresden Carl Maria von Weber, Außenstelle Leubnitzer Str.
- Polizeirevier Dresden Mitte, Außenstelle Blasewitz

4.1.2 Aufbereitung der Objektdaten

Bei den ausgewählten Fallstudienobjekten wurden die zur Verfügung stehenden Unterlagen auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft. Besonders auf folgende Punkte wurden bei der Überprüfung geachtet:

- **Durchgeführte energetische Sanierungsmaßnahmen:** Abgleich der geplanten mit den durchgeführten Sanierungsmaßnahmen anhand von einem Vergleich von Bauplanungs- und Bauausführungsunterlagen.
- **Nettogrundflächen:** Überprüfung der Annahmen zu den Nutzflächen bzw. Zonierungsflächen der Planungsunterlagen, der Bauzeichnungen mit den Annahmen der Energieausweise bzw. Energiekonzepten vor und nach der Sanierung. Nachrechnung der Nutzflächen in den verschiedenen Zonen der Gebäude nach Objektbesichtigung, sofern dies als notwendig eingeschätzt wurde.
- **Annahmen in Energiekonzepten bzw. –ausweisen:** Neben der bereits erwähnten Überprüfung der Zonierungen, wurden die Annahmen für Wandaufbauten vor und nach Sanierung stichprobenweise überprüft; ebenso wurden Annahmen zur Gebäudetechnik, Regelungstechnik, Raumtemperaturen in den Zonen, Belegungszeiten, Nacht- und Wochenendabsenkungen, Annahmen zur Erzeugung des Warmwassers, Wärmeerzeugung, Pufferspeicher etc. soweit aus den Energiekonzepten erschließbar, überprüft.

- **Energieverbrauchswerte:** Der thermische Energieverbrauch der Fallstudienobjekte wurde aus den Abrechnungen der Energieversorgungsunternehmen bzw. Energielieferanten entnommen, einer Perioden- und Witterungsbereinigung unterzogen und auf die beheizte Nettogrundfläche bezogen. Dabei wurde der Zeitraum der Durchführung der Sanierungsmaßnahme, sofern ausreichend Abrechnungsperioden zur Verfügung standen, ausgeklammert.
- **Sanierungszeitraum:** Um den Energieverbrauch dem unsanierten bzw. sanierten Objektzustand zuordnen zu können, wurde der in den Baubeschreibungen bzw. Energiekonzepten angegebene Sanierungszeitraum recherchiert und in den Interviews mit dem Fachpersonal nochmals abgeglichen.

4.1.3 Durchführung der Interviews

Nachdem die Interview-Leitfäden für die Befragung der Nutzer/innen und des Fachpersonals entworfen waren, wurden diese mit dem Auftraggeber abgestimmt und zur Genehmigung an die Direktion der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben und den Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement, Dresden gesendet. Hinweise bzw. Änderungswünsche der verschiedenen Genehmigungsstellen wurden eingearbeitet. Nach der finalen Freigabe der Interview-Leitfäden wurde zu den Behörden- / Dienststellenleitern/innen der vier Fallstudienobjekte Kontakt aufgenommen und diese über das Forschungsprojekt sowie zu den geplanten Interviews in den Liegenschaften informiert. Die Behörden- / Dienststellenleiter/innen wurden gebeten das Projekt zu unterstützen und die Befragung des unterstellten Personals (Nutzer/innen) zu genehmigen. Gleichzeitig erfolgte mit Unterstützung des Auftraggebers eine Recherche zu möglichen Interviewpartnern/innen bei dem Fachpersonal. Die Behörden- / Dienststellenleiter/innen stellten freiwillige Interviewteilnehmer/innen zusammen, mit denen ein Vororttermin telefonisch vereinbart wurde. Sofern möglich, wurden den Interviewteilnehmer/innen ein Erläuterungsbogen vorab per E-Mail zugesendet, auf dem Inhalt des Forschungsvorhabens, Details zur Durchführung des Interviews sowie Hinweise zum Datenschutz beschrieben wurden. Aufgrund der geplanten Anzahl von ca. fünf Interviews mit Nutzer/innen je Gebäude sollten möglichst Personen ausgewählt werden, die als Multiplikatoren fungieren können, um so auch Meinungen von nicht befragten Kolleg/innen auffangen zu können. Die Interviewleitfäden wurden an die örtlichen Gegebenheiten (z. B. durchgeführte Sanierungsmaßnahmen) angepasst

Tabelle 2: Anzahl der befragten Personen in den Fallstudienobjekten

Fallstudienobjekt	Nutzer/innen	Fachpersonal
Hochschule Dresden	2	3
Polizei Dresden	5	2
Zoll Flensburg	5	2
Zoll Bremen		
- Gebäude Nr. 58	4	5
- Gebäude Nr. 60	5	
insgesamt	21	12

In den vier ausgewählten Fallstudienobjekten wurden insgesamt 30 Interviews mit 32 Personen durchgeführt (21 Nutzer/innen und 12 Personen des Fachpersonals, wobei 1 Person gleichzeitig Nutzer/in und Fachpersonal) war. Der überwiegende Teil der Interviews (26) wurde vor Ort mit einer /

zwei Interviewer/innen des Forscherteams geführt; lediglich vier Interviews mussten aufgrund von zeitlichen Differenzen telefonisch durchgeführt werden. Drei Interviews wurden als Doppelinterviews mit jeweils zwei befragten Personen durchgeführt. Einige Befragte (3 Personen) sprachen sich gegen eine digitale Aufzeichnung des Interviews aus, daher wurden nur 27 Interviews aufgezeichnet.

Bei der Vorbereitung der Interviews wurde festgestellt, dass im Gebäude der Polizei Dresden sowie der Hochschule für Musik nach der Sanierung ein weitestgehend anderer Personenkreis eingezogen war. Daher konnte bei der Hochschule für Musik lediglich mit Personen gesprochen werden, die erst nach der Sanierung in das Gebäude gezogen sind. Bei der Polizei Dresden konnte mit drei Personen gesprochen werden, die sich bereits vor der Sanierung im Gebäude befanden.

In allen vier Fallstudienobjekten wurde mit zwei bis fünf Nutzer/innen gesprochen. Im Zollamt Bremen wurden neun Nutzer/innen interviewt, die sich aber auf zwei unterschiedliche Gebäude verteilen. Durch die Streuung der Interviewpartner konnten verschiedene Ansichten und Eindrücke aufgenommen werden. Beim Fachpersonal konnten je Objekt Interviews mit zwei bis fünf Personen geführt werden; auch hier konnten durch eine Streuung der Aufgabenbereiche unterschiedliche Erfahrungen berücksichtigt werden.

Nach dem Transkribieren der digital aufgezeichneten Interviews wurden die Transkripte bzw. persönliche Mitschriften der nicht aufgezeichneten Interviews ausgewertet. Dabei wurde darauf geachtet, dass kein Rückschluss auf einzelne Interviewpartner möglich ist. Nach der erfolgten Auswertung wurden die digital aufgezeichneten Interviews gelöscht.

4.2 Beschreibung der Fallstudienobjekte

Es wurden zwei sächsische Landesliegenschaften sowie zwei Bundesliegenschaften für die Durchführung der Fallstudien ausgewählt, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

4.2.1 Hochschule für Musik Dresden Carl Maria von Weber, Außenstelle Leubnitzer Str.

Allgemeine Angaben

- einzelnes Gebäude (objektscharfe Erfassung der Verbrauchswerte), 2 Vollgeschosse und ein teilweise beheiztes Kellergeschoss
- Beheizte Nettogrundfläche ca. 695 m²
- Baujahr des Gebäudes: 1920, Umbauten 1950 und 1970

Sanierungsmaßnahme

- Komplettsanierung der Gebäudehülle: Dach, Fassade, Fenster, Bodenplatte (teilweise) und Neuinstallation der Gebäudetechnik: Heizkörper, Dämmung Heizungsrohre, Thermostatventile, hydraulischer Abgleich, Wärmeerzeuger im Bestand
- Sanierungszeitraum: Frühling 2009 bis 12/2010, Durchführung der Sanierung im Leerstand
- Grundflächenveränderung bei Sanierung durch neu geschaffenen medizinischen Untersuchungsbereich, Abriss des alten Treppenhauses und neuer Anbau für einen Fahrstuhl (annähernd gleiche Nutzfläche)

- Gleichzeitig mit der energetischen Sanierungsmaßnahme wurden die gesamten Innenräume erneuert.



Abbildung 9: HS für Musik, links vor und rechts nach der Sanierung

Quelle: SIB (2012) und eigenes Foto

Art der Nutzung des Gebäudes

- Verwaltungs-, Lehr- und Untersuchungsgebäude; ausschließliche Nutzung an Wochentagen, Nutzung im Einschichtbetrieb
- Nutzung vor und nach der Sanierung von der HS, aber anderer Personenkreis
- Hoher Anteil an Publikumsverkehr durch Studenten, die u. a. die Überäume nutzen

4.2.2 Polizeirevier Dresden Mitte, Außenstelle Blasewitz

Allgemeine Angaben

- einzelnes Gebäude (objektscharfe Erfassung der Verbrauchswerte), Altbau: 3 Vollgeschosse und ein Kellergeschoss und Neubau 2 Vollgeschosse und ein teilbeheiztes Kellergeschoss
- Beheizte Nettogrundfläche ca. 1.907 m²
- Baujahr des Gebäudes 1926 Altbau und 1960 Neubau



Abbildung 10: Polizeirevier Dresden Mitte, nach der Sanierung

Quelle: eigenes Foto

Sanierungsmaßnahme

- Komplettsanierung der Gebäudehülle: Dach bzw. oberste Geschossdecke, Fassade (auch Perimeterdämmung im Kellergeschoss), Fenster
- Sanierungszeitraum: 2007 bis 2008, Durchführung der Sanierung im laufenden Betrieb

Art der Nutzung des Gebäudes

- Verwaltungsgebäude mit Büronutzung und teilweise Publikumsverkehr, vor der Sanierung teilweise Nutzung als Revier mit höherem Publikumsverkehr; ausschließliche Nutzung an Wochentagen, Nutzung im Einschichtbetrieb
- Nutzung vor und nach der Sanierung von der Polizei, aber fast überwiegend anderer Personenkreis, Beibehaltung der bisherigen Grundrisse
- einige Mitarbeiter verrichten auch Außentätigkeit und verbringen nur ein Teil der Arbeitszeit im Büro

4.2.3 Zollverwaltung Flensburg

Allgemeine Angaben

- einzelnes Gebäude (objektscharfe Erfassung der Verbrauchswerte), 2 Vollgeschosse und ein unbeheiztes Kellergeschoss
- Beheizte Nettogrundfläche nach der Sanierung ca. 495 m²
- Baujahr des Gebäudes 1977



Abbildung 11: Zollverwaltung Flensburg, links vor und rechts nach der Sanierung

Quelle: BlmA (2014): persönliche Mitteilung und eigenes Foto

Sanierungsmaßnahme

- Komplettsanierung der Gebäudehülle: Dach, Fassade, Fenster, Kellerdecke und Teilsanierung der Gebäudetechnik: Dämmung Heizungsrohre und Warmwasserleitungen, Austausch der Thermostatventile, Erneuerung der Pumpen, hydraulischer Abgleich
- Sanierungszeitraum: 08/2010 bis 08/2011, Restarbeiten 2012 (Kellerdeckendämmung), Durchführung der Sanierung im laufenden Betrieb
- Gleichzeitig mit der energetischen Sanierungsmaßnahme wurden Renovierungsarbeiten im Innenbereich (Anstrich Wände und Innentüren) und eine Erneuerung der Beleuchtung durchgeführt

Art der Nutzung des Gebäudes

- Verwaltungsgebäude mit Büronutzung und teilweise Publikumsverkehr; fast ausschließliche Nutzung an Wochentagen, überwiegend im Einschichtbetrieb, wenige Mitarbeiter arbeiten im Zweischichtbetrieb
- Nutzung vor und nach der Sanierung von überwiegend der gleichen Personengruppe; Einige Mitarbeiter verrichten auch Außentätigkeit und verbringen nur einen Teil der Arbeitszeit im Büro

4.2.4 Zollamt Bremen

Allgemeine Angaben

- zwei Büro- und Verwaltungsgebäude (3 Vollgeschosse bzw. 8 Vollgeschosse und 2 teilweise beheizte Kellergeschosse) und eine Fahrzeughalle (keine objektscharfe Erfassung der Verbrauchswerte, aber liegenschaftsscharf)
- Beheizte Nettogrundfläche nach der Sanierung ca. 3.714 m² beider Gebäude
- Baujahr der Gebäude 1955 bzw. 1970



Abbildung 12: Zollamt Bremen, links vor und rechts nach der Sanierung

Quelle: BlmA (2014): persönliche Mitteilung und eigenes Foto

Sanierungsmaßnahme

- Komplettsanierung der Gebäudehülle: Dach / oberste Geschossdecke, Fassade, Fenster mit Sonnenschutz; Gebäudetechnik: Austausch Thermostatventile (teilweise), Erneuerung der Pumpen, hydraulischer Abgleich, Verringerung der Vorlauftemperatur; Erneuerung Wärmeerzeuger bereits 2010 von Erdöl-Kessel auf Erdgas-Brennwerttherme
- Sanierungszeitraum: 03/2011 bis 07/2011 bzw. 10/2011 bis 02/2012, Durchführung der Sanierung im laufenden Betrieb

Art der Nutzung des Gebäudes

- Verwaltungsgebäude mit mehreren verschiedenen Dienststeinheiten, hauptsächlich Büronutzung und teilweise Publikumsverkehr; fast ausschließliche Nutzung an Wochentagen, überwiegend im Einschichtbetrieb genutzt, wenige Mitarbeiter arbeiten im Zweischichtbetrieb
- Nutzung vor und nach der Sanierung von überwiegend der gleichen Personengruppe
- Einige Mitarbeiter verrichten auch Außentätigkeit und verbringen nur ein Teil der Arbeitszeit im Büro

4.3 Verhalten der Nutzer/innen und Zufriedenheit

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der Interviews in den Fallstudienobjekten zum berichteten Verhalten der Nutzer/innen in den vier Fallstudienobjekten bezüglich Lüftung, Umgang mit der Heizung, sommerlichem Wärmeschutz sowie generelle Einstellung zum Energiesparen. Dabei werden einerseits objektübergreifende Aussagen getroffen, andererseits Objektspezifika dargestellt.

Die Ergebnisse bilden nur die Aussagen der befragten Gebäudenutzer/innen ab. Auch wenn die Nutzer/innen gebeten wurden, auch beobachtetes oder berichtetes Verhalten der Kollegen/innen wiederzugeben, sind die Ergebnisse nicht unbedingt repräsentativ. Zu berücksichtigen ist dabei auch, dass nur Personen interviewt wurden, die sich freiwillig gemeldet haben – also keine zufällige Stichprobe gezogen wurde.

4.3.1 Charakterisierung der Nutzer/innen

Über 90 % der befragten 21 Nutzer/innen hatte vor der energetischen Sanierung einen Arbeitsplatz in einem unsanierten Altbau, entweder in einem der Fallstudienobjekte oder in einem anderen Altbau. Lediglich 2 Nutzer/innen gaben an, bisher ausschließlich in Neubauten oder umfangreich sanierten Gebäuden gearbeitet zu haben. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der überwiegende Teil der befragten Personen die Erwartungen und die Auswirkungen einer energetischen Sanierung auf das Nutzerverhalten sehr gut wiedergeben können.

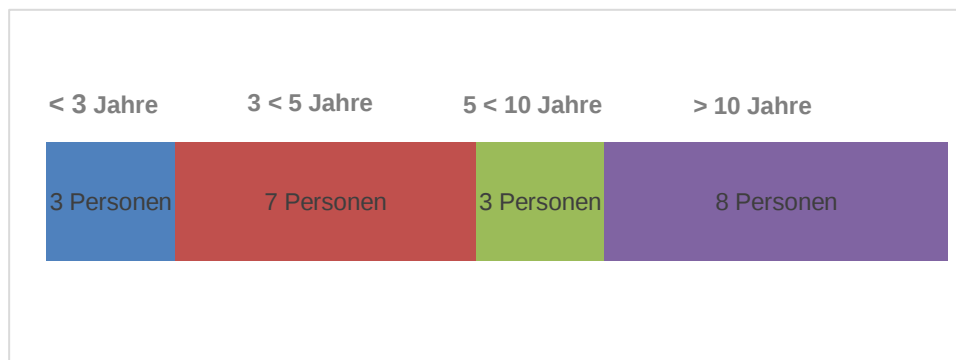


Abbildung 13: Nutzungsdauer des derzeitigen Büros

Viele Nutzer/innen haben bereits seit mehreren Jahren ihren Arbeitsplatz in demselben Gebäude, sind allerdings in dem Gebäude oft mehrfach umgezogen. Nur 38 % der befragten Personen nutzt bereits seit über 10 Jahren dasselbe Büro.

Über die Hälfte der befragten Nutzer/innen kann das Büro zum überwiegenden Teil allein nutzen. Sechs Nutzer/innen sitzen in einem 2-Personen-Büro und vier in einem 3-Personen-Büro. Ein Teil der Nutzer/innen in Mehrpersonen-Büros gab an, dass sie ein unterschiedliches Temperaturempfinden/ Wärme- und Lüftungsbedürfnis haben wie die Kolleg/innen im Büro. Sie müssen sich untereinander anpassen: Dies geschieht durch den Bekleidungsstil (d. h. ein Kollege sitzt im T-Shirt im Büro und der andere mit Pullover oder Strickjacke), das individuelle Bedienen des „eigenen“ Heizkörpers oder im Einzelfall auch das Lüften des zu warmen Büros, wenn der/die Kollege/in nicht im Raum ist.

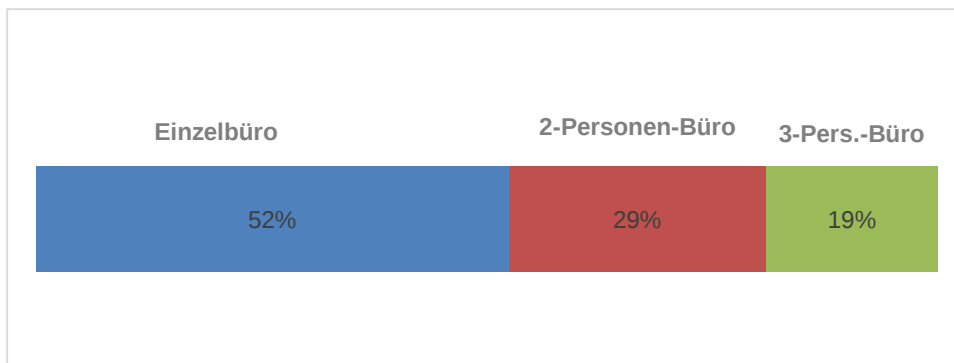


Abbildung 14: Anzahl der Personen im Büro bei den befragten Nutzer/innen

Der überwiegende Teil der befragten Nutzer/innen verbringt einen Teil der Diensttätigkeit außerhalb des Bürogebäudes. Nur rund 30 % der befragten Nutzer/innen sind während ihrer gesamten Dienstzeit im Büro. Der Anteil der Außentätigkeit ist allerdings sehr unterschiedlich und variiert zwischen 10 und 70 %. Bei den Fallstudienobjekten ist zudem aufgefallen, dass sich die Anwesenheit meist nicht homogen verteilt, sondern es aufgrund dienstlicher Erfordernisse starke Variationen in der Anwesenheit im Büro gibt.

Objektspezifische Besonderheiten

Bei der HS für Musik Dresden erfolgte nach der Sanierung ein kompletter Neubezug. Daher konnten keine Nutzer/innen befragt werden, die bereits vor der Sanierung in dem Gebäude saßen. Auch bei der Polizeidienststelle in Dresden änderte sich nach der Sanierung die Nutzung, d. h. auch hier wurden fast alle Büros neu besetzt. Es konnten jedoch drei Nutzer/innen identifiziert und befragt werden, die vor und nach der Sanierung ihren Dienst in dem Gebäude verrichteten. Bei dem Polizeigebäude sind die Mitarbeiter/innen häufig in 2- und 3-Personen-Büros untergebracht. Bei der Objektbesichtigung ist aufgefallen, dass die Büros relativ klein sind und Schreibtische oder Schränke oft vor den Heizkörpern stehen.

Bei den beiden Zollgebäuden gibt es überwiegend 2- und 3-Personen-Büros, sowie einige Einzelbüros und einen Abfertigungsbereich. Die Mitarbeiter/innen in beiden Zollgebäuden sind im Schnitt wesentlich länger in den jeweiligen Fallstudienobjekten untergebracht als bei den beiden sächsischen Objekten.

4.3.2 Lüftungsverhalten

Zu Arbeitsbeginn lüften fast alle Nutzer/innen das Büro. Fast die Hälfte der befragten Nutzer/innen teilte mit, dass sie überwiegend in ihrem Büro Stoßlüften. Ein Viertel der Befragten lüftet ausschließlich mit gekipptem Fenster, das übrige Viertel kombiniert Stoß- und Kipplüftung. Gründe für Kipp- statt Stoßlüften sind, dass das Papier wegfliegen könnte, dass empfindliche Instrumente / Technik einen schnellen Temperaturwechsel nicht vertragen und dass Blumen auf dem Fensterbrett stehen, die erst weggeräumt werden müssten. In der kälteren Jahreszeit verändert sich das Lüftungsverhalten nicht grundlegend: ca. 66 % der Stoßlüfter/innen lüften, wenn auch kürzer, auch im Winter auf diese Art, beim restlichen Teil wird das Fenster nur noch gekippt.

Veränderungen durch Sanierung

Ungefähr die Hälfte der befragten Nutzer/innen gab an, dass vor der Sanierung deutliche Zugserscheinungen durch die Fenster zu spüren waren. In Einzelfällen bewegte sich bei einer bestimmten Windrichtung das Papier auf dem Schreibtisch auch bei geschlossenem Fenster und Regenwasser kam durch die Fenster.

Als Verbesserungen nach der energetischen Sanierung in Bezug auf die Fenster wurde häufig der Wegfall von Zugserscheinungen und die deutliche Verbesserung im Schallschutz genannt, vereinzelt auch die leichtere Bedienbarkeit der Fenster. Trotz des Austauschs der Fenster und der Herstellung einer dichteren Gebäudehülle nimmt die Anzahl an Lüftungsvorgängen teilweise nicht zu, sondern ab: So gaben einige interviewte Personen an, nun weniger zu lüften, da sich die Raumtemperatur mit der ebenfalls stattgefundenen Sanierung der Heizung besser regeln lässt. Vor der Sanierung wurden vermehrt die überhitzten Büros durch kühle Frischluft versucht zu regulieren. Vereinzelt wurde auch angemerkt, dass die Luftqualität nun besser und nicht mehr so trocken sei. Andererseits gaben ebenfalls einige Personen an, dass sich die Luftqualität verschlechtert habe und die Luft trockener sei.

Viele Nutzer/innen gaben an, dass nach der Sanierung die Gemeinschaftsräume, wie Flure, Aufenthaltsräume und Toiletten gelüftet werden müssen. Nach der Sanierung fühlte sich dafür keiner zuständig, oder es wurden zwar die Fenster geöffnet, aber das Schließen vergessen. Dieses Phänomen hat sich aber nach einer Weile größtenteils eingependelt.

Objektspezifische Besonderheiten

Die beiden Zollgebäude liegen an mehrspurigen belebten Straßen. Daher gaben fast alle Befragte in Flensburg und Bremen an, dass die Fenster aufgrund von Schallschutzproblemen relativ schnell geschlossen werden. Eine Kipplüftung bei diesen beiden Objekten führen lediglich Nutzer/innen durch, die ein Büro auf einer von der Straße abgewandten Seite haben. Daher wurde der verbesserte Schallschutz nach der Sanierung von allen Befragten, die ihr Büro zur Straßenseite hatten, als besonders angenehm empfunden. Das Polizeigebäude und auch die Hochschule für Musik befinden sich hingegen in einer relativ ruhigen Lage. Bei diesen beiden Gebäuden konnte bei der Objektbesichtigung festgestellt werden, dass im Sommer die Fenster zum größten Teil gekippt waren. Bei der Hochschule für Musik gibt es einige Überäume, die von Studierenden genutzt werden können. Bei einem Objekt wird durch den/die Hausmeister/in und/oder einen Wachdienst täglich kontrolliert, ob zum Ende der Dienstzeit die Fenster geschlossen sind. Bei den restlichen Gebäuden erfolgt diese zentrale Kontrolle nicht, hier kontrolliert jeder einzelne ob die Fenster im eigenen Büro geschlossen sind und die letzte Person kontrolliert die Gemeinschaftsräume.

4.3.3 Heizungsverhalten

Fast alle Nutzer/innen gaben an, dass die Heizung vor der Sanierung deutlich höher aufgedreht wurde als nach der Sanierung. Zudem teilten einige mit, dass vorher die Heizung häufig nicht funktionierte sich Luft im System befand (Gluckergeräusche) oder dass sich die Heizung nicht gut regeln ließ. Daher haben einige Nutzer/innen die Heizung vorher immer bis zur maximalen Stufe aufgedreht und die überschüssige Wärme „weggelüftet“. Außerdem kühlten vor der Sanierung die Räume erheblich schneller aus, dies war vor allem bei einem Ausfall der Heizung oder bei Wochenenddiensten deutlich zu merken. Einige Befragte gaben an, dann gefroren zu haben oder es wurden zusätzlich mobile Heizgeräte aufgestellt. Viele Nutzer/innen achteten wenig darauf, welche Stufe eingestellt wurde und

haben die Einstellung: „Für mich war es immer nur wichtig, dass es einigermaßen warm war“. Während des Lüftens dreht nur ein kleiner Teil der befragten Nutzer/innen die Heizung aus- oder runter.

Veränderungen durch Sanierung

Fast alle Befragten, die bereits vor der Sanierung im gleichen Gebäude saßen, gaben an, dass durch die energetische Sanierung die Räume nun wärmer und angenehmer sind und nicht mehr so schnell auskühlen. Die Heizung lässt sich nun besser regeln und es wurde beobachtet, dass früher Kolleg/innen dicker angezogen waren.

Die Anzahl der Regelungsvorgänge an der Heizung ist nach der Sanierung deutlich gesunken - bei 71 % der Interviewten verharrt das Regelungsventil auf einer Stufe. Zudem muss die Heizungsregelung nicht mehr so hoch gedreht werden, damit die Räume ausreichend warm werden. Der überwiegende Teil der Nutzer/innen, die sich bereits vor der Sanierung in dem Gebäude befanden, gab an, dass jetzt eine deutlich geringere Stufe ausreicht, um die gewünschte Temperatur in den Räumen zu erreichen. Nach der Sanierung wurde sogar bei einzelnen Befragten die Heizung nach der Sanierung noch nicht aufgedreht, zuvor schon.

Ähnlich wie beim Lüftungsverhalten teilten die Befragten mit, dass Gemeinschaftsräume auch beim Beheizen problematisch sind. So werden Aufenthaltsräume, die aufgrund Dauerlüftens auskühlen anschließend auf höchster Stufe aufgeheizt. Anschließend wird wiederum vergessen, die Heizung herunter zu drehen und somit überhitze der Raum

In einem Fallstudienobjekt gab es eine Art „Energiebeauftragten“, der sich persönlich dazu berufen fühlte, durch die Räume zu gehen und Fenster, Heizung und Licht zu kontrollieren. Dies empfanden die Kolleg/innen jedoch nicht als Einmischung. Nachdem der Kollege in Ruhestand gegangen ist fühlte sich kein anderer mehr dazu berufen, was teilweise bedauert wurde. Andererseits äußerte sich eine Person ablehnend gegenüber dem Tätigwerden Dritter: "Was mich ärgert ist, dass andere an meiner Heizung rumdrehen müssen. Zum Beispiel, wenn ich im Urlaub bin, da ist die immer auf 0".

Objektspezifische Besonderheiten

Bei allen Fallstudienobjekten wurde durch die Objektbesichtigung und die Interviews festgestellt, dass viele Bürotüren tagsüber geöffnet bleiben. Dadurch kommt es zu natürlichen Konvektionsvorgängen und die Wärme wird von den meist wärmeren Büros in kühlere Zonen übertragen. Bei einem Objekt kontrolliert der/die Hausmeister/in die Einstellung der Heizventile in den Gemeinschaftsräumen sehr regelmäßig. Bei der Polizei Dresden wird nach der Sanierung überdurchschnittlich oft die Heizung nachgeregelt - viele Befragte verändern hier täglich mehrmals die Einstellung am Regelventil. Dies ist sicher auch durch die räumliche Anordnung der Heizkörper bzw. der davor gestellten Schreibtische und Schränke begründet. Dadurch kann es zu einem Wärmestau kommen, das Ventil reagiert und reduziert den Zufluss des warmen Wassers. Um die gewünschte Temperatur im Büro zu erreichen, muss das Heizungsventil entsprechend höher aufgedreht werden. Beim Zollamt Flensburg wurden neue Thermostatventile eingebaut. Bei diesem Objekt ist auffällig, dass alle befragten Nutzer/innen die Heizung tagsüber nicht regulieren. Beim Zollamt Bremen wurden die Thermostatventile ebenfalls ausgetauscht, die Vorlauftemperatur reduziert und das Rohrnetz umfangreich hydraulisch abgeglichen. Um einen Wärmestau und mögliche Fehlmessungen zu vermeiden, wurden hier die Thermostatventile teilweise nicht direkt am Heizkörper montiert, sondern an der Wand. Zudem wurden die Heizkörper in den Fluren gegen auf- und zudrehen mit einer Blindkappe geschützt. Bei Beschwerden von Nutzer/innen bezüglich einer zu geringen Raumtemperatur in den Büroräumen wird eine Vorort-Temperaturmessung durchgeführt und die erreichte Temperatur mit der empfohlenen Rauminnentemperatur verglichen.

4.3.4 Sommerlicher Wärmeschutz

Etwa die Hälfte der befragten Nutzer/Innen gab an, dass vor der Sanierung die Temperaturen in den Objekten im Sommer sehr unangenehm waren: „es war eher Badehosendienstklima, also das war belastend“. Die Wärme wurde teilweise mittels Ventilatoren verteilt. Viele Nutzer/innen gaben an, dass es sich durch die Sanierung deutlich verbessert hat. Allerdings nur, wenn die zur Verfügung stehenden Verschattungsmöglichkeiten effektiv eingesetzt werden - dies wird aber nicht von allen Nutzer/innen konsequent umgesetzt

Objektspezifische Besonderheiten

Bei der Hochschule für Musik und der Polizei Dresden bieten Bäume einen natürlichen Sonnenschutz; zudem wurden Innenjalousien eingebaut. Bei dem Zollamt in Flensburg ist das Gebäude ebenfalls auf zwei Seiten durch eine natürliche Verschattung vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt. Innenjalousien bieten hier zusätzlichen Sonnenschutz. Bei der Zollverwaltung in Bremen bestand der Sonnenschutz vor der Sanierung aus Außenjalousien, die sehr störanfällig waren und bei Wind eingefahren werden mussten. Daher sind im Zuge der Sanierung Jalousien angebracht worden, die sich zwischen dem Außen- und Innenfenster befinden und nicht mehr wind- und störanfällig sind. Dies wurde von den meisten Nutzer/innen als erhebliche Verbesserung empfunden.

4.3.5 Unterschiede zum Verhalten im privaten Bereich

Fast die Hälfte der Befragten gab an, dass sich ihr Heizungs- / Lüftungsverhalten im Büro und im privaten Bereich unterscheidet: "Zuhause achtet man schon mehr darauf", "Zu Hause ist man konsequenter"; „Diese Konsequenz ist im Dienst nicht so gegeben, wie zuhause“ oder „Da brauch ich nicht sparen. Das sehe ich dann auch nicht ein. Man ist ja nun mal fast den ganzen Tag auf Arbeit“. Häufig wurde angegeben, dass die Heizung bei Abwesenheit im privaten Bereich eher heruntergestellt und beim Lüften teilweise sogar ausgestellt wird als am Arbeitsplatz. Bei einigen Nutzer/innen ist außerdem die Rauminnentemperatur im Büro höher: "Zuhause ist man schon eher bereit was Dickeres anzuziehen". Die gewählte Raumtemperatur scheint zudem von der Art der Tätigkeit abhängig zu sein. Ein/e Nutzer/in gab an, dass die Temperatur zu Hause höher sei, da im Büro keine rein sitzende Tätigkeit verrichtet wird.

Deutlich unterscheidet sich auch beim Lüften das Verhalten zwischen Arbeitsplatz und privatem Bereich. Rund zwei Drittel der Interviewten, die im Büro nur Kipp- - und gelegentlich Stoßlüften, gaben an, dass sie zu Hause ausschließlich Stoßlüften. Auch Hindernisse für eine Stoßlüftung, wie Blumen auf der Fensterbank, ist man zu Hause bereit herunter zu nehmen.

4.3.6 Erwartungen an die Sanierung

Gut zwei Drittel der Nutzer/innen hatten konkrete Erwartungen an die Sanierung, wobei insbesondere eine Verbesserung des Komforts und der Behaglichkeit genannt wurde (siehe Abbildung 15). Sehr häufig wurden außerdem die Verbesserung des Schallschutzes der Fenster, der Wegfall von Zugscheinungen im Bereich der Fenster sowie eine Verhinderung des schnellen Aufheizens des Gebäudes im Sommer genannt. Einzelne Nutzer/innen erwarteten, dass sich hinsichtlich der Nutzerfreundlichkeit / Bedienbarkeit etwas verändert (Fenster sich besser öffnen und schließen lassen, einfachere Regelung der Heizung, nicht mehr störanfälliger Sonnenschutz). Vereinzelt wurde auch die Erwartung geäußert, dass durch die Sanierung der Energieverbrauch des Gebäudes gesenkt wird sowie

erneuerbare Energien eingesetzt werden. Zudem erwarteten einige Nutzer/innen neben einer Außensanierung des Gebäudes auch eine Innensanierung.

Bei der Befragung konnte allerdings festgestellt werden, dass viele Befragte die sich eingestellten Veränderungen mit den Erwartungen verglichen. Erwartungen sind im Nachhinein deshalb schwer von den sich eingestellten Veränderungen zu trennen.

Bei fast allen Personen, die Erwartungen an die Sanierung hatten, wurden diese erfüllt. Nur vereinzelt wurden Erwartungen an Energieeinsparungen bzw. die Integration erneuerbarer Energien nicht erfüllt (u. a. da die erzielte Energieeinsparung nicht bekannt ist). Ebenfalls waren einige Nutzer/innen, die sich eine gleichzeitige Innensanierung wünschten, enttäuscht, dass diese nicht erfolgte.

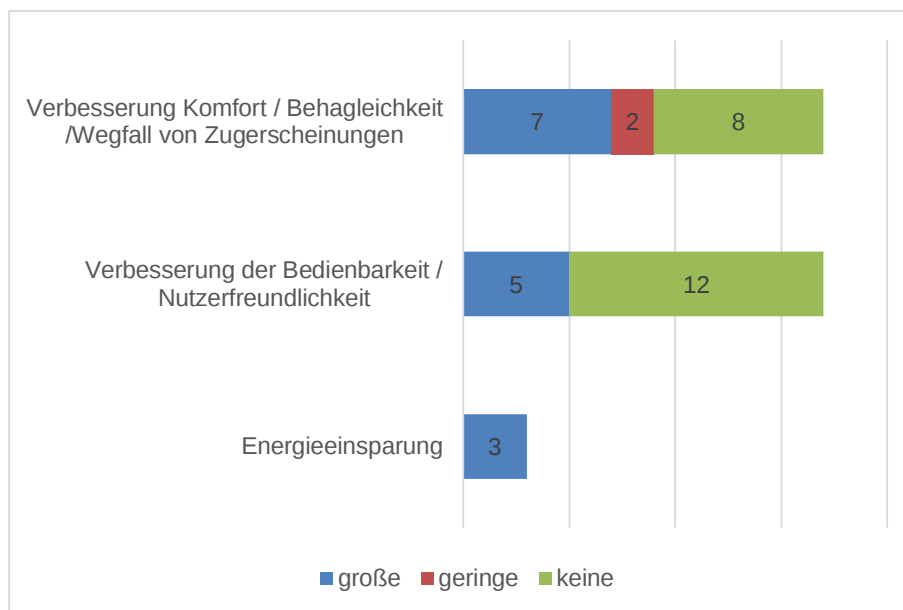


Abbildung 15: Erwartungen der Nutzer/innen an die Sanierung

Bei den beiden Zollgebäuden wurde die energetische Sanierungsmaßnahme im laufenden Dienstbetrieb durchgeführt; dies empfanden alle Nutzer/innen als sehr große Belastung, teilweise sogar als Zumutung.

4.3.7 Interesse an den Themen Energieverbrauch und Energiesparen

Auffällig ist, dass in keinem Objekt den Nutzer/innen die erzielten Energieeinsparungen bekannt sind. Auch die Energieverbrauchswerte kennen die Nutzer/innen nicht. Dabei äußert gut ein Drittel der Befragten ein Interesse daran. Einzelne Nutzer/innen gaben an, dass die Kenntnis der Energieeinsparung die Akzeptanz der teilweise im laufenden Dienstbetrieb durchgeführten Sanierungsmaßnahme erhöhen könnte. Die interessierten Nutzer/innen wünschen sich allerdings eine gut verständliche Aufbereitung der Daten, z. B. Einsparung vorher vs. nachher in Prozent oder den Vergleich des Gebäudes zu anderen ähnlichen Gebäuden um einen Vergleich zu haben. Die Angabe von reinen Verbrauchswerten ist für die meisten Nutzer/innen weniger interessant: „Ich könnte solche Werte schwer einschätzen“ sagte ein/e Befragte/r. Beispielsweise könnten die Werte auf einer einmal jährlichen Versammlung oder im Intranet bekannt gegeben werden.

Energieeinsparen im Büro scheint für die Nutzer/innen ganz unterschiedlich relevant zu sein. Es gibt Befragte, die an Energiesparen im Dienst gar nicht interessiert sind: "Da brauch ich nicht sparen. Das sehe ich dann auch nicht ein. Man ist ja nun mal fast den ganzen Tag auf Arbeit." oder „...ob man nun in den Urlaub fährt oder zum Wochenende, die Geräte bleiben dann eben an“. Allerdings gibt es auch Gegenbeispiele: "Es kann nicht sein, dass ich Leute mit Geld locken muss, um auf die Umwelt zu achten". Einige Nutzer/innen meinten, dass ein Anreizsystem helfen könnte die Motivation zum Thema Energieeinsparen zu erhöhen. Als Ideen wurde genannt, dass ein Teil der eingesparten Kosten der Dienststelle zur freien Verfügung verbleiben könnte, z. B. als Finanzierungszuschuss für die Weihnachtsfeier, Büroausstattung oder Innenrenovierungen. Andere Nutzer/innen waren dagegen der Meinung, dass ein solches Anreizsystem nicht beim Energiesparen helfen würde.

Einzelne Interviewte sprachen von sich aus das Thema Einsparung elektrischer Energie an, da sie hier noch größere Einsparpotentiale sehen: Computer und teilweise auch die Beleuchtung werden nach Dienstende oft nicht ausgeschaltet. Computer bleiben sogar während des Urlaubs an. Außerdem wird vereinzelt die Beleuchtungssituation als schlecht empfunden, so dass zusätzlich eigene Schreibtischlampen mitgebracht werden.

4.3.8 Fazit zum Nutzungsverhalten

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass viele Nutzer/innen generell im Dienstgebäude sorgloser Energie konsumieren als im privaten Bereich. Dies konnte sowohl bei dem Lüftungsverhalten als auch bei der gewählten Raumtemperatur festgestellt werden. Ein besonders Problem stellen Gemeinschaftsräume dar, die nicht im Verantwortungsbereich von einer Einzelperson liegen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass viele Befragte sich nicht mehr genau an ihr alltägliches Lüftungs- und Heizverhalten sowie die Situation vor der Sanierung erinnern, so dass ein Vergleich zwischen vor und nach der Sanierung nur eingeschränkt getroffen werden kann.

In den Fallstudienobjekten konnten bei der Auswertung der Interviews nur wenige Hinweise auf einen gestiegenen Energiekonsum der Nutzer/innen nach der energetischen Sanierung der Objekte erkannt werden. Daher sind allenfalls **sehr geringe Rebound-Effekte** zu erwarten:

- Einige Nutzer/innen geben an, dass die Luftqualität nach der Sanierung schlechter ist – in Folge wird ggf. mehr gelüftet (aber: andere geben an, dass die Luftqualität besser ist). Zum **Lüftungsverhalten** gaben die Nutzer/innen an, regelmäßig vor allem zu Beginn der Arbeit zu lüften. Die Lüftungsdauer ist stark von äußeren Faktoren (wie z. B. Geräuschkulisse) geprägt. Aus Forschungsprojekten zu Wohngebäuden ist bekannt, dass auch bei gleichen Gebäudetypen das Lüftungsverhalten sehr individuell ist. Daher kann davon ausgegangen werden, dass auch in Verwaltungsgebäuden mit ähnlichen Büros ein sehr individuelles Lüftungsverhalten vorzufinden ist. Zudem haben Untersuchungen gezeigt, dass die realen Fensteröffnungszeiten die subjektiv eingeschätzte Lüftungsdauer oft überschreiten (vgl. Richter et al. 2002). Beim Kipplüften wird im Vergleich zum Stoßlüften eine wesentlich längere Zeit benötigt um das gleiche Luftvolumen auszutauschen. Dies hat zur Folge, dass Räume und deren Einbauten besonders im Winter stärker auskühlen; anschließend wird deutlich mehr Energie für die Aufheizung benötigt.
- Wahrscheinlich hat eine partielle Erhöhung der **Rauminnentemperaturen** durch die Sanierung stattgefunden. Einige Nutzer/innen gaben an, dass das nach der Sanierung nun die Kollegen/innen leichter bekleidet sind (z. B. nur noch mit T-Shirt im Winter bekleidet statt mit Pullover). Für Wohngebäude haben Richter et al. (2002) berechnet, dass durch eine Erhöhung der

Raumtemperatur von 1 K bei älteren Gebäuden 8 – 10 % bzw. bei Niedrigenergiehäusern 9 – 12 % mehr thermische Energie benötigt wird³.

Konkrete Beispiele für aufgetretene Verluste, aufgrund von **Wechselwirkungen mit Technologien** konnten bei keinem der vier Fallstudienobjekte festgestellt werden. Dies liegt auch daran, dass die eingesetzte Technologie der Gebäudebeheizung sowie konventionelle Lüftung in den meisten Wohn- und Bürogebäuden längst Stand der Technik ist.

Darüber hinaus gibt es Hinweise auf **Verluste** durch sorglosen Umgang mit Energie und weiteren Ursachen, bei denen allerdings keine Änderung gegenüber der Zeit vor der Sanierung festgestellt werden konnte:

- Kein Stoßlüften sondern nur Kipplüften wegen Blumen, Papier auf Schreibtisch oder empfindlichen Instrumenten. Dies führt zu einer zusätzlichen Auskühlung der Räume.
- Schreibtisch oder Schrank vor dem Heizkörper versperrt die freie Konvektion im Raum. Dadurch wird die gewünschte Temperatur mit „normaler“ Heizungseinstellung nicht erreicht und die Nutzer/innen drehen die Heizung stärker auf und es kann ggf. zu einer Raumüberheizung kommen.
- Durch geöffnete Bürotüren kommt es zu einem konvektiven Wärmeaustausch von wärmeren Zonen (Büros) in kältere Zonen (Flure, Toilettenräume)
- Überheizen von Büros und Gemeinschaftsräumen und Ausgleich über das Lüften
- Kippen der Fenster über einen längeren Zeitraum während der Heizperiode (z. B. über die Nichtanwesenheit nach Dienstende)
- Heizungen werden selten herunter oder ausgedreht, nicht während des Lüftens, zum Ende der Arbeitswoche und auch nicht während eines Urlaubs
- z. B. Wärme wird weggelüftet, wenn der „wärmeliebende“ Kollege das Büro verlässt

In Mehrpersonenbüros, Gemeinschaftsräumen und bei einer nicht optimalen Heizungseinstellung wurde von einem Teil der Nutzer/innen angegeben, zu warme Luft „weg zu lüften“. Simulationsrechnungen von Richter et al. (2002) in Wohngebäuden haben gezeigt, dass mit sinkender **Nutzertoleranz** bezüglich einer Temperaturdifferenz zwischen gewünschter und vorherrschender Raumtemperatur und Thermostatregler mit einer hohen Regelabweichung von 2 Kelvin hohe Energieverluste zu erwarten sind. Toleriert der / die Nutzer/in beispielsweise vier Kelvin Temperaturunterschied zwischen gewünschter und realer Raumtemperatur ist der Energieverlust mit 0,5 % relativ gering. Bei einer Toleranz von 2 Kelvin steigt der Energieverlust schon merklich auf 5 %. Bei einer sehr geringen Nutzertoleranz von 1 Kelvin beträgt der Energieverlust bereits 29 %⁴. Aus den Interviews kann abgeleitet werden, dass es in energetisch sanierten Gebäuden wahrscheinlich besonders in Mehrpersonenbüros mit einer geringen Nutzertoleranz nennenswerte Energieverluste geben wird.

Und nicht zuletzt gibt es auch Hinweise für Veränderung, die zu einer **Reduktion der Nachfrage nach Energiedienstleistungen** führen. So funktionierten die Regler an einigen Heizungen vor der energetischen Sanierung schlecht oder teilweise gar nicht, Heizkörper wurden nicht richtig warm oder reagierten sehr träge. Um in den Räumen eine gewünschte Innentemperatur zu erreichen, wurden die Heizkörper immer bis zur Maximalstufe aufgedreht und die überhitzten Räume mit Frischluftzufuhr wieder ausgeglichen.

³ Ergebnisse für ein Wohngebäude mit ca. 158 kWh/(m² a) bzw. 65 kWh/(m² a) thermischem Energiebedarf

⁴ Ergebnisse für ein Wohngebäude mit einem thermischen Energiebedarf von ca. 158 kWh/(m² a).

4.4 Energiebedarf und -verbrauch in den Fallstudienobjekten

In Tabelle 3 sind die thermischen Energiebedarfs und –verbrauchswerte für die Gebäudebeheizung (Raumwärme) der Fallstudienobjekte sowie Vergleichswerte ausgewiesen. Diese Werte werden in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

Tabelle 3: Thermischer Energiebedarf und -verbrauch (Raumwärme)

Gebäude	vor oder nach Sanierung	Energiebedarf (kWh/ (m ² a))	Energieverbrauch ^{*1} (kWh/ (m ² a))	Anzahl der jährlichen Abrechnungsperioden für die Verbrauchswerte	Vergleichswerte für Raumwärme und Warmwasser ^{*4} (kWh/ (m ² a))
HS für Musik, Dresden	vor	140 ^{*2}	143	4	100 - 190
	nach	83	47	3	
Polizeirevier Dresden	vor	123	106	3	80 - 150
	nach	61	52	5	
Zollverwaltung Flensburg	vor	244	204	4	
	nach	136	117	3	
Zollamt Bremen	vor	215	206	4	
	nach	96	88	2 ^{*3}	

^{*1} Witterungs- und Heizperioden bereinigt

^{*2} Vergleichswert nach EnEV 2007 des BWZK für Raumwärme + Warmwasser, Berücksichtigung der BWZK 2300 und 9100 zu je 50 Prozent

^{*3} In der ersten Abrechnungsperiode fand für ein Teilgebäude noch die Sanierungsmaßnahme statt.

^{*4} Zusammenfassung von mehreren Datenquellen für Vergleichswerte, siehe Anhang 5

Energiebedarfswerte

Die Bedarfswerte wurden entsprechend der Bilanzierungsmethodik der EnEV berechnet und aus den Energieausweisen und -konzepten der Ingenieurbüros entnommen. Für das Zollamt Bremen wurde die vom Ingenieurbüro übergebene Datei der Energiebedarfsberechnung genutzt um mit den Angaben des Gebäudeeigentümers den Bedarfswert vor der Sanierung zu berechnen⁵.

⁵ Das Zollamt Bremen besteht aus zwei energetisch sanierten Teilgebäuden, die einen unterschiedlichen spezifischen Energiebedarf aufweisen, daher wurde für den Gebäudekomplex ein spezifischer Bedarfswert berechnet unter Berücksichtigung der jeweiligen Nettogrundfläche und dem Bedarfswert der beiden Teilgebäude.

Da für die Hochschule für Musik kein Energiebedarf im unsanierten Zustand berechnet wurde, konnte nur ein Vergleichswert gemäß Bauwerkszuordnungskatalog (BWZK) (BMVBS (2009a)) verwendet werden. Bei dem angenommenen Wert von 140 kWh/m²a handelt es sich um einen Mittelwert zwischen den Gruppen 2300 (Institutsgebäude für Forschung und Untersuchung) und 9100 (Gebäude für kulturelle und musische Zwecke). Dieser Wert ist allerdings mit Unsicherheiten behaftet und könnte im unsanierten Zustand höher liegen. So geben Gülec et.al. (1993) für öffentliche Einrichtungen bzw. Lehr- und Unterrichtsgebäude mit entsprechendem Baujahr in den neuen Bundesländern einen thermischen Energiebedarf von 154 bzw. 180 kWh/m²a an. Dieser Studie liegt eine statistische Erhebung von bis zu 17 % des Gebäudebestandes der ehemaligen DDR zu Grunde.

Durch die energetische Sanierung konnte der Energiebedarf in allen vier Fallstudienobjekten um 40 % bis 55 % gesenkt werden. Obwohl die beiden Zollgebäude sowie das Polizeirevier recht ähnlich genutzt werden und auch bei allen Gebäuden die Hülle umfassend energetisch saniert wurde, unterscheidet sich ihr Energiebedarf deutlich. So hat die Zollverwaltung Flensburg nach der Sanierung mit 136 kWh/m²a einen mehr als doppelt so hohen spezifischen Energiebedarf wie das Polizeirevier Dresden mit 61 kWh/m²a.

Energieverbrauchswerte

Die Energieverbrauchswerte wurden den Rechnungen der Energieversorgungsunternehmen entnommen; so standen die absoluten Werte und genaue Abrechnungsperioden zur Verfügung. Als Bezugsfläche wurde die beheizte Nettogrundfläche herangezogen um die spezifischen Energieverbräuche je Heizperiode zu berechnen. Die spezifischen Verbräuche vor und nach der Sanierung wurden jeweils arithmetisch gemittelt (Einzelwerte sind im Anhang 4 zu finden). Für die vier Fallstudienobjekte lag der Abschluss der Sanierungsmaßnahmen zwischen 2008 und 2011. Dadurch unterscheidet sich die Anzahl der zur Verfügung stehenden Abrechnungsperioden und somit die Robustheit des Mittelwertes erheblich. So konnten zum Zeitpunkt des Berichtes nur zwei Abrechnungsperioden für das Zollamt Bremen, hingegen fünf für das Polizeirevier Dresden verwendet werden.

Beim Zollamt Bremen erfolgte vor der energetischen Sanierungsmaßnahme bereits eine Erneuerung am Wärmeerzeuger: der Erdöl-Heizkessel wurde im Jahr 2006 gegen ein Erdgas-Brennwertgerät ausgetauscht. Die Erdölbetankung wurde mehrmals jährlich, nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten (Ölpreis) vorgenommen. Da deshalb nicht immer eine vollständige Betankung erfolgte musste der Ölverbrauch den einzelnen Abrechnungsperioden zugerechnet werden.

Bei der Betrachtung der spezifischen Energieverbrauchswerte der einzelnen Abrechnungsperioden (siehe Anhang 4) ist auffällig, dass der thermische Verbrauch in den ersten Jahren nach der Sanierung stetig abnimmt. Vor der Sanierung war der thermische Energieverbrauch relativ konstant. Dies lässt darauf schließen, dass vor der Sanierung die Nutzer/innen ein relativ konstantes Nutzungsverhalten zeigten und die Anlagentechnik konstant betrieben wurde. Nach der Sanierung nahm der thermische Energieverbrauch dagegen stetig ab, dies ist bei der Polizei Dresden auch noch fünf Jahre nach der Sanierung zu beobachten. Daher kann davon ausgegangen werden, dass in den Jahren nach der Sanierung die Anlagentechnik weiter optimiert wurde und/oder die Nutzer/innen sich erst nach und nach an die veränderten thermischen Bedingungen des Gebäudes anpassen.

Vergleichswerte gemäß Bauwerkszuordnungskatalog (BWZK)

Der Energieverbrauch der Fallstudienobjekte soll nachfolgend mit Literaturwerten verglichen werden:

- Um den Energieverbrauch von Nichtwohngebäude einschätzen zu können, wurden vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS 2009a) **Vergleichswerte für den Gebäudebestand** nach unterschiedlichen Gebäudekategorien veröffentlicht (gemäß **Bauwerkszuordnungskatalog**). Diese Vergleichswerte sollen den vorhandenen Gebäudebestand abbilden und müssen bei verbrauchsorientierten Energieausweisen mit angegeben werden. Allerdings umfassen die Vergleichswerte neben der Raumwärme auch die Warmwassererzeugung. Die Verbrauchs- und Bedarfswerte der Fallstudienobjekte beziehen sich dagegen nur auf Raumwärme. Da in den Fallstudienobjekten die Warmwassernutzung sehr gering ist, wird diese Abweichung beim Vergleich vernachlässigt.
- Mit **Benchmarks** (BMVBS 2009b) wurde der Energieverbrauch von über 5.000 Gebäuden - darunter fast 2.300 Bürogebäude - ausgewertet. Für Gebäudetypen, die den Fallstudienobjekten ähnlich sind, wurden die Vergleichswerte ermittelt. Diese sind im Anhang zu finden. Auffällig ist, dass die Vergleichswerte des Benchmarks bei allen Gebäudetypen über den EnEV-Vergleichswerten des BWZK liegen.

Die beiden **Zollverwaltungen und das Polizeigebäude** weisen eine sehr ähnliche Nutzung auf: neben einen hohen Büroanteil verrichten einige Mitarbeiter/innen auch Außeneinsätze. Daher kann angenommen werden, dass diese Gebäude einen ähnlichen Gebäudenutzungstyp haben, der zwischen den Kategorien „Büro- / Verwaltungsgebäude“ und „Polizeidienstgebäude“ liegt. Die Spanne der **Vergleichswerte** für diese Gebäudekategorien ist groß und liegt zwischen **80 und 150 kWh/m²a**. Vor der energetischen Sanierung haben die beiden Zoll- und das Polizeigebäude einen thermischen Energiebedarf von 123, 215 und 244 kWh/m²a und liegen somit eher an der oberen Grenze der angegebenen Vergleichswerte oder sogar deutlich darüber. Nach der energetischen Sanierung liegt der thermische Energiebedarf bei 61 kWh/m²a für das Polizeigebäude und bei 96 bzw. 136 kWh/m²a für die Zollgebäude. Das Polizeirevier liegt nach der Sanierung deutlich unter den Vergleichswerten, die Zollgebäude liegen in der angegebenen Spanne.

Die **Hochschule für Musik** wird als Lehrgebäude mit Büros, Überäumen und medizinischen Untersuchungsräumen genutzt. Aufgrund dieser Mischnutzung ist die Einordnung in einen Gebäudetyp schwierig. Angenommen wird daher eine Mischnutzung zwischen Lehr- und Forschungsgebäuden und Gebäuden für kulturelle Zwecke. Nach der Sanierung hat die Hochschule einen Energiebedarf von 83 kWh/m²a und liegt damit deutlich unter den **Vergleichswerten von 100 – 148 kWh/m²a**.

Thermische Energieeinsparung

Beim Zollamt Bremen ist mit 118 kWh/m²a die höchste und mit 54 kWh/m²a bei dem Polizeirevier Dresden die geringste tatsächliche Energieeinsparung erzielt worden. Das zeigt, dass in allen vier untersuchten Fallstudienobjekten die tatsächliche Energieeinsparung die erwartete Energieeinsparung übertrifft. Im Fall der HS für Musik Dresden ist die tatsächliche Energieeinsparung sogar höher als die berechnete Energieeinsparung, d. h. der Verbrauch ist stärker gesunken als der Bedarf.

Tabelle 4: Thermische Energieeinsparung

	berechnete Energieeinsparung (B₁-B₂)	erwartete Energie- einsparung (V₁-B₂)	tatsächliche Energie- einsparung (V₁-V₂)
	[kWh/(m²*a)]		
HS für Musik, Dresden	57	60	96
Polizeirevier Dresden	62	45	54
Zollverwaltung Flensburg	108	68	87
Zollamt Bremen	119	110	118

4.5 Rebound-Effekte in den Fallstudiengebäuden

Tabelle 5 fasst die Ergebnisse der drei verschiedenen Maßeinheiten von Rebound-Effekten, die in der vorliegenden Studie verwendet wurden, für die vier Fallstudiengebäude zusammen – ergänzt um den Heizenergiebedarf und -verbrauch vor und nach der energetischen Sanierung. Bei der Interpretation dieser Zahlen sind die Messunsicherheiten und unzulänglichen Berechnungsverfahren, die in Kapitel 6.4.1 diskutiert wurden, zu berücksichtigen.

Das Polizeirevier Dresden, der Zollverwaltung Flensburg und Zollamt Bremen zeigen sehr ähnliche Elastizitäts-Rebound-Effekte (-1,5 %, 4,9 % und -5,5 %) und ihre Energieperformancelücken (EPL) nach der Sanierung sind ebenfalls ähnlich (-14,7 % -13,9 % und -8.3 %). Es gibt eine größere Spanne bzgl. ihrer Energieeinspardefizite (EED). Aber, wie oben ausgeführt wurde, liefert die EED nicht immer zuverlässige Ergebnisse, so dass dieses nicht weiter berücksichtigt wird. Für die HS für Musik Dresden sind sowohl der Elastizitäts-Rebound-Effekt als auch die EPL nach der Sanierung deutlich niedriger als für die anderen drei Gebäude. Die drei unterschiedlichen Werte für den Rebound-Effekt sind in Tabelle 5 zusammen mit der EPL vor der Sanierung dargestellt. Grafiken, die den Zusammenhang von Verbrauch und Bedarf darstellen, sind jeweils bei den Ergebnissen zu den Fallstudienobjekten integriert.

Tabelle 5: Rebound-Effekte und EPL vor Sanierung der Fallstudiengebäude

	Elastizitäts-Rebound- Effekt (%)	Energie-Performance-Lücke (EPL) vor der Sanierung (%)	Energie-Performance-Lücke (EPL) nach der Sanierung (%)	Energie-Einspar-Defizit (EED) (%)
HS für Musik Dresden	-113	2,1	-43,5	-60,0
Polizeirevier Dresden	-1,5	-13,8	-14,8	-20,0
Zollverwaltung Flensburg	4,9	-16,4	-14,0	-27,9
Zollamt Bremen	-5,5	-4,2	-8,3	-7,2

4.5.1 Hochschule für Musik, Dresden

Da die EPL nach der Sanierung deutlich sinkt, ist der Elastizitäts-Rebound-Effekt mit -112,8 % extrem niedrig. Abbildung 16 zeigt die Verbrauchs- und Bedarfswerte sowie die Kurve zur Berechnung des Elastizitäts-Rebound-Effekts. Aufgrund der mathematischen Funktion des Rebound-Effekts (siehe Anhang 1) handelt es sich dabei um eine Kurve und keine gerade Linie. Die Kurve zeigt das Verhältnis zwischen Energieverbrauch und der Nachfrage nach Energiedienstleistung und berücksichtigt dabei die Effekte der energetischen Sanierung. Ein negativer Rebound-Effekt zeigt, dass es zu einer größeren Energieeinsparung kommt als das durch die Steigerung der Energieeffizienz zu erwarten wäre. Ein negativer Rebound-Effekt weist also auf eine Reduktion des Verbrauchs an Energiedienstleistungen hin. Es muss die Frage gestellt werden: Was könnte diese Reduktion verursacht haben?

Erstens, die Nutzung des Gebäudes änderte sich nach der Sanierung (siehe Kapitel 4.2), woraus sich veränderte Energieverbräuche ergeben können. Zweitens wurde eine Reihe von Musikübungsräumen im Keller und im Erdgeschoss mit ca. 10 cm dickem Schallschutzmaterial auf allen vier Innenwänden ausgestattet. Dies führt auch zu einer thermischen Isolierung. Eine Auswirkung davon ist, dass diese Räume wahrscheinlich durch die physische Aktivität des Spielens eines Musikinstruments sehr warm werden und wenig oder keine Heizung erforderlich ist. Ein weiterer Effekt könnte sein, dass die Zimmer als ein Block von Wärmedämmung fungieren, welche Wärme in den Innenräumen halten. Dies sind nur erste Erklärungsversuche, da es keine bekannten veröffentlichten Studien über die thermischen Effekte von Schalldämmung in dieser Art von Gebäuden gibt.

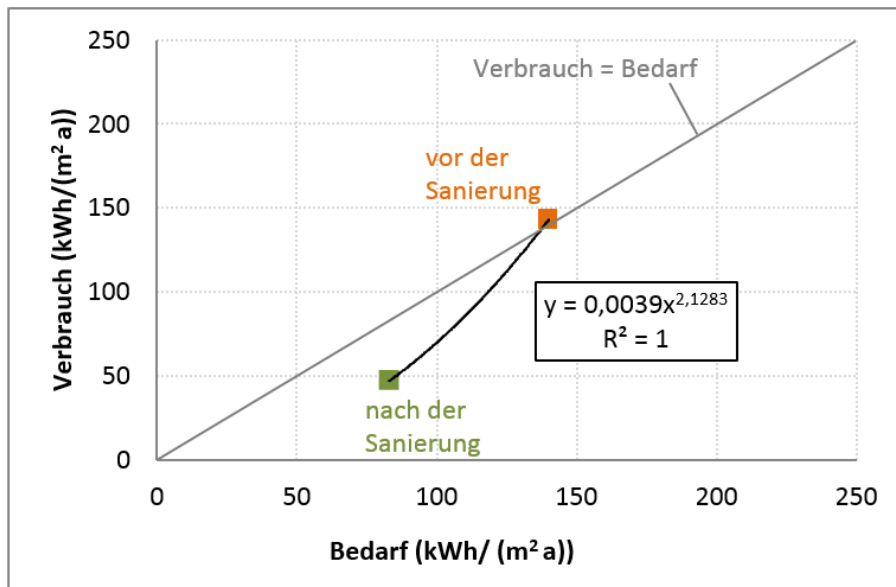


Abbildung 16: HS für Musik Dresden Verbrauch & Bedarf vor und nach der Sanierung

Darüber hinaus ist bei der Hochschule für Musik Dresden zu berücksichtigen, dass der Bedarfswert vor Sanierung nur auf Basis des BWZK abgeschätzt wurde. Unter Hinzuziehung anderer Quellen könnte er auch bei bis zu 180 kWh/m²a liegen (siehe Kapitel 4.4). Damit bliebe der Rebound-Effekt zwar deutlich negativ, würde sich aber auf -44 % erhöhen. Ebenso würde die EPL deutlich weniger sinken. Damit würde sich die Aussage nicht grundlegend ändern.

4.5.2 Polizeirevier Dresden

Wie Bedarf und Verbrauch sich nach der Sanierung in dem Polizeigebäude in Dresden ändert zeigt Abbildung 17. Der Verbrauch ist nur geringfügig niedriger als der Bedarf vor und nach der Sanierung, so dass es wenig Änderung in der EPL gibt, und damit einen niedrigen Elastizitäts-Rebound-Effekt. Die EPL ändert sich von -13,8 %, bei einem Bedarf von 123 kWh/m²a, auf -14,8 %, bei einem Bedarf von 61 kWh/m²a. Diese Verringerung der EPL von 1 % ist der Grund für den kleinen und negativen Elastizitäts-Rebound-Effekt von -1,5 %.

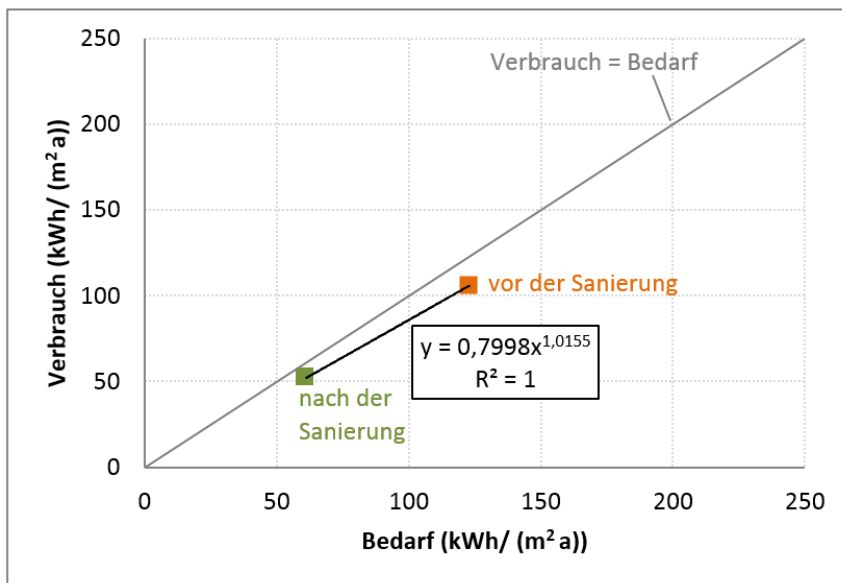


Abbildung 17: Polizeirevier-Dresden Verbrauch & Bedarf vor und nach der Sanierung

Obwohl die meisten Nutzer/innen dieser Gebäude vor und nach der Sanierung verschieden sind, sind die Nutzungsaktivitäten im Gebäude ähnlich. Da die EPLs vor und nach der Sanierung auch sehr ähnlich sind, legt dies nahe, dass die Nutzer/innen vor der Sanierung ein ähnliches Niveau von Energiedienstleistungen nutzten wie nachher.

4.5.3 Zollverwaltung – Flensburg

Die Rebound-Effekte für die Zollverwaltung Flensburg sind in Tabelle 5 und Abbildung 18 dargestellt. Obwohl die Bedarfs- und Verbrauchswerte vor und nach der Sanierung in diesem Gebäude höher als in dem Polizeirevier Dresden sind, weisen die Rebound-Effekte große Ähnlichkeiten auf. Die EPL steigt von -16,4 % auf -14,0 %, was zu einem geringen Rebound-Effekt von 4,9 % führt.

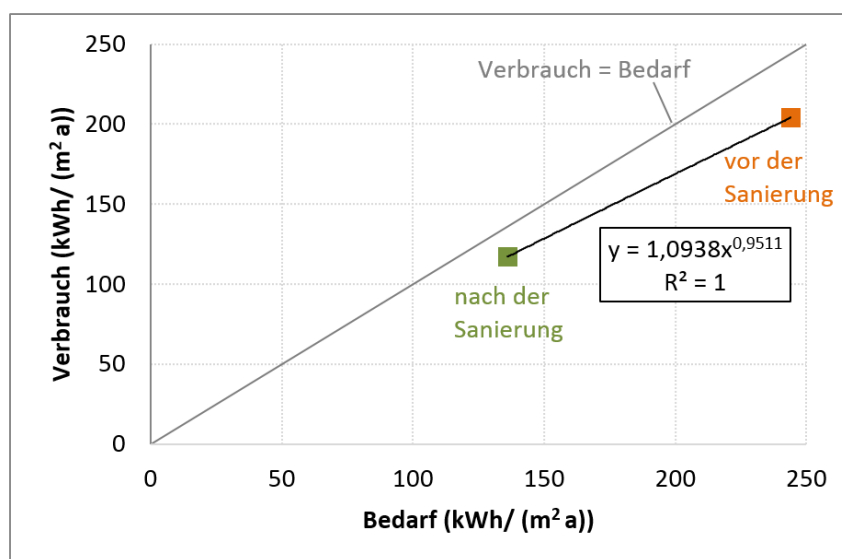


Abbildung 18: Zollverwaltung Flensburg Verbrauch & Bedarf vor und nach der Sanierung

Die Nutzung und die Verwender/innen in diesem Gebäude sind vor und nach der Sanierung überwiegend unverändert. Die Abbildungen zeigen, dass das Niveau an konsumierten Energiedienstleistungen durch die Verwender davor und danach etwa gleich hoch ist.

4.5.4 Zollamt – Bremen

Die Rebound-Effekte für das Zollamt Bremen sind in Tabelle 5 und Abbildung 19 dargestellt. Hier reduziert sich die EPL nach der Sanierung von -4,2 % auf -8,3 %, was zu einem negativen, aber kleinen Elastizitäts-Rebound-Effekt von -5,5 % führt. Dieser Effekt ist ähnlich wie bei den beiden vorherigen Gebäuden. Die Reduktion der EPL nach der Sanierung ist sehr gering und bewegt sich im Bereich der anzunehmenden Fehlergrenzen.

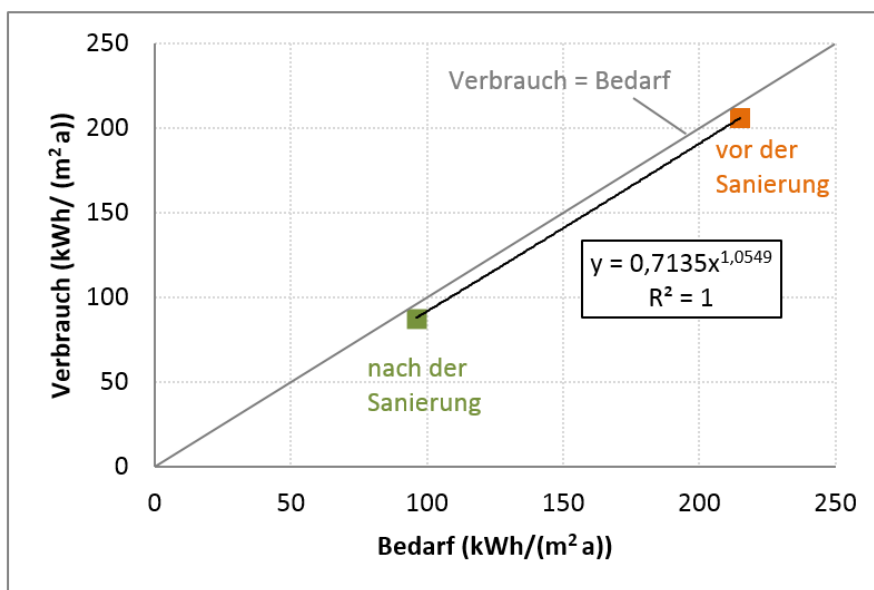


Abbildung 19: Zoll-Bremen Verbrauch & Bedarf vor und nach der Sanierung

4.5.5 Vergleich der Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse untereinander und mit den in Kapitel 3.3 dargestellten Datensätzen verglichen. Obschon die vorhandenen Datensätze für den Verbrauch und Bedarf in deutschen Nichtwohngebäuden klein sind, ist es interessant Vergleiche zu den Ergebnissen der vier Fallstudien anzustellen. Hinzugezogen werden außerdem die deutlich größeren Datensätze zu Verbrauch und Bedarf in Wohngebäuden (Sunikka-Blank und Galvin 2012).

Die Rebound-Effekte beim Polizeirevier Dresden, der Zollverwaltung Flensburg und dem Zollamt Bremen sind fast Null und aufgrund der anzunehmenden Fehlerspanne bei den Daten kaum zu differenzieren. Sie sind somit sehr niedrig im Vergleich zu den Durchschnittswerten der abgeschätzten Rebound-Effekte aus den Datensätzen von Nichtwohn- und Wohngebäuden (siehe Abbildung 20). Die "mathematische" Erklärung für diese geringen Rebound-Effekte ist, dass sich die EPL dieser Gebäude vor und nach Sanierung kaum ändern. Daraus resultiert ein sehr geringer Rebound-Effekt.

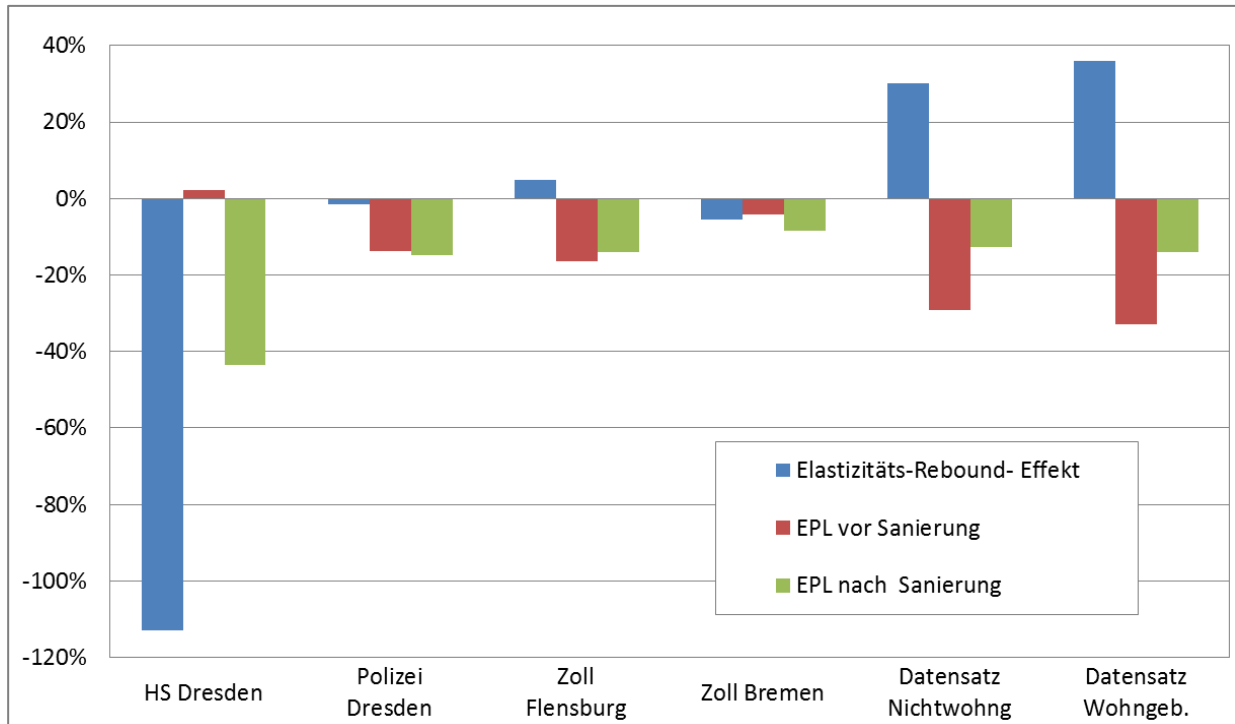


Abbildung 20: Rebound-Effekte und EPL der Fallstudiengebäude und der Vergleichsdatsätze

Quelle: Eigene Darstellung; Datensatz Nichtwohng Gebäude siehe Kapitel 3.3.4; Datensatz Wohngebäude Sunikka-Blank / Galvin 2012; Die EPL-Werte basieren auf einem Bedarf von 200 kWh/m²a vor und 100 kWh/m²a nach der Sanierung.

Die EPL der Fallstudienobjekte ist im Vergleich zu den Durchschnittswerten der beiden Datensätze für Nichtwohng Gebäude deutlich höher (weniger negativ) - und sehr hoch im Vergleich zu Wohngebäuden. Wenn diese Zahlen verlässlich sind würde dies bedeuten, dass diese Gebäude bezogen auf ihren Bedarfswert deutlich mehr Heizenergie verbrauchen als die Durchschnittswerte der anderen Gebäude. Damit ihr Verbrauch nach der Sanierung vergleichbar wäre mit dem von bekannten durchschnittlichen Wohn- und Nichtwohng Gebäuden des gleichen Bedarfs, wären sogar deutlich negative Rebound-Effekte notwendig.

Dieses Ergebnis wirft ein wichtiges Thema für Politik und Praxis auf: Ein niedriger Rebound-Effekt bedeutet nicht automatisch eine erfolgreiche Sanierung in Bezug auf das Erreichen von Energieverbrauchs- und Emissionszielen. Um das Ergebnis richtig einzuschätzen, sollte die EPL ebenfalls berücksichtigt werden. Eine hohe EPL kann bedeuten, dass trotz eines geringen Rebound-Effekts nach der Sanierung ein vergleichsweise hoher Verbrauch vorliegt. Es sollte auch beachtet werden, dass die EPL einen Hinweis für das soziale Potenzial bei der Reduzierung des Energieverbrauchs sein kann. Eine hohe EPL kann darauf hindeuten, dass Nutzer/innen mehr verbrauchen als für ihren Grundkomfort und Nutzen notwendig ist und dass Einsparungen durch organisatorische, Management- und Verhaltensänderungen erzielt werden können.

Einen Sonderfall stellt in unseren Untersuchungen die Hochschule für Musik dar. In diesem Gebäude bewegt sich das Muster von Verbrauch und Bedarf im Vergleich zum Durchschnitt der Datensätze von Nichtwohng Gebäuden in die entgegengesetzte Richtung: Anstelle von einem Anstieg der konsumierten Energiedienstleistungen verringert sich diese deutlich. Mögliche Gründe für den extrem niedrigen Elastizitäts-Rebound-Effekt in diesem Gebäude wurden bereits oben diskutiert.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

5.1 Zentrale Ergebnisse

Das Forschungsprojekt hat Rebound-Effekte in vier Nichtwohngebäuden des öffentlichen Dienstes untersucht. Es setzt diese in den Kontext der aktuellen Erkenntnisse zur Bedeutung des Rebound-Effekts im Bereich Gebäudeenergieeffizienz. Fast die gesamte gebäudebezogene Rebound-Effekt-Forschung basiert bislang auf Wohngebäuden. Mittels einer Literaturübersicht wurde das aktuelle Wissen zum Thema Energieeinsparung in Nichtwohngebäuden, insbesondere Bürogebäuden, zusammen getragen (siehe Kapitel 3). Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis für die Interpretation der Fallstudienresultate. Zu diesem Zweck wurden auch drei Datensätze zum thermischen Energiebedarf und -verbrauch in Nichtwohngebäuden in Deutschland herangezogen. Allerdings sind diese Datensätze klein – der größte der drei enthält nur 93 Gebäude – und in nur zwei konnten die Bedarfs- und Verbrauchswerte wissenschaftlich validiert werden. Aufgrund des Fehlens größerer Datensätze wird dennoch auf diese Daten zurückgegriffen.

Im Rahmen des Projekts wurden vier öffentliche Liegenschaften untersucht: zwei Bundesliegenschaften (Zollamt Bremen und Zollverwaltung Flensburg) sowie zwei Landesliegenschaften (Polizei Dresden und Hochschule für Musik Dresden). Der **Bedarf und Verbrauch der Fallstudiengebäude** wurde berechnet und das Fachpersonal (Objektmanager/innen, Bauverantwortliche oder Hausmeister/innen) in diesen Gebäuden sowie einzelne Nutzer/innen befragt. Die Interviews mit den Nutzer/innen haben kaum Hinweise auf mögliche Ursachen von Rebound-Effekten gegeben. Darüber hinaus haben sie gezeigt, dass sich das Heizungs- und Lüftungsverhalten zwischen Arbeitsplatz und privatem Bereich deutlich unterscheidet. Dies gilt sowohl für das Lüftungs- als auch Heizungsverhalten. Auch kennen viele Befragte den Energieverbrauch von ihrer eigenen Wohnung bzw. ihrem Haus – in Bezug auf das genutzte Bürogebäude ist aber nur ca. ein Drittel der Befragten interessiert an diesen Werten.

Im Rahmen des Vorhabens wurden **drei unterschiedliche Kennziffern für den Rebound-Effekt** berücksichtigt: der Elastizitäts-Rebound-Effekt, die Energieperformancelücke und das Energieeinspardefizit.

- Der Elastizitäts-Rebound-Effekt setzt die Änderung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen (Verbrauch) in Bezug zur Änderung der Energieeffizienz des Gebäudes (Bedarf) durch die Sanierung.
- Das Energie-Einspardefizit (EED) setzt die Unterschreitung der theoretischen Energieeinsparung nach der Sanierung in Bezug zu der erwarteten Energieeinsparung.
- Die Energieperformance-Lücke (EPL) ist die Differenz zwischen Energieverbrauch und Energiebedarf nach der Sanierung bezogen auf den Bedarf.

Das EED erwies sich aufgrund der instabilen mathematischen Eigenschaften als unzuverlässig. Elastizitäts-Rebound-Effekt und die EPL erwiesen sich jedoch als komplementäre Kennziffern zur Gewinnung von Informationen zum Rebound-Effekt, dessen Ursachen sowie zu den Defiziten bei der Energieeinsparung. Die **Auswertung der Datensätze** zeigt, dass der abgeschätzte Elastizitäts-Rebound-Effekte in den Nichtwohngebäuden durchschnittlich niedriger ist als in Wohngebäuden; die EPL ist dagegen bei den Nichtwohngebäuden durchschnittlich geringer (vor allem bei Gebäuden mit hohem Bedarf) – d. h. der Verbrauch dieser Gebäude liegt im Vergleich zum Bedarf höher.

Drei der **Fallstudiengebäude** (die Zollgebäude sowie das Polizeigebäude) zeigten minimal negative oder positive Rebound-Effekte, die zunächst darauf hindeuten, dass durch die Gebäudesanierung die

gewünschte Wirkung erzielt werden konnte. Das heißt, dass anzunehmen ist, dass in diesen Gebäuden die Nutzer/innen ihr Energiekonsumverhalten nicht grundlegend verändert haben, die baulichen Sanierungsmaßnahmen den Vorgaben (Annahmen im Energiekonzept) entsprechen und es auch keine negativen Wechselwirkungen zwischen Nutzer/innen und der eingesetzten Technologie gab. Die Gebäude weisen gleichzeitig vor und nach Sanierung eine negative EPL auf; dies bedeutet, dass der Verbrauch jeweils unter dem Bedarf liegt. Allerdings liegen die EPL dieser Fallstudienobjekte im Vergleich zu den Durchschnittswerten der untersuchten Datensätze von Nichtwohngebäuden hoch – und sehr hoch im Vergleich zu denen von Wohngebäuden. Dies kann darauf hindeuten, dass die Nutzer/innen im Vergleich zu denen in anderen Nichtwohngebäuden mehr Energie konsumieren, die Annahmen der Energiebedarfsberechnung besser mit der Realität übereinstimmen oder durch die umfangreiche Prüfung der Datensätze mögliche Fehlerursachen minimiert werden konnten. Die Höhe der EPL hat sich durch die Sanierung kaum verändert, obwohl auch bei Nichtwohngebäuden die EPL mit sinkendem Bedarf tendenziell größer wird. Die Ergebnisse der Hochschule für Musik Dresden stechen im Vergleich zu denen der anderen drei Gebäude heraus. Aufgrund der Änderung der Nutzung, neuer Nutzer/innen sowie technischer Änderungen des Innenraumes durch eine Schallisolierung ist es schwierig, diese Ergebnisse zu verallgemeinern.

Insgesamt wäre es sinnvoll, die Ergebnisse der Fallstudien mit denen von Gebäuden ähnlicher Art und Nutzung zu vergleichen. Hierfür wäre ein **großer Datensatz von Verbrauch und Bedarf von öffentlichen Gebäuden** mit ähnlichem Nutzungsmuster hilfreich. Derzeit stehen jedoch nur sehr wenige Daten für einen solchen Vergleich zur Verfügung.

5.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebäude

Hinsichtlich der Übertragbarkeit werden aufgrund der besonderen Situation in der Hochschule für Musik nachfolgend nur die Ergebnisse für die beiden Zoll- und das Polizeigebäude berücksichtigt. Diese weisen große Übereinstimmungen hinsichtlich des Elastizitäts-Rebound-Effekts und der EPL vor und nach Sanierung auf. Da diese Gebäude ähnlich genutzt und auch ähnlich umfangreich saniert wurden, kann vermutet werden, dass die **Ergebnisse für den Gebäudetyp: Bürogebäude mit Schichtbetrieb** (mit einem hohen Anteil an Mitarbeiter/innen, die teilweise eine Außentätigkeit verrichten) typisch sind. Die ähnlichen Ergebnisse können auch darauf hindeuten, dass die Art der Nutzung einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe des Rebound-Effektes hat. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass auch äußere Faktoren einen Einfluss auf die Art und Dauer der Lüftung haben, z. B. eine laute Straße vor dem Bürogebäude. Dies kann zu Unterschieden zwischen Gebäuden auch bei einer ähnlichen Nutzungsart führen.

Deutliche Übereinstimmungen bestehen nicht nur im Hinblick auf die Rebound-Effekte, sondern auch bei den Aussagen der befragten Nutzer/innen der Gebäude. Insgesamt konnten diese kaum Unterschiede in Bezug auf ihr **Heizungs- und Lüftungsverhalten** vor und nach der Sanierung nennen. Sie benannten aber deutliche Unterschiede zwischen dem Verhalten am Arbeitsplatz und zuhause, wobei am Arbeitsplatz Energiesparen für viele sehr viel weniger wichtig ist. Somit konnten zwar kaum Hinweise auf Rebound-Effekte gefunden werden, wohl aber auf erschließbare Einsparpotenziale durch Veränderung des Nutzerverhaltens. Beim Vergleich mit den vorhandenen Datensätzen von anderen Büro- bzw. Nichtwohngebäuden zeigt sich, dass der Verbrauch vor Sanierung in den Fallstudien-Gebäuden im Vergleich zu anderen Büro- bzw. Nichtwohngebäuden hoch war – nach Sanierung ist dieser Effekt weniger deutlich. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Rebound-Effekte in den untersuchten Gebäuden eher geringer sind als in anderen Nichtwohngebäuden. Allerdings ist bei dieser Schlussfolgerung zu berücksichtigen, dass die Vergleichsdatsätze nicht repräsentativ sind und ein Vergleich für einzelne Gebäudetypen und Nutzungsarten nicht ermöglichen.

5.3 Bewertung und Weiterentwicklung der Methodik

Das Vorhaben war eine erste Sondierungsstudie zu Rebound-Effekten in Nichtwohngebäuden. Weitere Vorhaben können auf diesen Ergebnissen und den Lerneffekten des Forschungsprojekts aufbauen. Deshalb soll basierend auf den Ergebnissen und Erfahrungen der Fallstudien nachfolgend dargestellt werden, inwieweit sich die verwendete Methodik zur Ermittlung von Rebound-Effekten und deren Ursachen eignet und wie zukünftig die Wirkung von Rebound-Effekten bei der energetischen Sanierung von Büro- und Verwaltungsgebäuden noch besser untersucht werden könnte.

5.3.1 Definition des Rebound-Effekts und Vergleichswerte

Wie einleitend dargestellt wurde, existiert eine Vielzahl von Vorstellungen und Definitionen des Rebound-Effekts. Die klare Definition von drei unterschiedlichen Größen zu Projektbeginn hat Verwechslungen vermieden und aussagekräftige Vergleiche möglich gemacht. Wie stark die Ergebnisse je nach Definition divergieren und welche Erkenntnisse mit welchen Größen ermittelt werden können wurde durch das Vorhaben gezeigt. Obwohl also **eindeutige Definitionen** notwendig sind erfolgen diese bisher teilweise in Studien nicht. Deshalb ist bei der Zitation von Literaturquellen zum Rebound-Effekt Vorsicht geboten und diese sollten nur zitiert werden, wenn sie die den "Rebound-Effekt" sowohl konzeptionell als auch mathematisch klar definieren.

Eine wichtige Erkenntnis des Projekts ist, dass der **Elastizitäts-Rebound-Effekt** aussagekräftige und robuste Ergebnisse liefert, allein aber nicht immer ein vollständiges Bild über die Höhe der Defizite im Hinblick auf die Energieeinsparungen liefert. Wenn diese Größe um die Betrachtung des Verhältnisses von Verbrauch und Bedarf vor und nach der Sanierung ergänzt wird, erhält man ein vollständiges Bild der Veränderungen. So ist ein hoher Elastizitäts-Rebound-Effekt nicht unbedingt ein Zeichen für den Misserfolg einer Sanierung, wenn die **Energie-Performance-Lücke** (EPL) sowohl vor als auch nach der Sanierung vergleichsweise gering ist – der Verbrauch also deutlich unter dem Bedarf liegt. Wenn die EPL vor der Sanierung dagegen hoch ist – der Verbrauch also den Bedarf erreicht oder sogar übersteigt – kann es sinnvoll sein, nicht nur einen geringen, sondern sogar einen negativen Elastizitäts-Rebound-Effekt anzuvisieren, um den Verbrauch auf ein akzeptables Niveau zu bringen. Insgesamt ist es bei der Bewertung des Sanierungserfolgs wichtig den Zweck der energetischen Sanierung zu berücksichtigen. Wenn vor allem ein höheres Niveau an thermischem Komfort erreicht werden soll (um z. B. Energiearmut zu reduzieren), kann ein moderat positiver Rebound-Effekt durchaus akzeptabel sein. Wenn das Ziel dagegen eine möglichst große Reduktion des Energieverbrauchs ist sollte jenseits der technischen Maßnahmen das gesamte sozio-technische System in den Blick genommen werden um bspw. durch ergänzende Verhaltensänderungen insgesamt einen negativen Rebound-Effekt zu erzielen.

Neben robusten Daten zum Untersuchungsobjekt sind **Vergleichswerte** für die Bewertung wichtig. Eine Schwierigkeit in dieser Studie war die relativ geringe Anzahl an Datenpunkten von Bedarf und Verbrauch, die verwendet werden konnten, um die durchschnittlichen und typischen Rebound-Effekte (Elastizität und EPL) im Nichtwohngebäudebereich abzuschätzen. Im Vergleich dazu sind für Wohngebäude in Deutschland rund 4.000 solcher Datenpunkte bekannt (siehe Zusammenfassung in Sunikka-Blank und Galvin, 2012). Es wird empfohlen, dass durch die Erfassung und Überprüfung derartiger Daten im Nichtwohngebäudesektor auch in diesem Bereich ein entsprechender Datenfundus aufgebaut wird. Dabei ist es wichtig die Daten den unterschiedlichen Arten von Gebäuden (z. B. Büro, Werkstatt, Unterakunftsgebäude, Sporthallen, Polizei, etc.) zuordnen zu können, so dass nuancierte Vergleiche möglich sind.

5.3.2 Beschaffung von Energieverbrauchs- und Bedarfswerten

Um den Rebound-Effekt zu berechnen, ist das Vorliegen **zuverlässiger Werte zu Bedarf und Verbrauch** sowohl vor als auch nach einer Sanierung notwendig. Die Fallstudien haben gezeigt, dass die Beschaffung von Eingangsdaten zu Verbrauchs- und Bedarfswerten zeitaufwändig ist und die Daten meist nicht zentral erfasst sind. Daher müssen mehrere Organisationen um Mitwirkung gebeten werden, um vollständige Datensätze zu erhalten. Außerdem ist eine aufwändige Überprüfung der Daten zu den Verbrauchs- und Bedarfswerten und den zugrundeliegenden Annahmen notwendig, da die Datengrundlage bisher häufig unzureichend ist. Die Unzulänglichkeiten resultieren aus einer Vielzahl von Gründen: u. a. nicht vorhandenen objektscharfen Verbrauchswerten, keine Erfassung der zentralen Warmwassererzeugung, widersprüchliche Erfassung der Nettogrundfläche, wenig plausible Annahmen in Energieausweisen, keine Berechnung des Energiebedarfs vor der Sanierung, Annahmen der Energiekonzepte sowie die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen schwer zu überprüfen sind. Im Folgenden wird basierend auf Erfahrungen bei der Durchführung der Fallstudien dargestellt, worauf bei der Ermittlung und Überprüfung der Energiekennwerte zu achten ist.

Um eine genaue Berechnung des Rebound-Effektes zu ermöglichen, sollten die **Energieverbrauchswerte** objektscharf vorliegen. Oft befinden sich mehrere Gebäude in einer Liegenschaft und die Verbrauchswerte werden nur für die gesamte Liegenschaft erfasst. Dies hat zur Folge, dass die Zuordnung der Verbrauchswerte einem angenommenen Verteilungsschlüssel unterliegt. Zudem wird die Nutzermotivation zum Energiesparen nicht erhöht, wenn für mehrere Gebäude gemeinsam der Verbrauch erfasst wird. In solchen Fällen kann die Erfassung der Energieverbräuche z. B. mittels Wärmemengenzähler sinnvoll sein. Die Verbrauchswerte sollten zudem für mehrere Jahre vor und nach der Sanierung vorliegen um die Robustheit der Werte zu erhöhen. Zudem sollten die erfassten Energieverbräuche auch in unbereinigter Form mit genauem Ablesezeitpunkt zur Verfügung stehen, am Besten in Form von Rechnungen des Energieversorgungsunternehmens. Weitere Schwierigkeiten entstehen, wenn die Lieferungen von Brennstoffen nicht den Heizperioden entsprechen. Idealerweise sollte der Energieverbrauch für die zentrale Warmwassernutzung separat erfasst werden. Besonders bei energieeffizienten Gebäuden kann ein hoher Warmwasserverbrauch einen entscheidenden Anteil am Gesamtverbrauch haben. Die Ergebnisse der Fallstudien haben gezeigt, dass in den Jahren nach einer Sanierung noch deutliche Veränderungen des Energieverbrauchs auftreten können. Auch deshalb sind Verbrauchswerte aus mehreren Jahren für die Berechnungen wichtig. Inwiefern Schulungen, Einweisungen und Anpassungen der Technik diese Effekte reduzieren können und somit schneller zu höheren Einsparungen führen, könnte im Rahmen von Langzeitstudien untersucht werden.

Bei der Erfassung der **Nettogrundflächen** für die Verbrauchswerte müssen unbeheizte Gebäudezonen von beheizten Zonen getrennt werden. Erfolgt dies nicht kann eine Nachberechnung anhand von Zeichnungen bzw. durch eine aufwändige Vorortmessung notwendig werden. In den Unterlagen der Fallstudienobjekte wurden keine einheitlichen Flächengrößen verwendet (für dasselbe Objekt wurden in Planungsunterlagen, Energieberichten, Energieabrechnungssystem, Zeichnungen unterschiedlichste Flächen, z. B. Brutto- und Nettogrundfläche sowie Hauptnutzfläche verwendet). Auch durch eine Umrechnung dieser Flächen mit Faktoren des BMVBS (2009a) konnte keine Vereinheitlichung hergestellt werden.

Eine **Energiebedarfsberechnung** sollte nicht nur für den Zustand nach Sanierung, sondern auch für den vor der Sanierung vorliegen oder erfolgen, um wichtige Erkenntnisse zum Energiekonsumverhalten der Nutzer/innen zu gewinnen. Energieausweise (Bedarfsausweise) sollten nach deren Erstellung überprüft werden im Hinblick auf die realen und ausgewiesen/angenommenen Nettogrundflächen, eingesetzten Energieträger, ausgewiesenen Energiebedarfswerte, die Erzeugungsart des Warmwassers und den

Energiebedarf für die Warmwassererzeugung. Eine Überprüfung der Energieausweise auf Basis der Annahmen der Energiekonzepte erscheint sinnvoll.

Die **Energiekonzepte** weisen Unterschiede beim Aufbau und Detaillierungsgrad auf; dadurch ist das Nachvollziehen von Annahmen sehr aufwendig. Idealerweise sollten deshalb die Energiekonzepte einen einheitlichen Aufbau haben (z. B. nach vorgegebenen Kapiteln und Inhalten geordnet). Die Energiekonzepte sollten einen Vergleich des Verhältnisses Energiebedarf und -verbrauch vor der Sanierung enthalten. Außerdem sollten die Herkunft der Verbrauchswerte sowie die Art und das Verfahren zur Bereinigung der Verbrauchswerte ausgeführt werden. Folgende zu treffenden **Annahmen sollten im Energiekonzept nachprüfbar aufgeführt** werden:

- Aufbauten der thermischen Hülle (Wände, Dach / oberste Geschossdecke, Fenster/Türen, Bodenplatte)
- Berechnung der Wärmebrücken (z. B. Ausweis gebäudespezifischer Wärmebrücken oder pauschaler Ansatz)
- Gebäudetechnik (z. B. Art der Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung, Rohrnetz, Dämmstandard, Wärmeübergabe (Art der Heizung), hydraulischer Abgleich)
- Regelungstechnik (Art der Regelungsventile, Nacht- und Wochenendabsenkung)
- Art der Warmwassererzeugung (z. B. zentral, dezentral, Menge)
- Zonierung (idealerweise mit eingezeichneten Zonen in Grundrissen) und getroffenen Annahmen für Zonen (z. B. Innentemperaturen, Lüftungsart, Belegungsdichte, Beheizungszeiten)

Bei diesen Annahmen sollten auch die zugrundeliegenden Daten angegeben werden. Auch sollten reale Gegebenheiten bei einem Vorort-Rundgang erfasst und bei der Erstellung des Energiekonzeptes berücksichtigt werden (z. B. offen stehende Bürotüren, Schallschutzdämmung in den Innenräumen).

Die **durchgeführten Sanierungsmaßnahmen** sollten dokumentiert werden; es eignet sich dazu die Unternehmenserklärung gemäß §26a EnEV. Für den Fall, dass bei Umsetzung der Maßnahmen Abweichungen zu den vorgeschlagenen Sanierungsmaßnahmen aufgetreten sind, könnte eine erneute Berechnung des Energieausweises/Energiekonzeptes für den Zustand nach der Sanierung notwendig werden. Damit spätere Veränderungen am Gebäude einfach abgebildet und der Energiebedarf angepasst (z. B. veränderte Nutzungszeiten des Gebäudes, Zonierungsverschiebungen) werden können, wäre es hilfreich, wenn die Berechnungsdateien der Energiekonzepte von den jeweiligen Ingenieurbüros dem Betreiber zur Verfügung gestellt würden.

Neben der in diesem Projekt untersuchten thermischen Energie spielt in Nichtwohngebäuden **elektrische Energie** eine wichtige Rolle. Die Fallstudien deuten darauf hin, dass in diesem Bereich ebenfalls Abweichungen zwischen idealem und realem Nutzerverhalten vorkommen, da beispielsweise Licht und Computer nach Feierabend nicht abgestellt werden. Deshalb wäre zu prüfen, inwiefern auch elektrische Energie zukünftig in die Methodik zur Ermittlung des Rebound-Effekts integriert werden könnte. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Berechnung eines exakten elektrischen Energiebedarfes schwieriger als beim thermischen Energiebedarf ist und sich dieser über die Jahre durch Veränderungen bei den elektrischen Verbrauchern ebenfalls stetig verändert.

5.3.3 Interviews mit Nutzer/innen und Fachpersonal

Durch die **Befragung von Nutzer/innen und des Fachpersonals** konnten wertvolle Informationen zu der Situation in den Gebäuden und dem Verhalten der Nutzer/innen gewonnen werden. Als ein zeitlicher

Engpass für die Durchführung der Interviews erwies sich, dass die Erteilung der Genehmigungen einige Zeit in Anspruch nahm. Sowohl bei der Genehmigung der Interviews in den Dienstbehörden als auch bei der Rekrutierung von Interviewpartnern/innen ist ein positiver und dem Vorhaben aufgeschlossener Mittler zwischen Dienstbehörde und Forschungsnehmer sehr hilfreich.

Idealerweise sollten die Nutzer/innen bereits vor der Sanierung zu ihrem typischen Verhalten und zu den an die Sanierung gestellten Erwartungen befragt werden. Bei den durchgeführten Interviews in den Fallstudienobjekten hat sich gezeigt, dass viele Befragte die tatsächlichen Veränderungen mit den Erwartungen gleichgesetzt haben. Außerdem schien das Verhalten vor der Sanierung für viele bereits in Vergessenheit geraten zu sein. Neben der Befragung der Nutzer/innen vor der Sanierung kann auch auf die Befragung nach der Sanierung nicht verzichtet werden. Der Zeitpunkt für die Befragungen sollte im Idealfall während oder zum Ende einer Heizperiode (Dezember bis März) liegen, da das tägliche (Heiz-) Verhalten in diesem Zeitraum besonders präsent ist. Sollten bei einer energetischen Sanierung neue Technologien (z. B. durch Sanierung auf Passivhausniveau, automatische Lüftungsanlage, Wand-/ Fußbodenheizungen) eingesetzt werden, kann neben einer vorherigen Befragung auch eine Befragung im ersten und im zweiten Jahr nach der Sanierung sinnvoll sein. So können die bemerkten Veränderungen und die Anpassung der Nutzer/innen an die Technologie erfasst werden.

Die **Auswahl der befragten Personen** sollte idealerweise nach einem zufälligen Verfahren erfolgen, so dass ein Querschnitt aller Nutzer/innen interviewt wird. Leitfadengestützte Interviews liefern wichtige Aussagen zu den Ursachen des Verhaltens sowie Aufschlüsse über noch unbekannte Zusammenhänge. Basierend auf diesen Erkenntnissen wäre zukünftig (ggf. ergänzend) auch eine schriftliche Befragung aller Mitarbeiter/innen mit einem Fragebogen denkbar, idealerweise vor und nach der Sanierung. Bei einer Kombination einer schriftlichen Vollerhebung mit persönlichen Interviews könnten nach Auswertung der Befragung gezielt Mitarbeiter/innen mit einem (un)typischen Heizungs-, Lüftungsverhalten nach den Ursachen befragt werden. Die persönlichen Interviews und Befragungen könnten um Messungen (z. B. der Rauminnentemperatur) und Beobachtungen vor Ort (z. B. Zahl der offenen Fenster, hochgedrehten Heizungen nach Dienstschluss) ergänzt werden um neben dem berichteten Verhalten auch das tatsächliche zu analysieren.

5.4 Handlungsempfehlungen zur Reduktion des Rebound-Effekts bzw. des Energieverbrauchs

In den untersuchten Liegenschaften konnten **keine relevanten positiven Rebound-Effekte** nach der Sanierung der Gebäude beobachtet werden. Trotzdem wurde in den Fallstudien festgestellt, dass in den Gebäuden auch nach Sanierung durchaus noch Energieeinsparpotenziale vorhanden sind. In Kapitel 3 wurden mögliche Gründe für hohe Energieverbräuche in Nichtwohngebäuden aufgezeigt. Einsparpotenziale können in technische und nicht-technische (organisationale und soziale) aufgeteilt werden. Nachfolgend wird auf die vorhandenen nicht-technischen Potenziale eingegangen, zu denen im Rahmen der Fallstudien Erkenntnisse gewonnen wurden. Jenseits von den dargestellten Einzelansätzen ist es sinnvoll, das Thema Energieeffizienz auch systematisch durch eine energetische Betriebsoptimierung anzugehen (vgl. BINE 2010). Auch dabei sollten die Nutzer/innen in den Blick genommen werden.

Die Interviews mit den Nutzer/innen und dem Fachpersonal zeigen, dass in den untersuchten Gebäuden **Einsparmöglichkeiten durch verändertes Nutzerverhalten** vorhanden sind. Darüber hinaus werden einzelne organisationale Aspekte genannt, die Energieeinsparungen erschweren. Im Hinblick auf das Ziel, den Energieverbrauch der Bundesliegenschaften und die damit verbundenen CO₂-Emissionen zu

verringern, ist deshalb zu empfehlen, neben energetischen Sanierungen (also den technischen Potenzialen) auch das Verhalten der Nutzer/innen sowie organisationale Aspekte in den Blick zu nehmen. Die BImA hat dieses Thema bereits mit der Kampagne „mission E“ aufgegriffen⁶. Jenseits von Kampagnen an einzelnen Standorten erscheint es jedoch wichtig, das Thema Energieeffizienz in allen Liegenschaften systematisch zu verankern. Die Kampagne kann hierzu erste Impulse liefern. Energetische Sanierungen könnten ebenfalls als Kommunikationsanlässe zum Thema Energieeffizienz verwendet werden, indem im Anschluss an Sanierungen Maßnahmen zum Nutzungsverhalten umgesetzt werden.

Bei drei Fallstudienobjekten ist in den ersten Jahren nach der Sanierung eine deutliche Abnahme der spezifischen Verbrauchswerte zu beobachten, die wahrscheinlich teilweise auf den Einfluss durch die Nutzer/innen zurückzuführen sind. Da in den Objekten keine begleitenden Maßnahmen (z. B. Schulungen, Einweisungen) stattfanden könnte eine schnellere Reduktion des Energieverbrauchs womöglich erzielt werden, wenn die Nutzer/innen und auch das Fachpersonal im Anschluss an die Sanierung Unterstützung bei der **Adaption an die neuen Bedingungen** erhielten.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen außerdem, dass in den untersuchten Behörden die Befragten das **Fehlen von Anreizen** als ein Hemmnis für die Umsetzung von Energiesparmaßnahmen sehen. Damit sind nicht vorrangig finanzielle Anreize auf individueller Ebene, sondern eher auf organisationaler gemeint – also dass die eingesparte Energie sich für die Behörde oder das Team bisher nicht „lohnt“. Ein Ansatzpunkt für Energieeinsparung kann darin liegen, dass Behörden bzw. Standorte die eingesparten Energiekosten zumindest teilweise zur Verfügung gestellt bekommen und diese für ihre Belange verwenden können. Dieser Ansatz kommt bei Schulen bereits unter dem Motto „fifty/fifty“ zum Einsatz: Dabei bekommen in teilnehmenden Kommunen die Schulen, die durch Änderung des Nutzungsverhaltens Energie einsparen, die Hälfte der eingesparten Energiekosten ausgezahlt⁷. Hier wäre zu prüfen, inwiefern sich solche Ansätze auch auf andere öffentliche Liegenschaften übertragen lassen könnten.

⁶ Siehe <http://missione.bundesimmobilien.de/>

⁷ Siehe <http://www.fifty-fifty.eu/>

6 Literaturverzeichnis

- Axon C., Bright S., Dixon T., Janda Kolokotroni M. (2012) Building communities: reducing energy use in tenanted commercial property. *Building Research and Information* 40: 461–472.
- Berger T., Amann C., Formayer H., Korjenic A., Pospichal B., Neururer C., Smutny R. (2014): Impacts of urban location and climate change upon energy demand of office buildings in Vienna, Austria. *Building and Environment* 81: 258-269.
- BINE (2010): Gebäude energieeffizient betreiben - Den Anspruch der Planung einlösen. Themeninfo I/2010; - See more at: <http://www.bine.info/nc/themen/publikation/gebaeude-energieeffizient-betreiben/#sthash.48CcyJNV.dpuf>
- BMVBS (2009a): Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand, des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin
- BMVBS (2009b): Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden, Vergleichswerte für Energieausweise. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Berlin, BBSR-Online-Publikation, Nr. 09/2009, ISSN 1868-0097
- Bordass B., Cohen R., Field J. (2004): Energy performance of non-domestic buildings – closing the credibility gap. In: International conference on improving energy efficiency in commercial buildings. Frankfurt, Germany.
- DENA (Deutsche Energie-Agentur) (2012): Der dena-Gebäudereport 2012: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin: Deutsche Energie-Agentur. Berlin, 2013. <http://www.dena.de/publikationen/gebaeude/report-der-dena-gebaeudereport-2012.html>.
- EC (European Commission) (2011): COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS: A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. COM(2011) 112 final. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0112>, Zugriff am 06.08.2014.
- Economidou, M. (2011): Europe's buildings under the microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). URL: http://www.europeanclimate.org/documents/LR_%20CbC_study.pdf, Zugriff am 06.08.2014.
- EnergieAgentur.NRW (2009): Den schlafenden Riesen wecken – Strategische Aspekte zum Faktor Mensch bei der Energieverbrauchsreduktion. *Innovation&energie* 2/2009. S. 4-6
- European Environment Agency (2013): Achieving energy efficiency through behavior change: what does it take?, EEA Technical report No 5/2013
- Galvin, R. (2010): Thermal upgrades of existing homes in Germany: The building code, subsidies, and economic efficiency. *Energy and Buildings* 42: 834–844.
- Galvin, R. (2012): Including fuel price elasticity of demand in net present value and payback time calculations of thermal retrofits: Case study of German dwellings. *Energy and Buildings* 50: 219–228
- Galvin, R. (2013a): Revisiting calculation methods for rebound effects in thermal retrofits of homes: introducing the 'flat' rebound effect: JUST SOLUTIONS, CAMBRIDGE, UK. WORKING PAPER 2013-4.
- Galvin, R. (2013b): Making the 'rebound effect' more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: defining the 'energy savings deficit' and the 'energy performance gap'. *Energy and Buildings* (in press: accepted for publication November, 2013. Working paper version available at <http://justsolutions.eu/Resources/Galvin-ReboundEffectMethodologies-WORKING-PAPER.pdf>).

- Galvin, R. (2014): Making the 'rebound effect' more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: Defining the 'energy savings deficit' and the 'energy performance gap'. *Energy and Buildings*, 69: 515–524.
- Gossauer, E. (2008): Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden - Eine Feldstudie. Analyse von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Komfortparametern am Arbeitsplatz. Dissertation
- Gülec, T. et.al. (1993): Nutzenenergiebedarf für Raumwärme in der Bundesrepublik Deutschland (alte und neue Bundesländer, 1989). IKARUS Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien, ISSN 0946-0012
- IWU (2008): Basisdaten, 2008. URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/ake44/IWU-Tagung_17-04-2008_-_Diefenbach_-_Basisdaten.pdf, Zugriff am 06.08.2014.
- IWU (2014): Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden (TEK): Querschnittsanalyse der Ergebnisse der Feldphase. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.
- Jakob, M. (2006): Marginal costs and co-benefits of energy efficiency investments: the case of the Swiss residential sector, *Energy Policy* 34: 172–187.
- Janda, K. (2014): Building communities and social potential: Between and beyond organizations and individuals in commercial properties. *Energy Policy* 67: 48–55.
- Jones Lang LaSalle (2014): A tale of two buildings: Are EPCs a true indicator of energy efficiency? London: JLL. URL: <http://www.betterbuildingspartnership.co.uk/download/bbp-jll---a-tale-of-two-buildings-2012.pdf>, Zugriff am 28.08.2014.
- Juan Y.-K., Gao P., Wang J. (2010): A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement. *Energy and Buildings* 42: 290–297.
- Katunsky D., Korjenic A., Katunska J., Lopusniak M., Korjenic S., Doroudiani S. (2013): Analysis of thermal energy demand and saving in industrial buildings: A case study in Slovakia. *Building and Environment* 81: 234–242.
- Klesse, A. (2010): Energieeffizientes Nutzerverhalten in Organisationen. Vortrag auf der 74. Jahrestagung der DPG – Bonn, 16.03.2010. (http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Vortraege/DPG2010_AKE7.2_Klesse_En-effizientesNutzerverhalten.pdf), Zugriff am 2.9.2014
- Kniefel, J. (2010): Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. *Energy and Buildings* 42: 333–340.
- Kothe, J. (2014): The role of user behaviour for the success of investment measures for energy efficiency. In: Documentation of the European Conference „Climate Protection by Means of Energy Efficiency – User Behaviour, Technology and Education“, 13/14 February 2014, Berlin. S. 13-16.
- Kunze, A. (2012): Mit gutem Beispiel voran: Sanierungsfahrplan Bundesliegenschaften. Dena-Energieeffizienzkonferenz. 18.9.2012, Berlin
- Lam J., Hui S. (1996): Sensitivity Analysis of Energy Performance of Office Buildings. *Building and Environment* 31: 27-39.
- Leide, L. (2013): Vorbildwirkung öffentliche Gebäude – Was macht die BImA? Berliner Energietage, 16.5.2013
- MacKenzie D, Wajcman, J. (eds) (1985): *The Social Shaping of Technology*, Buckingham and Bristol: Open University Press MacKerron G (2012) Foreword. *Energy Policy* 49: 12-18.
- Matthies, E., et al. (2011): Change – Veränderung nachhaltigkeitsrelevanter Routinen in Organisationen. Abschlussbericht

- Matthies, E., Thomas, D. (2011): Nachhaltigkeitsrelevante Routinen am Arbeitsplatz – Voraussetzungen für einen erfolgreichen Wandel. In: Defila, Rico, Di Giulio, Antonietta, und Kaufmann-Hayoz, Ruth: Wesen und Wege nachhaltigen Konsums. Oekom, München. S. 229-244.
- Maxwell D., McAndrew L. (2011): Addressing the Rebound Effect: European Commission DG ENV: A project under the Framework contract ENV.G.4/FRA/2008/0112.
- Meerbeek B., te Kulve M., Gritti T., Aarts M., van Loenen E., Aarts E. (2014): Building automation and perceived control: A field study on motorized exterior blinds in Dutch offices. *Building and Environment* 79: 66-77.
- Nelson, A. (2008): Globalization and Global Trends in Green Real Estate Investment. RREEF Research, San Francisco, CA.
- Oschatz, B., Jagnow, K., Wolff, D. (2014): Leitfaden zum Abgleich: Energiebedarf – Energieverbrauch. Berlin: Deutsche Energie-Agentur.
- Peters, Anja, Sonnberger, Marco und Deuschle, Jürgen (2012): Rebound-Effekte aus sozialwissenschaftlicher Perspektive - Ergebnisse aus Fokusgruppen im Rahmen des REBOUND-Projektes – Working Paper Sustainability and Innovation No. S 5/2012- Fraunhofer ISI (http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/e-x/working-papers-sustainability-and-innovation/WP05-2012_Rebound-Fokusgruppen-.pdf, Zugriff 27.06.2013)
- Pivo, G. (2008): Responsible property investment criteria developed using the Delphi Method. *Building Research and Information* 36:20–36.
- Richter, W., Ender, T., Hartmann, T., Kremonke, A., Oschatz, B., Seifert, J. (2002): Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Niedrigenergie- und Passivhäusern, in *Bauforschung für die Praxis*, Band 63. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Schmidthals, M. (2014): Climate Protection, Investment Measures for Energy Efficiency and Modern Building Services from the Perspective of User Behaviour and Environment Education. In: Documentation of the European Conference „Climate Protection by Means of Energy Efficiency – User Behaviour, Technology and Education“, 13/14 February 2014, Berlin. S. 9-12.
- SIB (2012): Konjunkturpaket II (2009-2011), Firmenbroschüre, Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien und Baumanagement
- Sorrell, S. (2007): The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency. Sussex Energy Group, Technology and Policy Assessment function, UK Energy Research Centre.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J. (2008): The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics* 65: 636 – 649.
- Sunikka-Blank, M., Galvin, R. (2012): Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption. *Building Research and Information* 40(3), 260–273.
- Tetlow, R., Beaman, P., Elmualim, A., Couling, K. (2014): Simple prompts reduce inadvertent energy consumption from lighting in office buildings. *Building and Environment* 81: 234-242.
- Vázquez, A. (2013): Real buildings. The challenge of reducing HVAC energy consumption. Masters Thesis, University of Cambridge, UK.
- Windlinger I. L., Hofmann, T., Janser, M. (2012): Die Qualität nachhaltiger Bürogebäude für die Nutzer: Nachhaltigkeit gewinnt im Immobilienbereich. *SVG-Journal* , 2/2012. S. 8-10.

Anhang

1. Methodik zur Berechnung des Rebound-Effekts
2. Interview-Leitfaden Fachpersonal
3. Interview-Leitfaden Nutzer/innen
4. Einzelwerte thermischer Energieverbrauch
5. Vergleichswerte für den thermischen Energieverbrauch/-bedarf

Anhang 1:

Begriffsdefinition: Der Rebound-Effekt als Elastizität

Autor: Ray Galvin, RWTH Aachen

1 Einführung

In den meisten akademischen Publikationen wird der Rebound-Effekt als eine Art ‚Elastizität‘ verstanden. Die Elastizität kann definiert werden als Quotient zwischen der proportionalen Veränderung eines Parameters und der proportionalen Veränderung eines anderen Parameters.

Beträgt die ‚Preis-Elastizität‘ einer Ware wie Erdgas beispielsweise -0,3, bedeutet dies, dass eine Senkung des Preises um 1 % zu einer Zunahme des Verbrauchs um 0,3 % führt. Berkhout et al. (2000) haben gezeigt, wie dieses Konzept auch im Bereich der Änderung von Energieeffizienz benutzt werden kann. Falls die Energieeffizienz eines Erdgas-Heizkessel um 1 % steigt und die Preis-Elastizität von Erdgas -0.3 ist, treten zwei Effekte gleichzeitig ein: (a) der *Energiebedarf* wird um eine bestimmte Menge – die mit der Zunahme der Energieeffizienz von 1 % korrespondiert – *reduziert*, und deswegen wird es eine Tendenz geben, den *Energieverbrauch* ebenfalls zu reduzieren; und (b) der Verbrauch von *Energiedienstleistungen* wird tendenziell *steigen*, da sich der endogene (effektive) Preis der Raumwärme wegen (a) reduziert hat. Deswegen reduziert sich der *Energie*-Verbrauch nicht so weit wie in (a) erwartet.

Insgesamt gibt es zwei Folgen der gesteigerten Effizienz: eine Reduzierung des Energieverbrauchs und der gesteigerte Gebrauch von Energiedienstleistungen.

Der Begriff ‚Energiedienstleistungen‘ im Bereich Raumheizung bedeutet zum Beispiel: eine höhere Raumtemperatur; längere Heizperioden; mehr Zimmer werden geheizt; niedrigere Raumfeuchtigkeit usw. Diese Dienstleistungen verbrauchen Energie, was dazu führt, dass der Verbraucher nicht die komplette Reduktion seines Energieverbrauchs erfährt, welche die gesteigerte Energieeffizienz ursprünglich zur Folge hätte.

Es ist hier festzuhalten, dass dies für die *gesamte* Zunahme der Energieeffizienz zu berücksichtigen ist: der eine Teil führt zur Reduzierung des Energieverbrauchs während der andere Teil zur Zunahme des Verbrauchs von Energiedienstleistungen führt. Sorrell und Dimitropoulos (2008) formuliert dies in einer präzisen mathematischen Gleichung:

$$R_{\varepsilon}(S) - R_{\varepsilon}(E) = 1 \quad (1)$$

wobei R = Rebound-Effekt, E = Energieverbrauch, S = Konsum von Energiedienstleistungen und der Index ε (Epsilon) die Energieeffizienz kennzeichnet. $R_{\varepsilon}(S)$ ist der ‚Energiedienstleistungs-Rebound-Effekt‘ der normalerweise einen *positiven* Wert besitzt, da normalerweise die Menge der Energiedienstleistungen *steigt*, wenn die Energieeffizienz steigt. $R_{\varepsilon}(E)$ hat üblicherweise einen *negativen* Wert, da der Energieverbrauch in der Regel *sinkt*, während die Energieeffizienz steigt.

2 Energieeffizienz-Elastizität als Differenzial-Funktion

Es gibt zwei wichtige Gründe, warum Elastizitäten *Differenzialfunktionen* sind. Erstens ist die Beziehung zwischen Energieeffizienz und Energieverbrauch nicht immer linear. Eine Zunahme der Energieeffizienz eines Heizkessels von 85 % auf 86 % mag zu einer geringeren (oder höheren) Reduzierung des Energieverbrauchs führen, als bei einer Reduzierung des Energieverbrauchs bei einer Steigerung der Energieeffizienz von 86 % auf 87 %.

Zweitens sind Elastizitäten Vergleiche von *proportionalen* und nicht *absoluten* Änderungen; also die proportionale Änderung von Energieverbrauch (bzw. Energiedienstleistungen) verglichen mit der proportionalen Änderung der Energieeffizienz. Zum Beispiel: In Bezug auf den obengenannten Heizkessel bedeutet die erste Änderung eine Zunahme der proportionalen Energieeffizienz von 1/85, während die zweite eine (geringere) Zunahme von 1/86 bedeutet. Falls große Änderungen der Energieeffizienz vorliegen, muss die Mathematik die Variationen über die gesamte Bandbreite richtig und korrekt beschreiben.

Deswegen sind Elastizitäten als *Teildifferenziale* beschrieben:

$$R_{\varepsilon}(S) = \frac{\partial S}{S} / \frac{\partial \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{S} \quad (2)$$

$$R_{\varepsilon}(E) = \frac{\partial E}{E} / \frac{\partial \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{E} \quad (3)$$

Gleichung (2) bedeutet, dass der *Energiedienstleistungs*-Rebound-Effekt eine Funktion ist, die die Beziehung zwischen jeder infinitesimalen, proportionalen Änderung der Menge von Energiedienstleistungen und der entsprechenden infinitesimalen, proportionalen Änderung von Energieeffizienz als Quotient darstellt. Außerdem bedeutet Gleichung (3), dass der *Energie*-Rebound-Effekt eine Funktion ist, bei der die infinitesimale, proportionale Änderung von Energieverbrauch durch die entsprechende infinitesimale, proportionale Änderung von Energieeffizienz geteilt wird.

3 Der Rebound-Effekt im Rahmen einer Fallstudie einer energetischen Sanierung

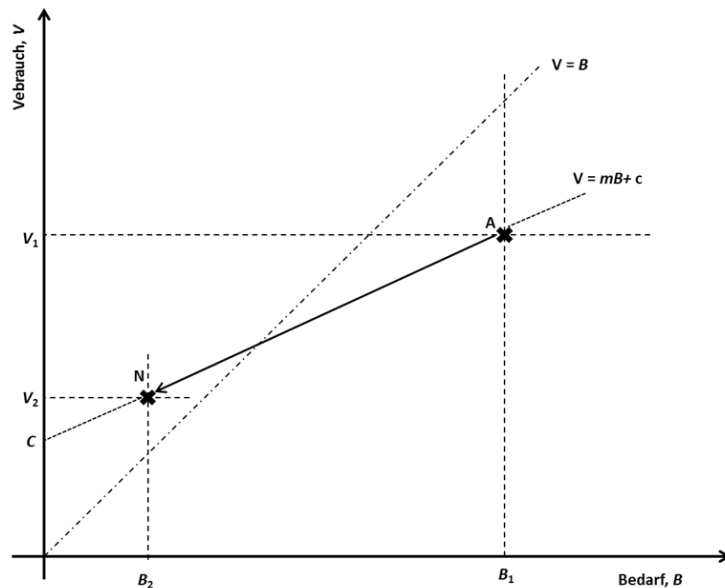


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Bedarf und Verbrauch einer Wohneinheit vor und nach einer energetischen Sanierung

Abbildung 1 zeigt eine energetische Sanierung, wobei Bedarf und Verbrauch von Punkt A (B_1 , V_1) auf Punkt N (B_2 , V_2) reduziert werden¹. Die Linie ($V = B$) entspricht der idealisierten Situation, bei der der Verbrauch dem Bedarf entspricht, was wiederum selten der Fall ist. Sunikka-Blank und Galvin (2012) haben gezeigt, dass bei alten, unsanierten, wärm-ineffizienten Gebäuden in Deutschland der Verbrauch im Durchschnitt etwa 40 % unter dem Bedarf liegt, während bei energieeffizienten, sanierten Gebäuden diese Beziehung oft umgekehrt ist. Dies wird jetzt in Deutschland von der DENA (2012) bestätigt und scheint auch in den Niederlanden, Belgien und Frankreich der Fall zu sein (Laurent et al., 2013).

Berücksichtigt man den Rebound-Effekt als Elastizität nach Gleichungen (1), (2) und (3), müssen wir Formeln in Energieeffizienz ε für Energiedienstleistungen S und Energie E finden. Zunächst nehmen wir an, dass Energiedienstleistungen zu 100 % verbraucht werden, was erfüllt wäre, wenn der Verbrauch dem Bedarf entspricht. Dies bedeutet, die Bewohner heizen so, dass sie den gesamten Komfort genießen, der im DIN-Standard (siehe z. B. DIN, 2004) vorausgesetzt wird. Damit kann angenommen werden, dass die Menge der Energiedienstleistungen, die in einer bestimmten Wohneinheit verbraucht werden, proportional zu dem Verhältnis Verbrauch/Bedarf ist:

$$S = \frac{E}{B} \quad (4)$$

Nach der Methodik von Sorrell und Dimitropoulos (2008) schlagen wir vor, dass die Energieeffizienz antiproportional zu der Menge von Energie ist, die verbraucht wird, um Energiedienstleistungen von 100 % zu produzieren:

¹ 'A' bedeutet 'alt', d. h. vor der Sanierung; 'N' bedeutet 'neu', d. h. nach der Sanierung.

$$\varepsilon = \frac{C}{B} \quad (5)$$

wobei C ein Beiwert ist. Aber da wir ε nur in Formeln wie $\partial\varepsilon/\varepsilon$ benutzen, verschwindet C . Wir dürfen dann schreiben:

$$\varepsilon = \frac{1}{B} \quad (6)$$

Galvin (2013c) gibt ein empirisches Beispiel einer Sanierung eines Einfamilienhauses in Nürnberg. Vor der Sanierung war der Bedarf 275 kWh/m²a und der Verbrauch 170 kWh/m²a. Nach der Sanierung war der Bedarf 97 kWh/m²a und der Verbrauch 102 kWh/m²a. Deswegen haben wir:

Energieeffizienz vor der Sanierung: $1/275 = 0,00364$

Energiedienstleistungen vor der Sanierung: $170/275 = 0,618$

Energieeffizienz nach der Sanierung: $1/97 = 0,0103$

Energiedienstleistungen nach der Sanierung: $102/97 = 1,052$

An dieser Stelle sind mathematische Vereinfachungen verführerisch, indem man nur die großen Änderung von Effizienz, Energieverbrauch und Energiedienstleistungen durch eine Anpassung von Gleichungen (2) und (3) benutzt – was wir hier die ‚Ein-Schritt‘-Rebound-Effekt-Methode nennen:

$$R'_\varepsilon(S) = \frac{\Delta S}{S} / \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\Delta S}{\Delta\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{S} \quad (7)$$

$$R'_\varepsilon(E) = \frac{\Delta E}{E} / \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\Delta E}{\Delta\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{E} \quad (8)$$

Allerdings erhält man auf diesem Wege folgende seltsame Ergebnisse:

$$R'_\varepsilon(S) = \frac{\Delta S}{S} \cdot \frac{\varepsilon}{\Delta\varepsilon} = \left(\frac{1.050 - 0.618}{0.0103 - 0.00364} \right) \times \left(\frac{\frac{1}{275}}{\frac{1}{170}} \right) = 0,230,$$

und:

$$R'_\varepsilon(E) = \frac{\Delta E}{E} \cdot \frac{\varepsilon}{\Delta\varepsilon} = \left(\frac{97 - 170}{0.0103 - 0.00364} \right) \times \left(\frac{\frac{1}{275}}{\frac{1}{170}} \right) = -0,234$$

Diese Ergebnisse sind widersprüchlich, da Gleichung (1) hier nicht erfüllt ist, da:

$$0,230 - (-0,234) \neq 1$$

Aus diesem Grund wird die *komplette* Zunahme der Energieeffizienz nicht mitberechnet. Stattdessen müssen wir Formeln für S und E im Hinblick auf ε finden und diese dann auch im Hinblick auf die Gleichungen (2) und (3) differenzieren.

Es existiert noch ein weiteres Problem: es gibt keine Verbindung zwischen A und N in Abbildung 2. Daher ist es nicht möglich, diese Formeln aus diesen Daten abzuleiten.

Drei mögliche Lösungen sind in Galvin (2013c) berücksichtigt: (a) eine lineare Beziehung zwischen Verbrauch und Bedarf; (b) eine lineare Beziehung zwischen Verbrauch und Energieeffizienz; und (c) eine Beziehung zwischen Verbrauch und Bedarf, die zu einem konstanten Rebound-Effekt führt, unberücksichtigt wie die Energieeffizienz der Wohneinheit vor der Sanierung war und unberücksichtigt wie die Energieeffizienz nach der Sanierung ausfällt.

Methode (a) und (b) führen zu zwei verschiedenen Kurven für die Rebound-Effekte, obwohl ihre durchschnittlichen Werte mit 0,486 beziehungsweise 0,587 relative nahe beieinander liegen (siehe Berechnungen in Galvin, 2013c). Unten in Abschnitt 4 sehen wir allerdings, dass Methode (c) zu einem konstanten Rebound-Effekt-Ergebnis mit einem Wert von 0,5098 führt, welcher dem Durchschnitt der Ergebnisse von (a) und (b) sehr ähnelt. Des Weiteren ist zu bemerken, dass bei allen drei Methoden die Gleichung (1) erfüllt ist: die gesamte Zunahme der Energieeffizienz wird berücksichtigt. Alle drei Methoden sind mathematisch vertretbar, weil sie die Regeln der Differenzialrechnung einhalten. Trotzdem besitzt (c) Vorteile gegenüber anderen Methoden.

- Sie ist leichter zu kalkulieren.
- Sie produziert Ergebnisse, die mit empirischen Studien aus großen Datensätzen aus Deutschland, Belgien und Frankreich (und wahrscheinlich auch Holland, wo die komparative Analyse noch nicht vollkommen entwickelt ist) übereinstimmen;
- Ihre mathematische Form scheint intuitiv dem tatsächlichen Verhalten von Verbrauchern zu ähneln.

Aus diesem Grund wird diese Methode nun detailliert erklärt.

4 Der ‚konstante‘ Rebound-Effekt

Wenn der Rebound-Effekt über eine Bandbreite von unterschiedlichen Ausmaßen der Energieeffizienz konstant ist (d. h. $R_\varepsilon(S) = K$), muss nach Gleichung (2) die folgende Beziehung gelten:

$$\frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{S} = K \quad (9)$$

In dem Fall ist K der Rebound-Effekt $R_\varepsilon(S)$ und ist Konstant.

Differenzialgleichungen der Form von Gleichung (9) haben die allgemeine Lösung:

$$S = U \cdot \varepsilon^K \quad (10)$$

wobei U auch eine Konstante ist. Diese Lösung wird klar, wenn wir (10) in (9) substituieren:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{S} &= K \cdot U \cdot \varepsilon^{K-1} \cdot \frac{\varepsilon}{U \cdot \varepsilon^K} \\ &= K \end{aligned}$$

Um U und K für die energetische Sanierung in Nürnberg zu erhalten, substituieren wir E/B für S und $1/B$ für ε in Gleichung (10) und lösen die Simultangleichungen der Form:

$$\frac{E}{B} = U \cdot \left(\frac{1}{B}\right)^K \quad (11)$$

indem wir die Werte von V (für E) und B entsprechend der Punkte A (B_1, V_1) und N (B_2, V_2) in Abbildung 1 benutzen. Davon kommt das allgemeine Ergebnis:

$$K = \frac{\ln\left(\frac{V_2 \cdot B_1}{B_2 \cdot V_1}\right)}{\ln\left(\frac{B_1}{B_2}\right)} \quad (12)$$

Daher gilt für diese Fallstudie:

$$K = \frac{\ln\left(\frac{102 \times 275}{97 \times 170}\right)}{\ln\left(\frac{275}{97}\right)} = 0,5098$$

Deswegen ist der Energiedienstleistungs-Rebound-Effekt 0,5098, d. h. 50,98%. Nun setzen wir diese Werte von K in Gleichung (11) ein, mit dem Ergebnis:

$$U = 10,83$$

So ergibt sich die Lösung der Differenzialgleichung für diese energetische Sanierung:

$$S = 10,83 \cdot \varepsilon^{0,5098} = 10,83 \cdot B^{-0,5098} \quad (13)$$

Dann substituieren wir $\varepsilon = E/B$ in (13), um E als eine Funktion von B zu erhalten:

$$E = 10,83 \cdot B^{0,4902} \quad (14)$$

Die (theoretische) Beziehung zwischen Verbrauch und Bedarf in Gleichung (14) wird in Abbildung 2 gezeigt.

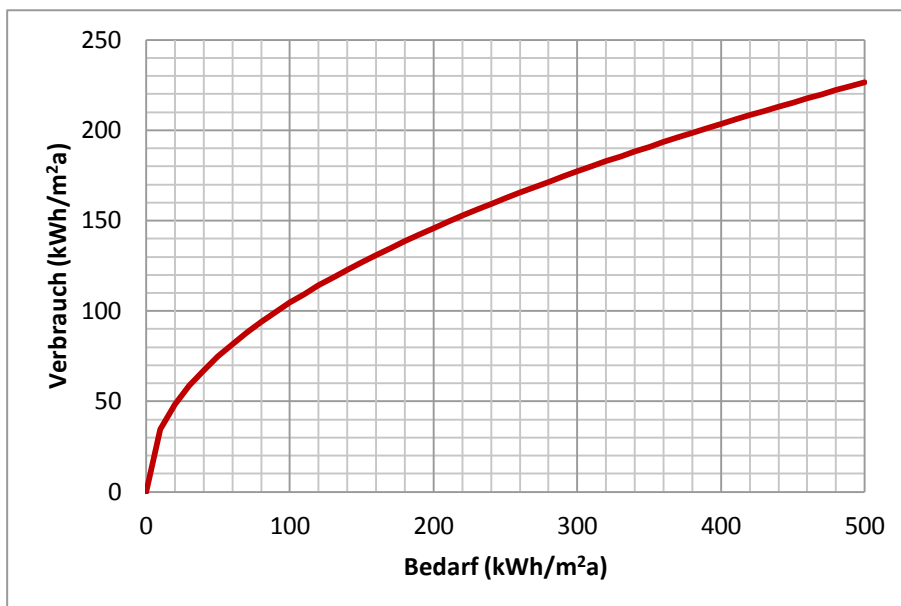


Abbildung 2: Theoretischer Verbrauch / Bedarf für den Sanierungsfall in Nürnberg mit konstantem Rebound-Effekt, basierend auf Gleichung (14)

Außerdem zeigt Abbildung 3 die Beziehung zwischen Energiedienstleistungen und Bedarf, welche auf Gleichung (15) basiert.

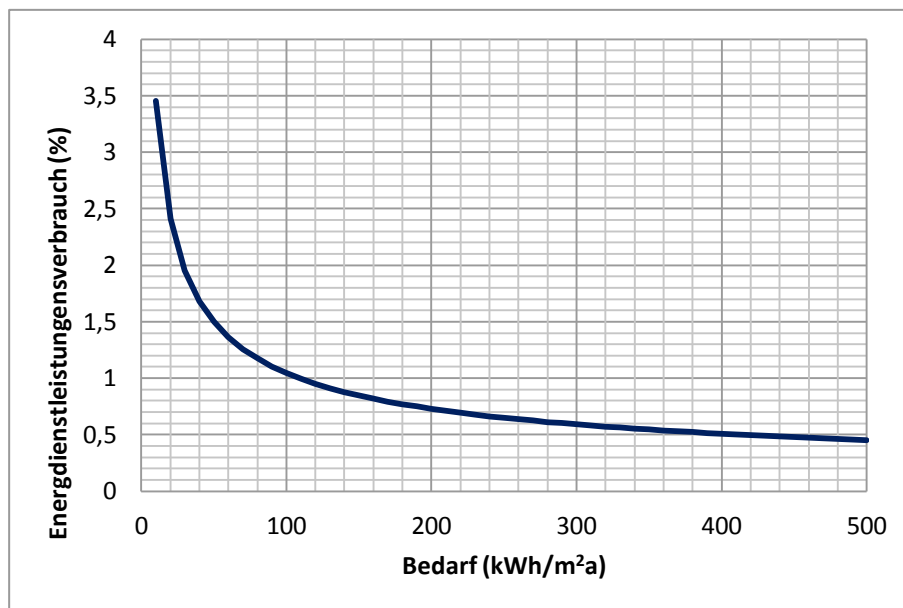


Abbildung 3: Theoretischer Konsum von Energiedienstleistungen für den Sanierungsfall in Nürnberg mit konstantem Rebound-Effekt, basierend auf Gleichung (15)

Es ist festzuhalten, dass der Konsum von Energiedienstleistungen dort steil ansteigt, wo der Bedarf geringer wird, also dort, wo die Wohneinheit energieeffizienter wird. Der Rebound-Effekt allerdings bleibt konstant. Das bedeutet: die proportionale Änderung der Energiedienstleistungen pro Einheit der proportionalen Änderung der Energieeffizienz bleibt immer gleich. Für jede schrittweise Steigerung der Energieeffizienz, unabhängig vom Ausmaß, sind 50,98 % der Energieeffizienz für eine Zunahme von Energiedienstleistungen verantwortlich, und die übrigen 49,02 % führen zu einer Reduktion des Energieverbrauchs.

Intuitiv ist dies überzeugend, da impliziert wird, dass Verbraucher ihren Konsum von Energiedienstleistungen in Proportion zur Senkung des Preises der Dienstleistungen erhöhen - egal wie hoch oder niedrig die Menge der Dienstleistungen vor der Preissenkung war oder ist.

Es ist weiterhin zu bemerken, dass es in diesem Fall der Sanierung eine relativ hohe Zunahme der Energieeffizienz gab. Aus diesem Grund können wir nur rein theoretisch über die Werte zwischen Punkt A und Punkt N in Abbildung 1 sprechen. Es war nötig, eine durchgehende Funktion zwischen diesen zwei Punkten anzunehmen, da der Rebound-Effekt eine Funktion ist, die auf der Analyse von infinitesimalen Änderungen basiert und nicht für große Sprünge zwischen weit entfernten Werten gemacht ist.

Mit dieser Methode können wir den Rebound-Effekt des Weiteren in seine verschiedenen Komponenten splitten: erhöhter Komfort; Schwierigkeiten beim Management der neuen Heizungstechnologie; schlechte Synchronisierung der Rhythmen des Zyklus von Heizen und Abkühlen - der Heizungstechnologie mit den Rhythmen des Lebensstils der Bewohner und rein technologische Fehler. Hier können wir schreiben:

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + \dots K_N \quad (15)$$

wobei jeder Teil des Rebound-Effektes K_1 , K_2 etc. eine Konstante ist. Gleichung (10) wird dann:

$$S = U \cdot e^{K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + \dots + K_N} \quad (16)$$

5 Weitere empirische Unterstützung für den ‚konstanten‘ Rebound-Effekt

Es kann auch gezeigt werden, dass diese Funktion gut geeignet ist um große Datensätzen empirisch abgeleiteter Ergebnisse zu verarbeiten. Als Beispiel berücksichtigen wir eine Studie von Loga et al. (2011) mit einer deutschlandweiten Stichprobe des Verbrauchs und Bedarfs von 1702 Wohneinheiten. Diese Autoren drückten die Beziehung zwischen dem Verbrauch E und dem Bedarf B folgendermaßen aus:

$$E = B \cdot \left(-0.2 + \frac{1.3}{1 + \frac{B}{500}} \right) \quad (17)$$

Diese Polynomfunktion sieht sehr anders aus als die Funktion in Gleichung (14). Aber wir können zeigen, dass die Funktion ‚konstanter Rebound-Effekt‘ auch eine sehr gute Ausgleichsgerade für diese Daten ist. Wir benutzen die Punkte (97; 86,2) und (275; 175,4) aus der Kurve von Gleichung (17) und die Methode von Simultangleichungen aus Abschnitt 4. So kommt man auf das Ergebnis:

$$E = 3,783 \cdot B^{0,6834} \quad (18)$$

Abbildung 4 zeigt die beiden Kurven. Die durchgezogene Linie ist die polynomiale Kurve von Gleichung (4) und die punktierte Linie ist die Exponenten-Kurve aus Gleichung (17), die einen konstanten Rebound-Effekt produziert. Die zwei Kurven ähneln einander relativ gut, da der maximale Unterschied zwischen den Beiden lediglich 3,0 % beträgt. Der Rebound-Effekt ist:

$$1 - 0,6834 = 0,3166 \text{ oder } 31,66\%.$$

Da es sich bei diesem Datensatz um eine Zufallsauswahl von Verbrauchs-Bedarfs-Werten aus dem deutschen Wohnungsbestand handelt, lässt sich folgern, dass der durchschnittliche Rebound-Effekt im Bereich deutscher Raumheizungen ungefähr 32 % beträgt. Dies bedeutet, falls wir ein größeres Sample von Wohneinheiten mit einem spezifischen Bedarf nehmen, wird der durchschnittliche Rebound-Effekt für diese Wohneinheiten 32 % sein, egal wie intensiv diese saniert sind.

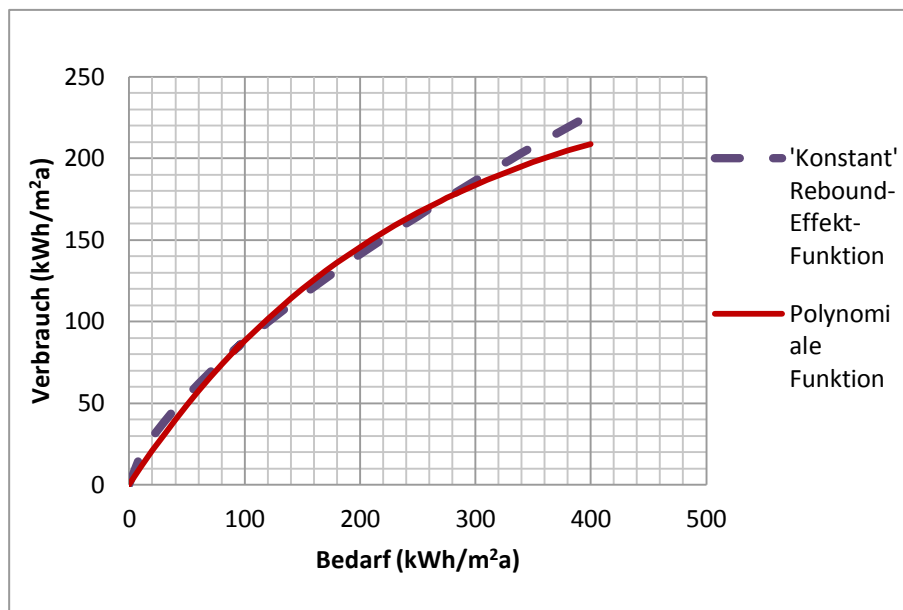


Abbildung 4: Vergleich von polynominaler und exponentieller Funktion für E/B im Datensatz von Loga et al. (2011)

Ein noch größerer Datensatz wurde von Sunikka-Blank und Galvin (2012) betrachtet (3.700 Wohngebäude). Galvin (2013c) zeigt, dass die beste Ausgleichsgerade für den Verbrauch-
Bedarf bei diesen Daten mit Gleichung (19) dargestellt ist:

$$E = 12 \cdot B^{0,499} - 29,3 \quad (19)$$

Annäherung wird erst von einer Kurve des ‚konstanten Rebound-Effekts‘ erreicht:

$$E = 4,504 \cdot B^{0,6407} \quad (20)$$

Die maximale Abweichung zwischen den beiden Kurven liegt bei 2,7 %. In diesem Fall ist der (konstante) Rebound-Effekt:

$$1 - 0,6407 = 0,3593 \text{ oder } 35,93 \, \%.$$

Es gibt auch tragende Beweise, dass der konstante Rebound-Effekt im Wohnungsbestand auch in anderen europäischen Ländern existiert. Hens et al. (2010) fanden solch eine Funktion in ihrer Studie über Raumheizung mit Daten aus 964 belgischen Wohneinheiten:

$$E_h = 299,6 \cdot \left(\frac{H_T}{V} \right)^{0,84} \quad (21)$$

wobei E_h der jährlicher Energieverbrauch ($\text{MJ/m}^3\text{a}$) ist; H_T ist der durchschnittliche U-Wert der Gebäudehülle, und V ist das Volumen des Gebäudes. Die Parameter unterscheiden sich von denen deutscher Studien, weil ihre Basislinie die Wärmequalität der Gebäudehülle sowie ihr Volumen ist und nicht die durchgehende Kombination von Faktoren in dem DIN-Standard. Trotzdem impliziert Gleichung (21) ähnliche durchschnittliche Verhaltensreaktionen unter den Bewohnern wie in Deutschland.

Allibe (2012) fand die gleiche Form von Exponenten-Beziehung in seiner Studie von Wohneinheiten in Frankreich:

$$x = 3,5309y^{-0,5426} \quad (22)$$

wobei x die ‚Energie-Intensität‘ ist (bei uns E/B) und y der theoretische Preis der Heizung für 100 % Energiedienstleistungen ist – also der Bedarf multipliziert mit einem Faktor, der die Wohnfläche miteinbezieht. Wenn wir beiden Seiten der Gleichung (22) mit B multiplizieren, bekommen wir eine Gleichung der Form:

$$E = 3,5309 \cdot z^{0,4474}$$

Die Form dieser Gleichung ist mit unserer ‚konstanten-Rebound-Effekt‘-Kurve identisch.

Ähnliche Ergebnisse gibt es für Großbritannien und die Niederlande. Die mathematische Modellierung ist dort allerdings noch nicht weit genug entwickelt, um zu überprüfen, ob die Art der Kurve aus Deutschland, Belgien und Frankreich auch für ihre Daten gilt. (siehe Laurent et al, 2013). Diese Beispiele zeigen, dass der Rebound-Effekt in großen landesweiten Datensammlungen von Verbrauch und Bedarf von Wohneinheiten mit der Differentialgleichungs-Methode in Abschnitt 4 gut zu modellieren ist – was wir hier als ‚konstanten Rebound-Effekt‘ bezeichnen.

Es existieren noch zwei weitere Definitionen des Rebound-Effekts im Bereich Raumwärme, von denen keine einer Elastizität entspricht. Diese werden im Endbericht beschrieben. Das ‚Energie-Einspardefizit‘ (*EED*) wird in Haas und Biermayr (2000) eingeführt und man sieht Beispiele in Guerra Santin et al. (2009); Lloyd (2008) und Olofsson (2009). Die ‚Energie-Performance-Lücke‘ (*EPL*) findet man in Demanuele et al. (2010) und Tronchin und Fabbri (2007). Die Abwendungsbeschränkungen dieser Definitionen sind im Endbericht diskutiert und anhand von Beispielen durchgearbeitet.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Zusammenfassend schlagen wir nun vor, dass die Methode in Abschnitt 4 – der ‚konstante Rebound-Effekt‘ – für die Berechnung von Rebound-Effekten in Gebäuden am geeignetsten ist. Diese Methode besitzt folgende Vorteile:

- Sie ist mathematisch korrekt im Bezug auf das Konzept der Energieeffizienz-Elastizität.
- Deswegen können die Ergebnisse zum Thema Rebound-Effekt direkt in die allgemeine Policy- und akademische Diskussion verschiedener Wirtschaftsbereiche übertragen werden.
- Diese Methode ist leicht anwendbar; sie benötigt lediglich einfache Substitutionen sowie Simultangleichungen.
- Sie produziert für jedes Gebäude einheitliche Werte des Rebound-Effekts, die mit den Ergebnissen anderer Gebäude verglichen werden können.
- Sie ist intuitiv überzeugend, da sie andeutet, dass Verbraucher gleichbleibende Reaktionen auf erhöhte Heizenergie-Effizienz und Preis-Signale besitzen.
- Die Ergebnisse passen gut (obwohl nicht perfekt) zu Verbrauchs-Bedarfs-Beziehungen in großen Datensätzen - sowohl aus Deutschland als auch (mindestens vorläufig) aus Frankreich und Belgien.
- Sie zieht alle vier Parameter einer energetischen Sanierung in Betracht: Bedarf *und* Verbrauch vor *und* nach der Sanierung, und bietet deswegen Informationen über die Verhaltensänderungen der Benutzer nach einer Steigerung der Energieeffizienz.

7 Literaturverzeichnis

- Allibe B (2012) *Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel à long terme*, PhD report, Ecole des Hautes études en sciences sociales, November 2012.
- Barker T, Ekins P, Foxon T (2007) The macro-economic rebound effect and the UK economy. *Energy Policy* 35: 4935-4946.
- Barker T, Dagoumas A, Rubin J (2009) The macroeconomic rebound effect and the world economy. *Energy Efficiency* 2:411-427.
- Berkhout P, Muskens J, Velthuisen J (2000) Defining the rebound effect. *Energy Policy* 28 (6–7): 425–432
- Demanuele C, Tweddell T, Davies M (2010) Bridging the gap between predicted and actual energy performance in schools. *World Renewable Energy Congress XI* 25-30 September 2010, Abu Dhabi, UAE.
- DENA (2012) Der dena-Gebäudereport 2012: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin: Deutsche Energie-Agentur. Available online via: <http://www.dena.de/publikationen/gebaeude/report-der-dena-gebaudereport-2012.html> accessed 20 February, 2012
- DIN (2003) DIN 4108-2:2003-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Beuth-Verlag, Berlin
- Galvin R (2013b) Making the 'rebound effect' more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: defining the 'energy savings deficit' and the 'energy performance gap'. *Energy and Buildings* (accepted for publication October 2013: Working Paper Version available at: <http://justsolutions.eu/Resources/Galvin-ReboundEffectMethodologies-WORKING-PAPER.pdf>)
- Galvin R (2013c) Revisiting calculation methods for rebound effects in thermal retrofits of homes: introducing the 'flat' rebound effect. (work in progress: Working Paper Version available at: http://justsolutions.eu/Resources/Galvin_FlatRebound_effects_WORKING_PAPER.pdf)
- Guerra Santin O, Itard L, Visscher H (2009) The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings* 41:1223–1232
- Haas R, Biermayr R (2000) The rebound effect for space heating: Empirical evidence from Austria. *Energy Policy* 28: 403-410.
- Hens H, Parijs W, Deurinck M (2010) Energy consumption for heating and rebound effects. *Energy and Buildings* 42: 105–110.
- Laurent H-M, Allibe B, Oreszczyn T, Hamilton I, Tigchelaar C, Galvin R (2013) Back to reality: How domestic energy efficiency policies in four European countries can be improved by using empirical data instead of normative calculation. *ECEEE SUMMER STUDY 2013 proceedings*: 2057-2070
- Loga T, Diefenbach N, Born R (2011) *Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Institute Wohnen und Umwelt, Darmstadt.
- Sorrel S, Dimitropoulos J (2008) The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics* 65: 636-649
- Sorrell S, Dimitropoulos J, Sommerville M (2009) Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. *Energy Policy* 37: 1356–1371
- Sunikka-Blank M, Galvin R (2012) Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption. *Building Research and Information* 40: 260-273
- Tronchin L, Fabbri K (2007) Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: Comparison between software simulations and operating rating simulation. *Energy and Buildings* 40(7): 1176–1187

Anhang 2:

Interview-Leitfaden-Fachpersonal

0. Begrüßung

3 min

- namentliche Vorstellung
- Danksagung für Projektunterstützung
- Hinweise zum Projekt und Datenschutz zugesendet – noch Fragen zur Vorgehensweise?
- auf Freiwilligkeit hinweisen
- digital aufgezeichnetes Interview, Hinweis: Löschen des Interviews jederzeit möglich
- zeitlicher Rahmen ca. 45 min
- am Gebäude wurden vor X Jahren folgende Sanierungsmaßnahmen durchgeführt, dazu folgende Fragen

1. Was ist Ihre Aufgabe / Ihre Zuständigkeit in diesem Gebäude? Seit wann arbeiten Sie hier?

5 min

- Beeinflussung des Sanierungszustandes erfahren

2. Was wurde in diesem Gebäude energetisch saniert? Aus den Planungsunterlagen habe ich erfahren, dass folgende Maßnahmen geplant waren: objektbezogene Maßnahmen aufzählen. Wurden diese Maßnahmen auch ausgeführt?

5 min

- Vergleich mit jeweils geplanten Maßnahmen aus Energiekonzept / Planungsunterlagen abgleichen

Gebäudehülle (objektbezogene Maßnahmen auflisten)

- Fassade
- Fenster / Türen
- Dach
- Bodenplatte

Beheizung / Anlagentechnik (objektbezogene Maßnahmen auflisten)

- Wärmeerzeugungssystem (Kessel, Anzahl Wärmeerzeuger, Trinkwasser-Erwärmung)
- Wärmeverteilung (Veränderung des Strangsystems, Dämmung der Rohrleitungen)
- Wärmeübergabesystem (wurden die Heizkörper erneut)
- Wärmespeicherung (Größe, wann installiert)

3. Was waren die Gründe für eine energetische Sanierung? Warum wurden genau diese Maßnahmen ausgewählt?

5 min

4.a) bei Sanierungsbeauftragten:

Gab es Überlegungen andere Sanierungsmaßnahmen zu ergreifen und warum hat man sich für diese Maßnahmen entschieden?

8 min

- Gründe erfragen: bautechnische, wirtschaftliche, zeitliche

4.b) bei Haustechniker, Facility Manager:

Wie gut passt die Sanierungsmaßnahme zu den Nutzern, welche Rückmeldung haben Sie schon bekommen / bekommen Sie noch?

8 min

- **Heizungssystem:** Trägheit Heizungssystem, Heizkörper werden nicht mehr richtig warm
- **Lüftungsanlage:** Zugluft, Klimaanlagegeräusche
- **Regelungstechnik:** Bedienbarkeit, Wochenend-, Nachtabsenkung
- **Fenster:** Luftqualität
- **Nutzer/innen eine Einweisung / Schulung** zur neuen Technologie bekommen?
- **Veränderungen der Nutzergewohnheiten**
- **Zugänglichkeit zu Energieverbrauchswerten / Interesse**

5.) Wir haben festgestellt, dass der Energieverbrauch höher liegt als der errechnete Energiebedarf. Was könnten Ihrer Meinung nach Gründe dafür sein?

10 min

Zu welchen Punkten gab es vorher Beschwerden?

6.) Schlussfragen bei Haustechniker, Facility Manager:

9 min

- **Gebäude-Regelungstechnik** erneuert?
- **bedienungsfreundlich** und warum?
- **zur Verfügung stehenden Parameter als ausreichend?** Was würden Sie gern noch verändern und warum?
- Erfolgte eine **Einstellung / Anpassung der Gebäudetechnik nach** der energetischen **Sanierung**?
- Welche Parameter haben Sie **bereits angepasst** und **warum genau diese**?
- Gab es **Reaktionen auf die Anpassungen** und wie sahen diese aus?

7.) Spezielle Regelungs-Programme

- **Nacht- und Wochenend-, Feiertagsabsenkung** – jetzt / vorher

8.) Raum-Regelungstechnik

- Gibt es nur **zentrale Temperaturregelung der Büros/** Beratungsräume oder eine **dezentrale**?
- Gab es im Zuge der Sanierung Veränderungen bei der Regelungstechnik, wenn ja welche?
- Wie waren die **Reaktionen der Nutzer/innen**?
- Welche **Parameter** können die **Nutzer/innen** selbst einstellen?

9.) Wurde ein hydraulischer Abgleich durchgeführt?

Gebäude-Rundgang

- 10.) Abfrage sonstiger **baulicher Änderungen** (geplante Maßnahmen auflisten, vergleichen mit tatsächlich durchgeführten)
- 11.) **Gebäude strukturell oder räumlich modifiziert** (Berücksichtigung von Gebäudeerweiterungen und Umnutzungen, Ausweitung der beheizten Fläche, Vergrößerung / Verkleinerung der Fensterflächen, Schaffung eines großzügigen Eingangsbereiches, Installation einer neuen Beleuchtungsanlage, etc.)? Wie könnte sich **dies beim Verbrauch bemerkbar machen**?
- 12.) Wird Objekt mit **Warmwasser** versorgt? Wenn ja, wie wird dies erzeugt, ggf. nach separaten Zähler fragen? -> sofern dies nicht vorab geklärt wurde

Anhang 3:

Interview-Leitfaden-Nutzer/innen

0. Begrüßung	3 min
- namentliche Vorstellung - Danksagung für Projektunterstützung - Hinweise zum Projekt, Datenschutz zugesendet – noch Fragen zu Vorgehensweise? - Freiwilligkeit hinweisen - digital aufgezeichnetes Interview, Hinweis: Löschen des Interviews jederzeit möglich - zeitlichen Rahmen max. 45 min - Hinweis: Multiplikator - Gebäude wurden vor X Jahren energetisch saniert, dazu folgende Fragen	
1. Seit wann arbeiten Sie hier? Wie lange sitzen Sie schon in Ihrem Büro?	5 min
- Kontinuität: vor und nach der Sanierung - räumliche Veränderungen - Anzahl und Zusammensetzung Bürobelegung	
2. Wie sieht ein typischer Tagesablauf bei Ihnen aus?	5 min
- Beginn / Ende der Arbeit - Wieviel Zeit im Büro / draußen / Besucherverkehr - Lüftung / Heizung	
3. Hier haben in den letzten Jahren umfangreiche Sanierungen stattgefunden. Welche Erwartungen hatten Sie an die Sanierung?	6 min
- Komfort / Behaglichkeit / Wegfall von Zugscheinungen - Effizienz / Energieeinsparung - Bedienbarkeit / Nutzerfreundlichkeit ➔ Rückfrage, ob Erwartungen sich erfüllt haben -> Warum nicht?	
4. Haben sich durch die Sanierung Veränderungen für Sie ergeben?	9 min
Wie gehen Sie damit um? / Anpassung erfragen	
- Fenster - o vorher / nachher - o Zugscheinungen -> Ausgleich vorher - o nie geöffnet - Wände, Dach - o vorher / nachher - o kühler? -> Kältestrahlung - Räume - o vorher / nachher - o durchgängig warm - o Luftqualität - Heizung - o vorher / nachher - o besonders Heizung aufgedreht, Heizung nie abgedreht	

- Bedienungsfreundlichkeit
- Energieverbrauch verändert?
 - Kennen Werte
 - Zugänglichkeit
 - Interesse

5. Wie fühlen Sie sich in diesem Verwaltungsgebäude hinsichtlich der Wärme, Lüftung und der Benutzbarkeit wohl?

5 min

- vorher / nachher
- Temperatur
- Lüftung
- Zugscheinungen

6. Haben Sie Ihr Verhalten an die neue Situation angepasst, hat sich etwas verändert im Vergleich zum Zeitpunkt vor der Sanierung?

12 min

Ausweichfrage: Wie sieht ein typischer Tagesablauf im Winter hinsichtlich Lüften, Heizen bei Ihnen aus? - und vorher?

- Temperatur
 - vorher / nachher
 - Abstimmung mit Kollegen/innen
 - Räume schneller warm / kühlte vorher schneller aus
 - Nacht-, Wochenendabsenkung
 - Einfluss auf Arbeitsrhythmus
- Lüftung
 - vorher / nachher
 - Qualität
 - Dauer, Anzahl
 - Art
- Zugscheinungen
 - vorher / nachher
 - Ausgleich
- Regelungstechnik
 - vorher / nachher
 - was vorhanden
 - Bedienungsfreundlichkeit
 - Anzahl Bedienungsvorgänge
 - Wie wird bedient?
- Einweisung / Schulung bekommen?
 - Welcher Form
 - Informationsmaterial

7. Haben Sie zu Hause ein anderes Heizungs-, Lüftungsverhalten?

5 min

- Temperatur
- Lüftung
- Regelungstechnik

Anhang 4:

Einzelwerte thermischer Energieverbrauch

Zollamt Flensburg

Sanierungszeitraum: 08/2010 bis 08/2011, Restarbeiten 2012 (Kellerdeckendämmung)

Abrechnungszeitraum / therm. Energieverbrauch, (witterungsbereinigt) [kWh/ (m _{NGF} a)]	Jan. 06 bis Jan. 07	Jan. 07 bis Jan. 08	Jan. 08 bis Jan. 09	Jan. 09 bis Jan. 10	Jan. 10 bis Jan. 11	Jan. 11 bis Jan. 12	Jan. 12 bis Jan. 13	Jan. 13 bis Jan. 14
Zugeordnete Abrechnungsperiode	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
vor der Sanierung ¹	206	196	207	208	-	-	-	-
im Sanierungszeitraum ¹	-	-	-	-	183	-	-	-
nach der Sanierung ¹	-	-	-	-	-	126	120	104

¹ bereinigte Werte für eine Heizperiode (365 / 366 Tage)

Zollamt Bremen

Sanierungszeitraum: 03/2011 bis 07/2011 (Nr. 58) und 10/2011-02/2012 (Nr. 60)

Abrechnungszeitraum / therm. Energieverbrauch, (witterungsbereinigt) [kWh/ (m _{NGF} a)]	Mrz. 06 bis Feb. 07 (Erdöl)	Feb. 07 bis Feb. 08 (Erdöl)	Feb. 08 bis Jan. 09 (Erdöl)	Sep. 10 bis Dez. 10 (Erdgas)	Jan. 11 bis Dez. 11 (Erdgas)	Jan. 12 bis Dez. 12 (Erdgas)	Jan. 13 bis Dez. 13 (Erdgas)
Zugeordnete Abrechnungsperiode	2006	2007	2008	2010	-	2012	2013
vor der Sanierung ¹	278	141	202	202 *	-	-	-
nach der Sanierung ¹	-	-	-	-	-	85	91

¹ bereinigte Werte für eine Heizperiode (365 / 366 Tage)

* Hochrechnung auf Gesamtjahresverbrauch über monatlichen Heizenergieanteil (Energiebericht)

Polizei Dresden

Sanierungszeitraum: 2007-2008

Abrechnungszeitraum / therm. Energieverbrauch, (witterungsbereinigt) [kWh/ (m _{NGF} a)]	Nov. 03 bis Nov. 04	Nov. 04 bis Nov. 05	Nov. 05 bis Dez. 06	Dez. 08 bis Dez. 09	Dez. 09 bis Dez. 10	Dez. 10 bis Dez. 11	Dez. 11 bis Dez. 12	Jan. 12 bis Dez. 13
Zugeordnete Abrechnungsperiode	2003	2004	2005	2008	2009	2010	2011	2012
vor der Sanierung ¹	110	108	100	-	-	-	-	-
nach der Sanierung ¹	-	-	-	59	56	50	52	43

¹ bereinigte Werte für eine Heizperiode (365 / 366 Tage)**Hochschule für Musik Dresden**

Sanierungszeitraum: Frühling 2009 bis 12/2010

Abrechnungszeitraum / therm. Energieverbrauch, (witterungsbereinigt) [kWh/ (m _{NGF} a)]	Jul 05 bis Jun 06	Jul 06 bis Jun 07	Jul 07 bis Jun 08	Jul 08 bis Jun 09	Jul 11 bis Jun 12	Jul 12 bis Jun 13	Jul 13 bis Jun 14
Zugeordnete Abrechnungsperiode	2005	2006	2007	2008	2011	2012	2013
vor der Sanierung ¹	129	143	146	153	-	-	-
nach der Sanierung ¹	-	-	-	-	52	48	39

¹ bereinigte Werte für eine Heizperiode (365 / 366 Tage)

Anhang 5:

Vergleichswerte für den thermischen Energieverbrauch/ -bedarf

	Vergleichswerte für Raumwärme und Warmwasser [kWh/(m²a)]		
Gebäudeart	nach EnEV2007 BWZK (BMBVS (2009a))	nach EnEV2009 BWZK (BMBVS (2009a))	nach Benchmark (BMBVS (2009b))
Büro-/ Verwaltungsgebäude , beheizt	115	80	150
Polizeidienstgebäude	125	90	-
Lehr- und Forschungsgebäude, Institutsgebäude	190	135	145
Gebäude für Veranstaltungen und kulturellen Zwecken	90	65	150
Mittelwert zwischen Lehr und Forschungsgebäude und Gebäude für Veranstaltungen und kulturelle Zwecke	140	100	148