



Energistyrelsen

# Reboundeffekten for opvarmning af boliger

Hvor stor forskel er der på det faktiske energiforbrug og det teknisk beregnede behov?

Juni 2016

## **Forord**

Denne rapport er udarbejdet af Energistyrelsen som led i initiativet BedreBolig.

I rapporten undersøges sammenhængen mellem parcelhuses teknisk beregnede energibehov og det faktiske energiforbrug.

Rapporten benytter energimærker og BBR-oplysninger om det faktiske energiforbrug for individuelle parcelhuse.

## Indhold

1. Indledning og sammenfatning .....	3
2. Teori .....	7
3. Litteratur .....	11
4. Data .....	14
5. Estimationsmetode .....	16
6. Resultater for fjernvarme, naturgas og olie .....	17
7. Korrektion for supplerende varmekilder og for el til cirkulationspumper mv. ....	19
8. Konklusion og diskussion.....	22
Bilag 1. Økonomisk teori om reboundeffekten og om simultanitetsproblemet ved estimation af reboundeffekten .....	23
Bilag 2. Mere om de vigtigste variabler .....	31
Bilag 3. Beskrivende statistik .....	33
Bilag 4. Detaljerede estimationsresultater .....	34

## 1. Indledning og sammenfatning

### Reboundeffekten – hvad er det?

Denne rapport ser nærmere på den såkaldte ”reboundeffekt” for opvarmning af boliger. Når en bolig isoleres bedre, medfører det mindre behov for energi i form af varme. Imidlertid vælger beboerne ofte i større eller mindre grad at udnytte en del af gevinsten ved den bedre bygning til at øge komforten. For eksempel kan de vælge en højere indendørstemperatur eller at opvarme en større del af bygningen. Det er denne adfærdsændring, der kaldes en reboundeffekt.

Reboundeffekten kan også ses, hvis man sammenligner to huse med forskelligt teknisk beregnet energibehov: Forskellen på det teknisk beregnede energibehov i det energivenlige hus og det energikrævende hus er måske 10 kWh pr. m<sup>2</sup> pr. år. Men forskellen på det faktiske energiforbrug er eksempelvis kun 5 kWh. Beboerne i det energivenlige hus har i eksemplet valgt at udnytte halvdelen af gevinsten ved deres relativt energivenlige hus til at øge komforten.

Med andre ord er reboundeffekten, at **beboerne veksler en del af gevinsten ved lavere teknisk beregnet energibehov til bedre komfort.**

Den **samlede effekt** af at isolere en bygning bedre (dvs. at mindske det teknisk beregnede energibehov) på det faktiske energiforbrug, løber derfor ad to kanaler:

- En ”en-til-en-effekt” af det lavere teknisk beregnede energibehov
- En modgående reboundeffekt

Rapporten viser, at

- Hvis forskellen på det teknisk beregnede energibehov for to boliger er på 10 kWh pr. m<sup>2</sup> pr. år, vil forskellen på det faktiske energiforbrug i de to boliger være mellem 4 og 7 kWh. Reboundeffekten udgør således mellem 60 og 30 procent af de 10 kWh pr. m<sup>2</sup>.

### Hvorfor er reboundeffekten interessant?

Reboundeffekten er interessant i sig selv, fordi den beskriver menneskelig adfærd. Men kendskab til effekten er også centralt i forhold til at kunne udarbejde mere præcise forudsigelser om et forventet energiforbrug. Det kan blandt andet være relevant for boligejere og de aktører, der er involveret i en konkret renovering. Det gælder også eventuelle långivere af lån til energirenovering. Den faktiske energibesparelse vil således være vigtig viden i forhold til en vurdering af boligejernes økonomi og mulighed for at betale et eventuelt lån tilbage. Kendskab til reboundeffekten er helt centralt for energirenovering finansieret ved såkaldte ESCO-aftaler. I sådanne projekter er långiver – ESCO-

firmaet – direkte økonomisk påvirket af boligejerens energiforbrug.<sup>1</sup> Endelig er det nyttig viden for organisationer som fx Energistyrelsen m.fl., der laver forudsigelser af hele Danmarks energiforbrug.

### Undersøgelsens data og metode

I denne undersøgelse vil vi undersøge størrelsen af reboundeffekten i parcelhuse i Danmark.

Reboundeffekten er tidligere fundet i forskellige sammenhænge, fx også for bilkørsel.

Reboundeffekten belyses ved en statistisk sammenligning af parcelhuse i Danmark i 2012. To variabler er – som det fremgår ovenfor – helt centrale:

- Oplysninger om parcelhuses faktiske energiforbrug.  
I undersøgelsen bruges faktiske leverancer af fjernvarme, naturgas og olie leveret til energikunder på adresser rundt om i landet. Oplysningerne stammer fra energileverandører.
- Oplysninger om parcelhuses teknisk beregnede energibehov.  
I undersøgelsen bruges energimærker som mål for det teknisk beregnede energibehov. Energimærkerne stammer fra den obligatoriske energimærkningsordning. Energimærket er et udtryk for, hvor meget energi en energikyndig professionel konsulent vurderer, der er behov for, for at varme *hele* bygningen op til en *bestemt temperatur* under *standardiseret adfærd* hos *et antaget antal* beboere.

Forskellen på to parcelhuses energimærke er derfor kun udtryk for forskellen på de fysiske bygninger. Forskellen på to parcelhuses faktiske energiforbrug er udtryk for summen af forskellen på bygningernes fysik og på beboernes energimæssige adfærd.

De faktiske leverancer af fjernvarme, naturgas og olie sammenholdes med energimærket for de bygninger, der står på de adresser, hvor der leveres energi.

En lang række andre variabler indgår i undersøgelsen, dog uden at de har selvstændig interesse. Variablerne er kun med for at sandsynliggøre, at den statistiske sammenhæng mellem teknisk beregnet energibehov og faktisk energiforbrug, som man måtte finde, faktisk er udtryk for reboundeffekten, og ikke skyldes alt muligt andet.

En central kilde til usikkerhed i forbindelse med reboundundersøgelsen er, at det målte faktiske energiforbrug på individuelle adresser kun vedrører fjernvarme, olie og naturgas – men ikke alt energiforbrug, og særligt ikke brænde til brændeovne, der bruges som supplerende varmekilde i mange boliger. Det er netop det samlede forbrug, der er relevant for reboundhypotesen.

---

<sup>1</sup> I ESCO-projekter står et "Energy Service Company" for energirenoeringen og tager sig betalt gennem en del af energibesparelsen. Hvis ESCO-firmaet forventer, at ændret adfærd (højere indendørstemperatur) medfører en lav energibesparelse, vil firmaet måske ikke gå ind i projektet. Adfærdsændringer nævnes ofte som en grund til, at ESCO-projekter hyppigere gennemføres i fx kommunale institutioner end i boliger, fordi reboundeffekten forventes at være større i boliger.

De ovenfornævnte begreber *faktisk energiforbrug* og *teknisk beregnet energibehov* bruges ofte i rapporten (nogle steder skrives blot *forbrug* og *behov*). Desuden bruges ordet *energistandard* eller *effektivitet*. Effektiviteten er blot den reciprokke værdi af det teknisk beregnede energibehov:

$$\text{Effektivitet} = \text{Energistandard} = \frac{1}{\text{Teknisk beregnet energibehov}}$$

Med andre ord, har en energivenlig bygning et lavt teknisk beregnet energibehov og en høj energistandard. Ordene effektivitet og energistandard bruges bl.a. fordi, de er brugt i tidligere studier.

## Resultater

Undersøgelsen viser, at

- Hvis bygning X's årlige tekniske beregnede energibehov er 10 kWh lavere pr. m<sup>2</sup> end bygning Y's behov, vil det faktiske forbrug af fjernvarme, naturgas eller olie i bygningen være omtrent 4 kWh pr. m<sup>2</sup> lavere i bygning X.

Husejerne vil altså udnytte 40 procent af gevinsten ved god energistandard til energibesparelser og de resterende 60 procent til bedre komfort, hvis man alene ser på fjernvarme, naturgas og olie.

Det er forsøgt at korrigere dette resultat for forbruget af energi i supplerende varmekilder, særligt brænde i brændeovne. Der findes ikke oplysninger om forbruget af brænde på husstands niveau, men dog på nationalt plan. Når disse oplysninger udnyttes, kan man skønsvist korrigere for supplerende opvarmning. Korrektionen er foretaget ud fra en slags "forsigtighedsprincip", således at korrektionen medfører en lille, beregnet reboundeffekt:

- Hvis bygning X's årlige tekniske energibehov er 10 kWh lavere pr. m<sup>2</sup> end bygning Y's behov, vil det faktiske forbrug af alle former for energi til bygningsdrift højst være 7 kWh pr. m<sup>2</sup> lavere i bygning X.

Med denne korrektion svarer den "forsigtigt beregnede" reboundeffekt altså til mindst ca. 30 procent.

Selv om der er væsentlig usikkerhed i beregningerne, peger undersøgelsen på, at der er en betydelig reboundeffekt. Det kan ikke udelukkes, at adgang til andre data ville kunne medføre andre resultater. For eksempel ville analyser på data for det samme hus over en årrække, hvor huset blev renoveret, være interessant. Ligeledes interessant vil det være, hvis bedre data vil kunne nuancere, i hvilke tilfælde reboundeffekten er stor, og i hvilke situationer reboundeffekten er lille. Er reboundeffekten fx størst ved isolering af boligens klimaskærm eller ved forbedring af centralvarmeanlæg. Denne type mere detaljerede beregninger er ikke med i undersøgelsen.

## Andre studier

I litteraturen er der fundet reboundeffekter med vidt forskellig størrelsesorden, fra 0 til over 100 procent. Man kan derfor ikke sige, om den reboundeffekt vi finder, er på linje med andre studier.

Det tidligere studie, der ligner dette mest, er en hollandsk undersøgelse af energiforbrug i boliger<sup>2</sup>. I den undersøgelse findes en reboundeffekt svarende til en *elasticitet* på 0,27. Det vil sige, at hvis det teknisk beregnede energibehov falder 10 procent, så falder det faktiske energiforbrug med 7,3 procent, og de resterende 2,7 procent udnytter beboerne til bedre komfort. Resultaterne i de to dots ovenfor er angivet i absolutte kWh og ikke i elasticiteter, og kan derfor ikke umiddelbart sammenlignes med de 0,27. Omregnes de to tal ovenfor fås elasticiteter på hhv. 0,17 og 0,52, dvs. et spænd, der omfatter det hollandske studie (se kapitel 7).

### **Rapportens opbygning**

Kapitel 2 beskriver teorien bag reboundeffekten, i kapitel 3 refereres et par andre undersøgelser om reboundeffekten. I kapitel 4 beskrives data, og i kapitel 5 beskrives estimationsmetoden.

Kapitel 6-8 er hovedkapitlerne, som kortfattet beskriver resultaterne og konkluderer. Resultaterne for fjernvarme, naturgas og olie forklares i kapitel 6, og i kapitel 7 indregnes supplerende varme (og en bestemt del af elforbruget). I kapitel 8 er konklusion.

Der er udarbejdet fire tekniske bilag til sidst i rapporten.

---

<sup>2</sup> Aydin, Erdal, Nils Kok, Dirk Brounen (2014): ” Energy Efficiency and Household Behavior: The Rebound Effect in the Residential Sector”

## 2. Teori

Afsnit 2.1 forklarer meget kort rebound. Afsnit 2.2 kan læses, hvis man ønsker lidt mere teknisk-økonomisk forklaring.

### 2.1. Kort om teorien

Reboundeffekten har en økonomisk fortolkning. Hypotesen er, at husholdninger har nytte af en "energitjeneste", og ikke direkte af faktisk energiforbrug eller energistandard. For biler kan energitjenesten være antal kørte kilometer. Antallet af kørte kilometer findes som det faktiske benzinforsøg gange bilens energistandard målt som kilometer pr. liter. For boliger kan energitjenesten være indendørstemperaturen, der kan findes som det faktiske energiforsøg gange energistandarden målt som, hvor mange grader man kan varme op i et hus for en given mængde energi. Energijtenesten kunne også være det opvarmede areal, der kan findes det faktiske energiforsøg gange energistandarden målt som antallet af kvadratmeter, der kan opvarmes med en given energimængde. Det er den rent tekniske beskrivelse.

Det økonomiske aspekt kommer ind fordi, **energitjenesten er billigere desto højere energistandarden er**. Det er billigere at køre en kilometer i en lille, ny, energieffektiv bil end i en stor, gammel, benzinslugende bil, og det vil i sig selv trække i retning af, at der køres mere i den første. På samme måde er det billigere at varme et nyt, velisoleret hus op end et gammelt, utæt hus. Det vil i sig selv trække i retning af, at det nye hus varmes mere op.

Hvis energistandarden i en bolig stiger 10 procent, har det derfor to effekter, nemlig ..

- .. en umiddelbar "teknisk" effekt på energiforsøget på minus 10 procent,

så forbrugeren kan holde energitjenesten konstant, og ..

- .. en modgående prisseffekt, fordi energitjenesten (fx indendørstemperaturen) bliver billigere.

Det er prisseffekten, der er reboundeffekten. I næste afsnit og i bilag 1 er det uddybet.

### 2.2. Husholdninger og deres valg

I afsnittet gives en økonomisk-teoretisk fortolkning af reboundeffekten. Den økonomisk-teoretiske tolkning er uddybet i bilag 1.

Den grundlæggende tanke er, at husejere vælger mellem, hvor mange penge de vil bruge på at købe energi til opvarmning, og hvor meget de vil bruge på, at huset har en god energistandard i forhold til, hvor meget de vil bruge på alle mulige andre varer.

Husejerne har hverken direkte nytte af energi eller energistandard, men derimod af den "energitjeneste", fx indendørstemperaturen, der er resultatet af kombinationen af energiforsøg og energistandard.



Den mest simple, men langt hen ad vejen også realistiske, måde, som energitjenesten,  $h$ , kan skrives på, er som produktet af energiforbrug,  $e$ , og energistandard,  $s$ , dvs.

$$1) \quad h = e \cdot s$$

Hvis energistandarden,  $s$ , på huset er givet, medfører 1), at husejeren vælger mellem energi,  $e$ , og andre varer ud fra denne energistandard og prisen på energi,  $p_e$ , på en måde, så det er netop forholdet mellem pris og energistandard, der er relevant (se bilag 1), dvs.

$$2) \quad e = \frac{1}{s} f\left(\frac{p_e}{s}\right)$$

Forholdet  $\frac{p_e}{s}$  er prisen for energitjenester, og  $f$  er en aftagende (energiefterspørgsels-)funktion. Når 1) og 2) gælder, fås:

Hvis  $s$  stiger 10 procent, har det ...

- .. umiddelbar effekt på energiforbruget på minus 10 procent gennem 1) og leddet  $\frac{1}{s}$  i 2)

idet forbrugeren så kan holde energitjenesten konstant, og ..

- .. en priseeffekt på energiforbruget gennem leddet  $f\left(\frac{p_e}{s}\right)$  i 2), der har samme størrelse (men modsat fortegn) som en 10 procents energiprisstigning (en stigning i  $p_e$ ). Det er reboundeffekten.

Det sidste er vigtigt, for kender man således den ene af pris- eller reboundeffekten på det faktiske forbrug, vil man også kunne udlede den anden effekt.<sup>3</sup> I den såkaldte EMMA-model er priseffekten for energiforbrug fx estimeret således, at en 10 procents prisstigning medfører omtrent 3 procents fald i energiforbruget til opvarmning i boliger. Hvis reboundeffekten skulle udledes herfra, er den tilsvarende 3 procent, og man kan således udlede, at hvis en bygnings tekniske energibehov falder med 10 procent, falder det faktiske forbrug med 7 procent.

Der findes i hvert fald ét godt argument for, at der også kan tænkes ”modsatte” reboundeffekter, dvs. at forbedringer i det tekniske målte energibehov medfører, at det faktiske energiforbrug falder endnu mere, end behovet tilsiger: Den velvære, som boligejere vil føle, afhænger ikke kun af indendørstemperaturen, men også af træk og stråling fra ydervægge, der er koldere end længere inde i huset. I et velisoleret hus vil ydervæggene ikke være særligt kolde, og den lokale diskomfort vil være mindre. Det kan medføre, at husejeren i et velisoleret hus kan have det komfortabelt med en lavere indendørstemperatur, end hvis han havde boet i et mindre velisoleret hus. I det dårlig isolerede hus kompenserer ejeren for ubehaget ved træk ved at skrue op for indendørstemperaturen.

---

<sup>3</sup> Linn (2013) finder, at der er væsentlig forskel på priseffekten og effekten fra energistandard. Se “The Rebound Effect for Passenger Vehicles”, Resources for the future, <http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-DP-13-19.pdf>

## Energimærke og energistandard

I denne boks er det vist, at den simple teori ovenfor stemmer godt overens med, hvordan energistandarden og energibehovet rent faktisk er udformet i energimærket – i hvert fald når der ses på en forsimplet udgave af energimærket.

I den empiriske undersøgelse bruges energimærket som mål for husenes (reciprokke) energistandard. Energimærket angiver et teknisk beregnet energibehov, som kræves for at varme huset op til 20 grader med et standardiseret forbrug af varmt brugsvand og med en standardiseret varmeafgivelse fra elapparater og beboere.

Det største energibehov går til at modsvare energitabet gennem bygningens ydervægge, døre o.l. Dette tab beregnes især med en såkaldt U-værdi, der måles som følger

$$i) \quad U = \frac{e_b}{T \cdot A \cdot V}$$

hvor  $e_b$  er energibehovet,  $T$  er forskellen på indendørs- og udendørstemperaturen,  $A$  er areal af ydervægge mv. og  $V$  er den periode, der opvarmes i. Energimærkekonsulenten, der beregner en bygnings energimærke, måler  $U$  ved at vurdere væggenes energitab, og væggenes areal  $A$ , og antager standardiserede værdier for indendørstemperatur og opvarmningsperiode,  $T$  og  $V$ . Store bogstaver angiver værdier fra energimærkekonsulenten. Ud fra disse værdier beregnes bygningens energibehov,  $e_b$ .

i) kan skrives som

$$i') \quad e_b = U \cdot (T \cdot A \cdot V)$$

dvs. at energibehovet er proportionalt med bygningens U-værdi, indendørstemperatur, areal og opvarmningsperiode.

Det faktiske energiforbrug,  $e$ , kan skrives som i') dog med de faktiske værdier for fx indendørstemperatur. De faktiske værdier skrives med små bogstaver

$$ii) \quad e = U \cdot (t \cdot a \cdot v)$$

Energitjenesten,  $h$ , kan betragtes som  $(t \cdot a \cdot v)$ , dvs. den nytte, som husejeren får af produktet af indendørstemperaturen, det opvarmede areal, og den periode, bygningen opvarmes, kan tjenesten skrives som

$$iii) \quad h = (t \cdot a \cdot v) = \frac{1}{U} e$$

Det viser, at formlen i 1) stemmer, når energistandarden forstås som  $s = \frac{1}{U}$ .

Ligning iii) viser, at hvis man øger energiforbruget,  $e$ , med 10 procent for et hus med bestemt energistandard,  $s$ , får man enten ...

- .. 10 procent højere temperatur
- .. 10 procent større areal kan opvarmes
- .. 10 procent længere opvarmningsperiode

.. eller en kombination heraf.

I praksis er der selvfølgelig store simplificeringer i iii). For eksempel kan man ikke halvere energiforbruget ved at lukke radiatorerne i halvdelen af huset. Temperaturen vil ikke falde til udendørstemperaturen i disse rum, fordi isoleringen mellem husets indre rum er langt ringere end isoleringen af ydermurene. Man kan heller ikke halvere energiforbruget, ved at slukke for varmen i 12 af døgnet 24 timer. Det skyldes bl.a., at det er særlig energikrævende at varme huset op frem for blot at holde en konstant temperatur.

I sagens natur kan man heller ikke opvarme huset mere end 24 timer i døgnet, og man vil heller ikke holde højere temperatur end, hvad der er den mest behagelige temperatur.

### **Simultanitetsproblemet**

Modellen bag ligning 1) og 2) er problematisk i de statistiske analyser af især en væsentlig grund: Det er antages i 2), at energistandarden  $s$  er givet for den enkelte husholdning. Sådan er det ikke i virkeligheden. Husejere renoverer jo deres huse bl.a. for at energiforbedre huset. Og når de køber hus, vil  $s$  være en blandt flere faktorer, der har betydning for hushandlen. Man kan gå til det modsatte ekstrem og forestille sig, at husejere helt frit (simultant/samtidigt) kan vælge  $s$  og  $e$  på samme måde, som man vælger varer i et velassorteret supermarked. Det medfører to ting:

- Hvis man sammenligner huse købt af husstande med forskellige ønsker til energistandarden,  $h$ , finder man, at der vil være en positiv korrelation mellem  $s$  og  $e$ , dvs. modsat af ligning 1). Det skyldes, at husholdninger med stort varmebehov både vil købe energieffektive huse (højt  $s$ ) og bruge meget energi (høj  $e$ ). (Se økonomisk-teknisk beskrivelse i bilag 1.) For bilkørsel er det naturligt, at bilister med stort kørselsbehov både køber biler med god energistandard og køber meget benzin.
- Spørgsmålet, der motiverer denne undersøgelse, nemlig ”hvad sker der med energiforbruget, når energistandarden stiger?” bliver ikke meningsfyldt, hvis det forstås for firkantet. Energistandarden stiger nemlig ikke bare ”af sig selv”, men som resultat af noget andet, fx ændret indkomst, tekniske fremskridt eller tilskud til energirenoveringer.

Punkt 1 betyder, at det i estimationerne nedenfor er potentielt vigtigt at tage højde for fx indkomst eller alder, der kunne være faktorer, der påvirker beboernes varmebehov og -ønsker. Punkt 2 betyder, at det ideelt set kan være mere interessant at gå et skridt tilbage og spørge, hvor meget energiforbruget og energistandarden ændres ved konkrete hændelser som fx stigende indkomst, teknologiske fremskridt eller tilskud til energibesparelser.

Simultanitetsproblemet er diskuteret yderligere i bilag 1, der er økonomisk-teknisk skrevet.

### 3. Litteratur

Reboundeffekten<sup>4</sup> er søgt kvantificeret i mange studier, for flere forskellige ”varer”, på mange forskellige typer datagrundlag og med mange forskellige statistiske metoder. Det mest undersøgte områder er bilkørsler, og det næstmest undersøgte område er energiforbrug til opvarmning. I dette kapitel er kun gennemgået få studier. Formålet er at sætte metode og resultater fra denne rapport i relation til tidligere studier. Et mere omfattende survey findes i Sorrel m.fl. (2009)<sup>5</sup>.

Aydin m.fl. (2014)<sup>6</sup> er et hollandsk studie om energi til opvarmning, der minder meget om nærværende rapport, og det er den artikel, der relateres mest til efterfølgende. Linn (2013)<sup>7</sup> og Davis (2007)<sup>8</sup> undersøger henholdsvis bilkørsel og brug af vaskemaskiner. De er medtaget for at sætte denne rapport i perspektiv, selv om metode og problemer er lidt anderledes for andre ”varer” end huse.

Gram-Hansen og Rhiger Hansen (2016)<sup>9</sup> har for nyligt undersøgt emnet for danske parcelhuse med samme type data for energiforbrug og energimærker som anvendt i denne rapport. De finder resultater, der er sammenlignelige med resultaterne i denne rapport, selv om der i undersøgelsen ikke kontrolleres for andre bygningsforhold eller socioøkonomiske forhold.

#### Data anvendt i tidligere studier

Nogle studier er baseret på aggregerede tidsserier, fremfor oplysninger om fx forbrug og effektivitet for individuelle boliger som i denne rapport. Aggregerede tidsserier er nok sjældent bedre end oplysninger for individuelle husholdninger og bygninger.

Nogle studier har ikke direkte adgang til oplysninger om effektivitet, men identificerer reboundeffekten gennem priseffekten ud fra princippet i ligning 2). Det er naturligvis en simplificerende antagelse, fordi det antages, at reboundeffekten er en slags priseffekt. Linn (2013) viser, at det modsatte kan være tilfældet.

Nogle studier har ikke adgang til oplysninger om energiforbrug, men i stedet til oplysninger om energitjenesten. Det er særligt brugt i amerikanske studier om bilkørsel, hvor mange husholdninger er spurgt, hvor mange kilometer de kører i bil.

---

<sup>4</sup> I litteraturen kan ordet ”rebound” bruges i flere betydninger. I denne rapport menes, hvad der nogle andre steder kaldes den direkte reboundeffekt, dvs. den konkrete effekt af energieffektivitet knyttet til brugen af den undersøgte type ”vare” (her et hus). I litteraturen bruges nogle gange et videre begreb, der omfatter effekten af den samlede ændring i fx forbrugernes forbrug, ved ændring af en vares effektivitet.

<sup>5</sup> Sorrel, Steve, John Dimitropoulos, Matt Sommerville (2009): “Empirical estimates of the direct rebound effect: A review”, Energy Policy 37.

<sup>6</sup> Aydin, Erdal, Nils Kok, Dirk Brounen (2014): ” Energy Efficiency and Household Behavior: The Rebound Effect in the Residential Sector” , [http://cgemp.dauphine.fr/fileadmin/mediatheque/centres/cgemp/presentations/Papier\\_de\\_Erdal\\_AYDIN.pdf](http://cgemp.dauphine.fr/fileadmin/mediatheque/centres/cgemp/presentations/Papier_de_Erdal_AYDIN.pdf)

<sup>7</sup> Joshua Linn (2013): “The Rebound Effect for Passenger Vehicles”, Resources for the future, <http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-DP-13-19.pdf>

<sup>8</sup> Lucas Davis (2007): “Durable goods and residential demand for energy and water: Evidence from a field trial”, <http://faculty.haas.berkeley.edu/ldavis/cw.pdf>

<sup>9</sup> Kirsten Gram-Hansen og Anders Rhiger Hansen (2016): ”Forskellen mellem målt og beregnet energiforbrug til opvarmning af parcelhuse”, Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, SBI 2016:09.

Sammenlignet med disse brugte data, er data i denne rapport gode i den forstand, at der er data for energiforbrug og effektivitet på individniveau. Det ville have været endnu bedre, hvis der også havde været data for energitjenesten, fx målinger af indendørstemperatur. Aydin m.fl. (2014) har en fordel fremfor dette studie, nemlig at der er adgang til data over flere år.

### **Metoder i tidligere studier**

Det måske mest centrale metodeproblem i mange studier skyldes, er simultanitetsproblemet, se slutningen af kapitel 2.

For boliger kunne man forestille sig, at fx ældre forfrosne borgere i virkelighedens verden både ville vælge et velisoleret hus, og ville vælge at skrue højt op for varmen. Hvis der ikke tages højde for den type simultanitet, vil den estimerede sammenhæng mellem energibehov og forbrug blive for svag og den estimerede reboundeffekt for høj.

I nogle af estimationerne for bilkørslen tages der højde for dette. I Linn (2013) bruges benzinprisen på bilkøbstidspunktet til at forudsige den købte bils energieffektivitet. Det er potentielt en god metode, da benzinprisen på bilkøbstidspunktet er uafhængigt af, hvilke husholdninger der er køber særligt energieffektive biler. Det viser sig også, at den estimerede reboundeffekt påvirkes en del af, at der anvendes denne metode. I Davis (2007) undgås problemet, fordi brugshyppigheden af vaskemaskiner observeres før og efter husholdningerne får foræret en meget effektiv vaskemaskine, dvs. der er tale om et kontrolleret eksperiment. I Aydin m.fl. (2014) udnyttes, at der er data for en række husholdninger på forskellige tidspunkter, hvor husholdningerne har boet i to forskellige boliger. Dermed antages, at husholdningens præferencer for energitjenester er konstant, og årsagsvirkningsproblemet undgås. På den anden side kunne man indvende, at hvis valget af energistandard er frit, betyder husholdningens valg af en ny bolig med fx bedre energistandard måske også, at husholdningen netop har fået behov for højere energitjeneste. Det er af praktiske grunde (mangel på data), at der ikke er foretaget denne type dynamisk undersøgelse i nærværende studie, men selv om der havde været adgang til data for en længere årrække, er nytten af disse flere data således diskutabel.

### **Resultater fra tidligere studier**

Set bredt over litteraturen, varierer effekterne overordentlig meget, også inden for undersøgelse af samme vare. I Sorrel m.fl. (2009) varierer de fundne reboundeffekter fra elasticiteter<sup>10</sup> 3 til 87 procent for bilkørsel og fra 0,6 til 60 procent for opvarmning. I Aydin m.fl. (2014), der som nævnt ligner dette studie mest, er reboundeffekten 47 procent i den estimationstype, der ligner denne rapport mest. I en estimation, hvor det dynamiske aspekt medtages, er reboundeffekten væsentligt mindre, nemlig 27 procent. Endnu et studie på hollandske data, Majcen m.fl. (2013)<sup>11</sup>, viser store

---

<sup>10</sup> Resultaterne i litteraturen angives typisk som elasticiteter, dvs. reboundeffekten opgøres som procentvise ændringer i energitjenesteforbruget som funktion af en procentvis ændring i energieffektiviteten. I denne rapport angives resultaterne i hovedteksten som kWh-ændringer i forbrug som funktion af kWh-ændringer i behov. I kapitel 7 regnes i elasticiteter, så der kan sammenlignes med den tidligere litteratur.

<sup>11</sup> Majcen, Dasa, Henk Visscher og Laure Itard (2013): "Energy labels in Dutch dwellings their actual energy consumption and implications for reduction targets", Eceee Summer Study Proceedings, <http://proceedings.eceee.org/visabstrakt.php?event=3&doc=7-043-13>

reboundeffekter. Effekterne er primært vist grafisk, og der er ikke foretaget kontrol for andre faktorer, så reboundeffekten er meget simpelt vist.

## 4. Data

Energiforbruget for 2012 sammenlignes for parcelhuse med forskellig energistandard, dvs. der er tale om en tværsnitsundersøgelse.

Den afhængige variabel er således det faktiske energiforbrug. Forbruget er målt for fjernvarme, naturgas og olie, og oplysningerne stammer fra energileverandører, der har registreret, på hvilke adresser der leveres energi, hvor meget der leveres og hvornår. Adresserne svarer til placeringen af fjernvarme- og naturgasmåleres eller olietankes placering.

Den centrale uafhængige variabel er det teknisk beregnede energibehov. Det teknisk beregnede energibehov er målt gennem energimærker på parcelhuse. Huse skal energimærkes, når de skal sælges, og det er derfor langt fra alle huse, der er energimærket.

En række andre uafhængige (kontrol-)variabler inddrages. De er primært med i analysen for at øge sandsynligheden for, at der findes en kausal sammenhæng mellem det tekniske beregnede energibehov og det faktiske energiforbrug. For hvert parcelhus findes en lang række tekniske oplysninger fra BBR. Det gælder fx huset størrelse og opførelsesår. Fra Danmarks Statistiks registre findes oplysninger om beboerforhold, fx antal beboere, og alderen på beboerne, samt uddannelse og indkomstforhold.

Fra tilstandsrapporter findes indikationer på huset generelle tilstand. Endelig benyttes en enkelt geografisk oplysning og oplysninger om, hvilken kommunen huset ligger i.

Der er kun adgang til oplysninger om forbrug af fjernvarme, naturgas og olie på husholdningsniveau (adresseniveau), og dermed kan undersøgelsen kun laves for disse energiarter, mens reboundeffekten kræver oplysninger om forbrug af alle energiarter. Den vigtigste ikke-målte energiart er brænde som supplement til de tre målte energiarter. Der er temmelig gode skøn for det samlede forbrug af brænde i landet. Derudover findes nogle indikationer af, at brænde bruges mere i ældre bygninger end i yngre og dermed relativt meget i bygninger med ringe energistandard. Det forsøges derfor også at vurdere reboundeffekten, når der tages højde for det samlede brændeforbrug. Se nærmere i kapitel 7.

Beskrivende statistik for energiforbrug er vist i tabel 1 nedenfor. Et særlig vigtigt formål med den beskrivende statistik er at udelukke huse med utroværdige observationer af det faktiske energiforbrug. Utroværdige observationer af energiforbrug kan skyldes, at energiforbrugene er knyttet til forkerte bygninger (se bilag 2). Det er derfor nødvendigt at sortere bygninger med meget store eller meget små forbrug fra. Det oplagt problematisk at sortere datasættet ud fra den afhængige variabel på denne måde, fordi man derved direkte kan påvirke estimatet af den centrale parameter. Der foretages derfor følsomhedsanalyser for denne sortering i kapitel 6 og bilag 4.

Tabel 1, første række, viser en meget markant variation i de faktiske energiforbrug med tydeligt fejlagtige data: Det gennemsnitlige faktiske energiforbrug er 167 kWh pr. m<sup>2</sup> for 2012, hvilket godt kan opvarme et almindeligt hus til en behagelig temperatur. Det maksimale energiforbrug er 138348 kWh pr. m<sup>2</sup>, hvilket er fuldkommen utroværdigt, og det minimale forbrug er næsten nul, hvilket

måske godt kan forekomme, men kun hvis huset har stået tomt. 99-procentsfraktilen er også utroværdigt høj, mens 1-procentsfraktilen faktisk kunne forekomme for visse helt nye og topisolerede huse, og ikke for 1 procent af de eksisterende huse (slet ikke i 2012, fordi der kun var få huse opført med energimærke A før det år).

Forbrugstallene gælder for 2012. Boliger, der er solgt omkring 2012, kan have stået tomme i en del af 2012, og varmekonsumet har derfor måske ikke været normalt. Hvis boliger solgt i 2011, 2012 og 2013 udelukkes, er samlet som i anden række.

**Tabel 1. Beskrivende statistik for alle parcelhuse, der er energimærket, og hvor der er forbrugsoplysninger, opført fra 1900.**

Sample	Variabel	N	Gns.	Std. afv.	Fraktil						Min.	Max.
					1 %	5 %	10 %	90 %	95 %	99 %		
.. opført fra 1900	Forbrug, kWh/m <sup>2</sup>	92.548	167	1.073	27	54	69	208	247	514	0,01	138.348
.. og yderligere solgt før 2011 eller efter 2013	Forbrug, kWh/m <sup>2</sup>	65.752	178	1.249	30	57	70	212	254	719	0,03	138.348

Ud fra tabel 1 vælges i hovedestimationerne fremover at se på boliger med et forbrug på mellem 50 og 350 kWh pr. m<sup>2</sup>. Godt 50 huse med A-mærke opført før 2007 er udeladt. For mange af husene var energiforbruget meget højt set i forhold til A-mærket. I tabel 2 er nogle af de anvendte data vist.

**Tabel 2. Beskrivende statistik for alle parcelhuse, der er energimærket, og hvor der er forbrugsoplysninger, opført fra 1900, som er solgt før 2011 eller efter 2013, og med forbrug mellem 50 og 350 kWh pr. m<sup>2</sup>**

Variabel	N	Gns.	Std. afv.	5 %	50 %	95 %
Forbrug, kWh/m <sup>2</sup>	61.849	135	52	66	127	234
Teknisk behov, kWh/m <sup>2</sup>	61.849	197	63	85	184	304
Boligareal, m <sup>2</sup>	61.849	146	43	90	140	220

Det faktiske forbrug af fjernvarme, naturgas og olie er gennemsnitligt noget lavere end det teknisk beregnede energibehov (135 kWh mod 197 kWh).

I mange af estimationstabellerne i bilag 4 beregnes ændringen i forbruget ved en enheds ændring i behovet ud fra en gennemsnitlig bolig med et behov på 200 kWh og et areal på 145. I nogle beregninger bruges det gennemsnitlige forbrug på 135 kWh pr. m<sup>2</sup>.

I bilag 3 er beskrivende statistik for alle de anvendte variabler vist, og i bilag 2 er fire af de vigtigste variabler beskrevet. (Nemlig de tre variabler i tabel 2 og BBR-oplysningen om supplerende varme.)



## 5. Estimationsmetode

Kapitlet er en smule teknisk, og er primært målrettet læsere med økonomisk og/eller statistisk erfaring. I øvrigt står der lidt mere om metoden i bilag 4. Resultaterne i næste afsnit kan læses uden dette afsnit.

Der estimeres en funktion for det faktiske energiforbrug,  $e$ , i husholdning  $i$  i 2012 som forenklet kan skrives

$$3) \quad e_i = \beta b_i + \gamma x_i + \varepsilon_i$$

Hvor  $b$  er det teknisk beregnede energibehov,  $x$  angiver kontrolvariabler,  $\beta$  og  $\gamma$  er parametre, der bliver estimeret, og  $\varepsilon$  angiver den del af det faktiske energiforbrug, der ikke kan forklares med de brugte variabler. Den centrale parameter er  $\beta$ , der angiver sammenhængen mellem teknisk beregnede energibehov og det faktiske energiforbrug.

Energiforbruget og behovet vil blive målt i kWh pr. år pr. kvadratmeter (opvarmet) bygningsareal.

Fortolkning af  $\beta$  er:

- Hvis behovet stiger 1 kWh pr. m<sup>2</sup>, stiger forbruget  $\beta$  kWh pr. m<sup>2</sup>. Reboundeffekten er derfor  $1 - \beta$  kWh pr. m<sup>2</sup>, det vil sige forskellen på den tekniske 1-til-1 effekt den beregnede sammenhæng mellem det teknisk beregnede energibehov,  $b$ , og det faktiske energiforbrug. I afslutningen af rapporten beregnes reboundeffekten i elasticiteter, så det kan sammenlignes med tidligere litteratur.

Ligning 3) estimeres ad flere omgange:

- Gruppen af husstande, der ses på, varieres.
- Forskellige kontrolvariabler indgår for at undersøge, hvilken effekt de har på estimatet af  $\beta$ .
- Energiforbruget kan være målt forkert via energimærkerne, hvilket vil føre til undervurdering af  $\beta$ . Under visse forudsætninger kan det forhindre ved statistisk at forudsige energibehovet ud fra bygningens opførelsesår (estimation ved brug af instrumentmetoden), således at det er den forudsagte værdi for behovet, der indgår i 3). Instrumentmetoden kan under visse betingelser også løse simultanitetsproblemet, jf. slutningen af kapitel 2.
- I rapporten har kontrolvariablerne typisk ingen selvstændig interesse. Det vil fx ikke blive vist, hvordan husstandsindkomsten påvirker det faktiske energiforbrug. Imidlertid giver det god teoretisk mening, at reboundeffekten er større, hvis nogle forhold gør sig gældende. For eksempel bliver det senere forklaret, at reboundeffekten kan være større, hvis der er kælder i bygningen. For at fange sådanne effekter indgår kombinationer af energibehovet,  $b$ , og disse forhold,  $z$ , i 3), således at ligningen bliver  $e_i = \beta b_i + \gamma x_i + \beta^x z_i b_i + \varepsilon_i$ . Hvis  $z$  er en 0-1-variabel og forekommer, er reboundeffekten  $1 - \beta - \beta^x$ , og hvis  $z$  ikke forekommer, er reboundeffekten  $1 - \beta$ . Hvis der er kælder i bygningen, og hypotesen ovenfor er rigtigt, vil vi estimere  $\beta^x < 0$ , således at reboundeffekten er større i parcelhuse med kælder.

## 6. Resultater for fjernvarme, naturgas og olie

Hovedresultaterne er beskrevet nedenfor, og detaljer er vist i bilag 4.

I den estimation, der vurderes at være den bedste (se tabel B5 i bilag 4), findes at

- Når det teknisk beregnede energibehov falder med 1 kWh pr. m<sup>2</sup>, falder det faktiske energiforbrug af **fjernvarme, naturgas og olie med 0,40 kWh**.

Resultatet er udregnet for et hus af gennemsnitlig størrelse og energiforbrug.

Resultatet betyder **reboundeffekten er 0,60 kWh**, således at denne del af gevinsten ved fald i energibehovet på 1 kWh benyttes til bedre komfort.

I beregningen er der kontrolleret for forskellige oplysninger om beboerne og om bygningens egenskaber. Det betyder, at det er forsøgt at rense den beregnede reboundeffekt for andre faktorer, der kunne være en forklaring på den statisk beregnede reboundeffekt. Hvis fx velhavende både har vælger en høj indendørstemperatur og køber velisolerede boliger, vil det skævvride estimatet på reboundeffekten, *hvis* husstandens indkomst *ikke* var med i beregningen (og derfor er indkomsten med i estimationerne). Der er også taget højde for, at energimærket kan være upræcist.

Samlet set betyder disse metoder, at det er forsøgt at sikre, at reboundeffekten faktisk er en årsagssammenhæng.

Beregningen er desuden foretaget, således at reboundeffekten varierer med forskellige forhold:

- Reboundeffekten er større, desto større huset er.  
Det kan forklares ved, at der i store boliger er bedre muligheder for at vælge, hvor stort areal, der skal opvarmes. Hvis en husholdning fx har et rum, de kun bruger sjældent, er der større chance for, at de lukker for varmen i rummet, hvis rummet er dårligt isoleret og derfor dyrt at varme op.
- Reboundeffekten er også større, hvis der er kælder i boligen. Det kan tolkes på samme måde som for arealet. Der er ikke fundet samme effekt for tagetager.
- Sammenhængen mellem behov og forbrug er mindre for bygninger, hvor der i BBR er registreret, at der er supplerende opvarmning.  
Det kan tolkes som, at det i disse boliger er lettere at substituere fjernvarme, naturgas og olie med supplerende varme, hvis energibehovet stiger. Det er ikke en reboundeffekt, men en substitutionseffekt (det bliver diskuteret nærmere nedenfor).
- Reboundeffekten er større, hvis huset er opvarmet med olie.  
Det stemmer godt overens med tolkningen af reboundeffekten som en priseffekt og med at olie er dyrest. For olieopvarmede huse, vil prisen for god komfort falde særlig meget, når energistandarden stiger.

Der er vist en række estimationer i bilag 4. Estimationerne viser, hvad det betyder for reboundeffekten, at forskellige kontrolvariabler inddrages. Det vigtigste resultat er:

- Det har ikke væsentlig betydning for beregningen af reboundeffekten, at oplysninger om husholdningerne inddrages.
- Det har ikke væsentlig betydning for beregningen af rebound-/substitutionseffekten, at supplerende opvarmning udelades. Det er til dels i modstrid med forklaringen af substitutionseffekten ovenfor (i tredje dot ovenfor).

Først dot peger på, at det ikke er sådan, at særlige husholdninger (fx velhavende) både vælger god energistandard og højt energiforbrug. Det giver grund til at tro, at simultanitetsproblemet (se kapitel 2) er lille, og at den beregnede reboundeffekt faktisk angiver en årsagssammenhæng fra teknisk målt energibehov til faktisk energiforbrug.

Beregningerne er også foretaget på forskelligt sample. Som forklaret ovenfor er husholdninger med ekstreme energiforbrug sorteret fra i estimationerne. Det er kritisk at sortere datasættet ud fra den afhængige variabel, fordi frasorteringen (definitionen af, hvad der er ekstremt), direkte kan påvirke den estimerede reboundeffekt. Beregningen er derfor foretaget med hhv. færre og flere frasorteringer (men åbenlyst utroværdige observationer er fortsat ikke med). Det viser sig, at resultaterne er robuste overfor denne ændringer i samplet. Generelt er hovedresultaterne robuste over forskellige ændringer i samplet (se bilag 4).

## 7. Korrektion for supplerende varmekilder og for el til cirkulationspumper mv.

I beregningerne i foregående kapitel blev det samlede tekniske beregnede energibehov til opvarmning sammenlignet med det faktiske forbrug af fjernvarme, naturgas og olie.

Som mål for reboundeffekten lider foregående kapitel af i hvert fald to væsentlige mangler

- I energibehovet i energimærket indgår el til visse formål
- I forbrugsmålingerne mangler supplerende opvarmning

For at korrigerer for dette burde el trækkes ud af behovet, og supplerende varme burde tillægges forbruget af fjernvarme, naturgas og olie. I kapitlet forsøges at lave nogle grove skøn for sådanne korrektioner.

### El

El til drift af cirkulationspumper og ventilationsanlæg medregnes i energimærket og energibehovet. Det er vurderingen, at langt det meste af dette el bruges til cirkulationspumper. Energiforbruget i cirkulationspumper varierer efter pumpens alder, og derfor må man formode, at elforbruget er størst i ældre boliger, og det vil gennemsnitligt sige boliger med ringest energistandard. I beregningerne antages et forbrug af el til cirkulationspumper på 3,5 kWh pr. m<sup>2</sup> for bygninger med energimærke G og 0,5 kWh pr. m<sup>2</sup> for bygninger med energimærke A med en jævn stigning mellem disse yderpunkter.

Det betyder, at der antages en stigning i elforbruget fra A til G, og dette tillæg trækker i retning af mindre, beregnet reboundeffekt.

### Supplerende varme

Forbruget af brænde til opvarmning er temmelig stort alt i alt.<sup>12</sup> Hvis det antages, at al brændeforbruget bruges i parcelhuse, svarer brændeforbruget til 31 kWh pr. m<sup>2</sup> pr. år. Fra en spørgeskemaundersøgelse blandt ca. 1000 parcelhusejere fås en indikation af, hvor mange og hvilke huse der findes med forskellige supplerende opvarmningskilder. Supplerende opvarmning bruges mest i ældre boliger. Derfor må det forventes, at supplerende opvarmning også bruges mest i huse med ringe energistandard.

Til beregningen vælges nogle "vægte" for forholdet mellem anvendelsen af supplerende opvarmning i bygninger af forskellig energistandard. Vægten er valgt til 0 for energimærke A, B og C, 1 for D, 2 for E, 3 for F og 4 for G. Det betyder, at vi antager, at der i gennemsnit bruges fire gange så meget supplerende opvarmningsenergi i bygninger med energimærke G som D. Det må vurderes at være en ret kraftig sammenhæng mellem energistandard og supplerende opvarmning og dermed en antagelse, der trækker temmelig meget nedad i vurderingen af reboundeffekten. Samtidig

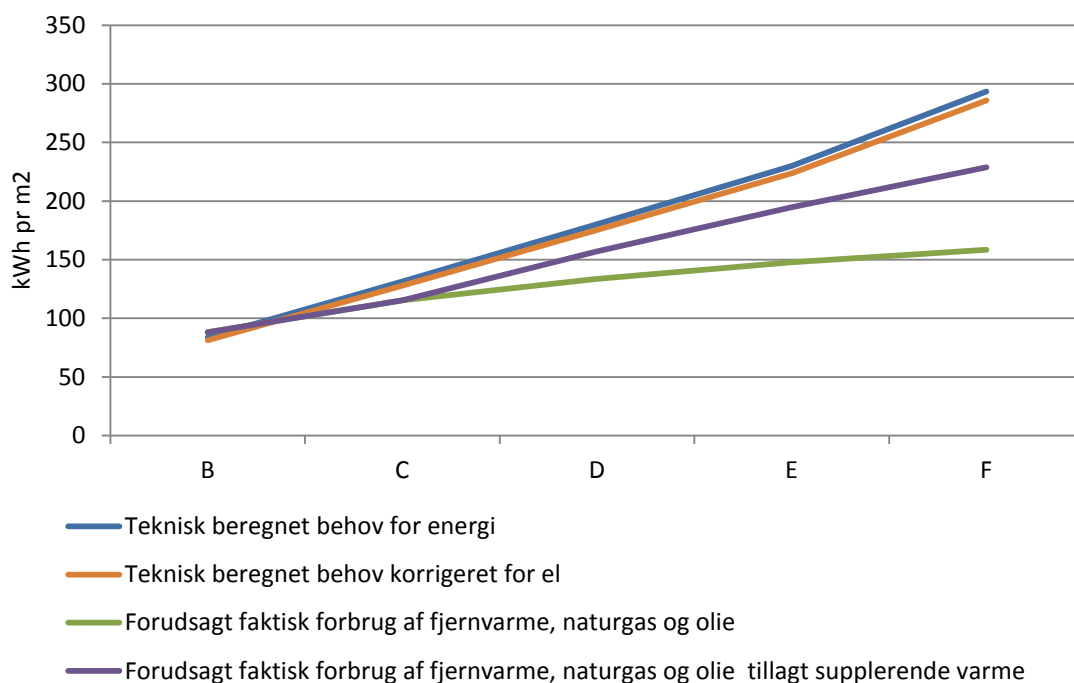
---

<sup>12</sup> Det vides fra Energistyrelsens årlige Energistatistik (<http://www.ens.dk/info/tal-kort/statistik-nogleletal/arlig-energistatistik>, se i Tabeller\_2013.xls, arket om opvarmning), der igen benytter oplysninger fra en spørgeskemaundersøgelse om brændeforbrug, [http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/info/tal-kort/statistik-noegletal/energistatistik-definitioner-metodebeskrivelser/brænde\\_rapport\\_2013.pdf](http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/info/tal-kort/statistik-noegletal/energistatistik-definitioner-metodebeskrivelser/brænde_rapport_2013.pdf).

vælges forbruget af supplerende opvarmning således, at det samlede brændeforbrug – dvs. de 31 kWh nævnt ovenfor – rammes.

Resultatet af korrektionen er vist i figur 1. I figuren viser den blå kurve det teknisk beregnede energibehov inkl. el. Den grønne kurve viser det faktiske forbrug af fjernvarme, naturgas og olie (men ikke supplerende varme). Reboundeffekten ses i figuren som *forskellen på hældningen* i de to kurver. Korrektionen for el gør behovskurven mere flad (den orange kurve), og korrektionen for supplerende opvarmning gør forbrugskurven mere stejl (den lilla kurve). Begge korrektioner trækker i retning af en lavere reboundeffekt. Det ses i figuren ved, at forskellen på hældningen af de to kurver bliver mindre.

**Figur 1. Faktisk energiforbrug og teknisk beregnet energibehov (energimærke) korrigeret for el og supplerende opvarmning**



I tabel 3 er nogle af tallene fra figur 1 vist, og mål for sammenhængen mellem behov og forbrug, og dermed reboundeffekten, er vist. Med korrektionerne bliver reboundeffekten 31 procent, hvor den var ca. 60 procent ud fra den foretrukne estimation i kapitel 6 (og bilag 4).

**Tabel 3. Teknisk beregnet behov for og faktisk forbrug af energi til opvarmning, inkl. supplerende opvarmningskilder**

Energimærke	Korrigeret behov kWh/m <sup>2</sup> /år	Korrigeret forudsagt forbrug kWh/m <sup>2</sup> /år
B	81	88
C	128	115
D	175	157
E	224	195
F	286	229
Ændring B til F	205	141
Ændringer sat i forhold til hinanden		141/205 = 69 procent
Reboundeffekt		31 procent

Korrektionerne er lavet ud fra et ”forsigtighedsprincip”, der trækker i retning af lav, beregnet reboundeffekt. Det er derfor sandsynligt, at reboundeffekterne i tabel 3 er for små.

### Sammenligning med resultater i litteraturen

I litteraturen angives reboundeffekten i ”elasticiteter”, dvs. ud fra to procenttal sat i forhold til hinanden, mens reboundeffekten i tabel 3 er angivet ud fra to absolutte kWh-tal sat i forhold til hinanden. Sammenhængen mellem elasticiteten og målemetoden i tabel 3 er

$$\text{Elasticitet} = \frac{\text{procentvis ændring i forbrug}}{\text{procentvis ændring i behov}} = \frac{\text{abs. ændring i forbrug}}{\text{abs. ændring i behov}} \frac{\text{abs. behov}}{\text{abs. forbrug}}$$

Indsættes tallet 0,69 fra tabel 3, de gennemsnitlige behov fra teksten efter tabel 2 (200) og det gennemsnitlige forbrug (hhv. 200 og 135 kWh pr. m<sup>2</sup> pr. år, se efter tabel 2) inklusive supplerende varme (31) fås

$$\text{Elasticitet} = 0,69 \frac{200}{135 + 31} = 0,83$$

og reboundeffekten er 0,17. Som nævnt er dette et forsigtigt/lavt skøn i den forstand pga. den måde som supplerende varme er tillagt. Hvis resultatet fra fjernvarme, naturgas og olie bruges, fås

$$\text{Elasticitet} = 0,40 \frac{200}{135 + 31} = 0,48$$

og reboundeffekten er 0,52.

Som nævnt fandtes i det studie, der ligner dette mest (Aydin m.fl. (2014), se fodnote 4), en reboundeffekt på 0,27, hvilket altså ligger mellem de to tal, vi netop har fundet. Resultaterne i litteraturen spænder generelt meget vidt, så det er vanskeligt sige, om vores resultater ligger på linje med de fleste andre studier.

## 8. Konklusion og diskussion

Selvom der er flere kilder til usikkerhed i den empiriske undersøgelse, så tyder resultaterne på, at sammenhængen mellem teknisk målt energibehov og faktisk forbrug, ikke er ”en-til-en”, men derimod, at der er en væsentlig reboundeffekt.

Kvalitativt set – at der er en væsentlig reboundeffekt – stemmer resultatet overens med et hollandsk studie om emnet, og også med mange andre studier på området. Visse delresultater, fx at reboundeffekten er stærkest for store huse og huse med relativt dyr energikilde, stemmer godt overens med både ”sund fornuft” og teori om rebound.

Reboundeffekten betyder, at en del af gevinsten ved god energistandard udnyttes til bedre komfort. Det kan ses i lyset af andre undersøgelser<sup>13</sup>, der viser, at der er markante komfortforbedringer ved energirenovering.<sup>14</sup>

Resultaterne kan bruges i forskellige sammenhænge. Man skal dog huske på, at resultaterne er en slags gennemsnitberegninger. De kan derfor ikke forudsige effekten af en konkret husejers energirenovering, fordi der er meget store variationer i energiforbrug fra husholdning til husholdning. Ikke desto mindre kan selve bevidstheden om reboundeffekten være relevant for enkelte aktører, fordi de vil vide, at beregninger foretaget under standardforhold, netop ikke medregner rebound. Banker, der låner ud til husejere, der energirenoverer, skal være opmærksomme på, at husholdningernes energibesparelser ikke nødvendigvis vil svare til beregninger foretaget under standardforhold. Institutioner og organisationer (fx Energistyrelsen), der foretager forudsigelser af energiforbruget, kan forbedre forudsigelserne ved viden om rebound.

Emnet er langt fra undersøgt til bunds med denne undersøgelse. For eksempel kunne det være interessant at undersøge effekten over tid for husstande, der gennemgår renovering. Det kunne også være interessant at undersøge præcist, hvilke bygningsforhold der særligt medfører rebound – er det fx nye vinduer eller mere effektivt centralvarmeanlæg. Endelig vil det i nogle tilfælde være relevant at gå et spadestik dybere og undersøge effekten af de forhold, der får energistandarden til at stige. Relevante forhold kunne være almindelig teknologiske fremskridt, ændrede prisforhold eller direkte regulering. Derved undgår man at tænke på emnet som om, at energistandarden stiger helt af sig selv, men forsøger direkte at undersøge effekten af de forhold, man måtte have i tankerne.

Slutteligt er det værd at huske på, at der givetvis er grænser for reboundeffekten, fordi husejere jo ikke vil varme huset op til højere temperatur end ønskeligt, ikke kan opvarme flere kvadratmeter end husets areal, og ikke mere end 24 timer i døgnet.

---

<sup>13</sup> NIRAS (2015): ”Sammenhængen mellem boligens energistandard og komfort – Interviewundersøgelse”, [http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/dokumenter/side/sammenhaengen\\_mellem\\_boligens\\_energistandard\\_og\\_komfort.pdf](http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/dokumenter/side/sammenhaengen_mellem_boligens_energistandard_og_komfort.pdf)

<sup>14</sup> Sådanne komfortforbedringer kan dog også godt forekomme uden en reboundeffekt, men som en ”sidegevinst” ved renovering, hvor beboeren ikke hæver temperaturen, men fx nyder godt af mindre træk fra vægge og vinduer.

## Bilag 1. Økonomisk teori om reboundeffekten og om simultanitetsproblemet ved estimation af reboundeffekten

Bilag 1 er simpelt, men økonomisk-teoretisk, og der bruges økonomiske udtryk, der ikke gøres meget for at forklare.

Formålet er især at forklare, hvilke observationer man kan forvente i data, hvis husholdningerne i større eller mindre grad kan vælge boligens energistandard frit. Dermed bliver simultanitetsproblemet, jf. kapitel 2, diskuteret dybere.

Bilag 1 viser også, at det ikke nødvendigvis giver mening at stille spørgsmålet ”Hvad sker der med energiforbruget, når energistandarden stiger?”, i hvert fald ikke hvis spørgsmålet opfattes for firkantet.

Der ses først på en situation, hvor husholdningen helt frit kan vælge energiforbrug,  $e$ , og energistandard,  $s$ . Det er ét yderpunkt i opfattelsen af husholdningers valgmuligheder. Det antages dernæst, at energistandarden er helt udefrakommende for husholdninger. Det er det modsatte yderpunkt. Til slut ses på forskellige ”praktiske situationer”, der ligger mellem disse yderpunkter.

### Frit valg af $s$

En husholdning har problemet

$$\begin{aligned} & \text{Maks}_{e,s,c} u(\sqrt{es}, c) \\ & \text{under bibetingelsen} \\ & p_e e + p_s s + c = Y \end{aligned}$$

hvor  $u$  er en nyttefunktion,  $c$  er forbrug af andre varer (som har prisen 1), og  $Y$  er indkomsten målt i  $c$ -enheder. Priserne på energi og ”en enhed energistandard” er hhv.  $p_e$  og  $p_s$ .

Energitjenesten er

$$h = \sqrt{es}$$

Kvadratroden gør beregningerne nedenfor kønner uden at ændre substansen i problemet.

Problemet kan løses i to trin. I første trin tages  $h$  for givet, og husholdningerne vælger den kombination af  $e$  og  $s$ , der minimerer omkostningerne.

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{e,s} p_e e + p_s s \\ & \text{under bibetingelsen} \\ & h = \sqrt{es} \end{aligned}$$



Resultatet er

$$B1) \quad \frac{e}{s} = \frac{p_s}{p_e}, \quad = \sqrt{\frac{p_s}{p_e}} h, \text{ og } s = \sqrt{\frac{p_e}{p_s}} h$$

Man kan definere prisen på enhed energitjeneste (en  $h$ ) som (brug B1))

$$B2) \quad p_h = \frac{p_e e + p_s s}{h} = 2\sqrt{p_e p_s}$$

I andet trin er problemet

$$\text{Maks}_{h,c} u(h, c)$$

under bibetingelsen

$$p_h h + c = Y$$

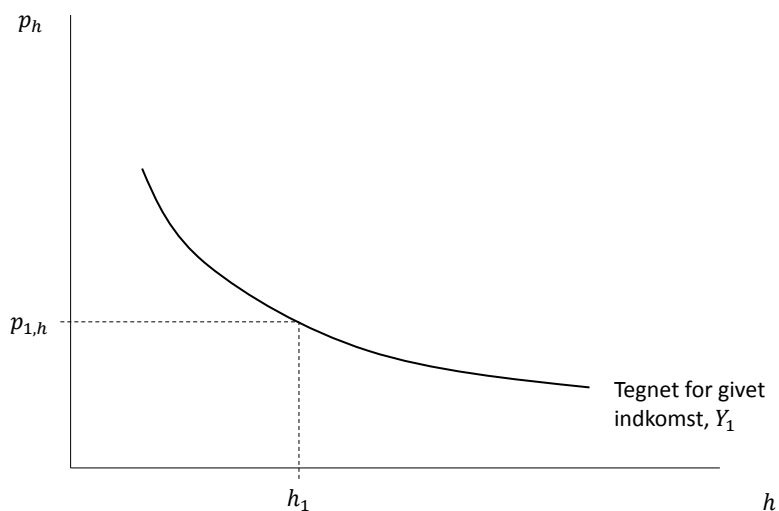
Løsningen er en efterspørgselsfunktion for  $h$

$$h = h(p_h, Y)$$

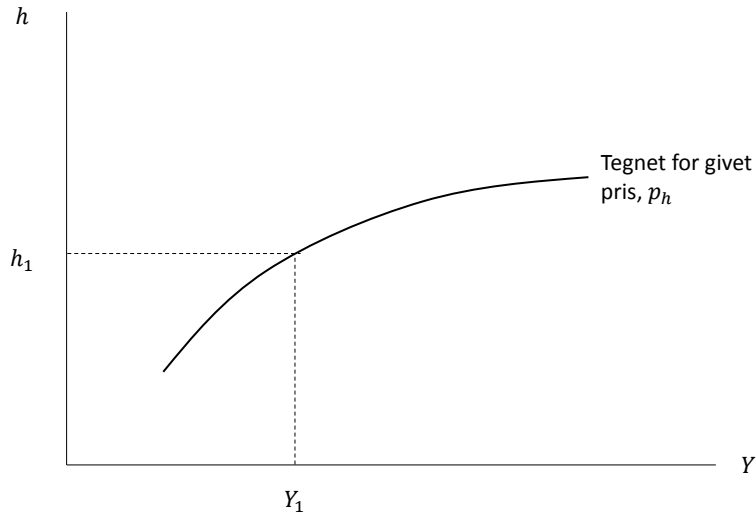
Efterspørgslen illustreres i figur B1 og B2. Efterspørgslen falder i  $p_h$  og stiger i indkomsten,  $Y$ . I figur B3 er det optimale valg af energitjeneste og andre varer,  $c$ , illustreret. Endelig viser figur B4 det optimale valg af  $e$  og  $s$ , givet det optimale valg af  $h$ .

Tilsammen viser figurene, hvordan husholdningerne vælger  $e$ ,  $s$ ,  $h$  og  $c$  som funktion af  $Y$ ,  $p_e$  og  $p_s$ . Symbolerne med fodtegn 1 er konkrete, sammenhængende værdier.

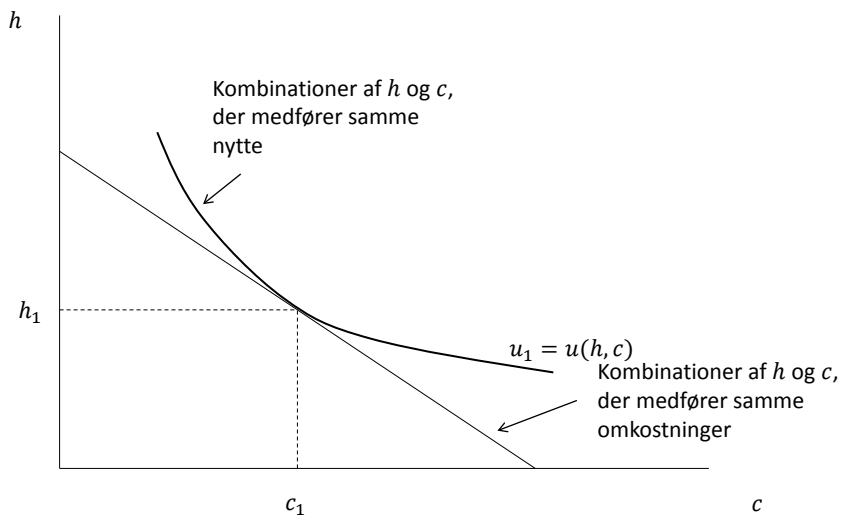
**Figur B1. Efterspørgslen efter energitjeneste som funktion af prisen, for givet indkomst**



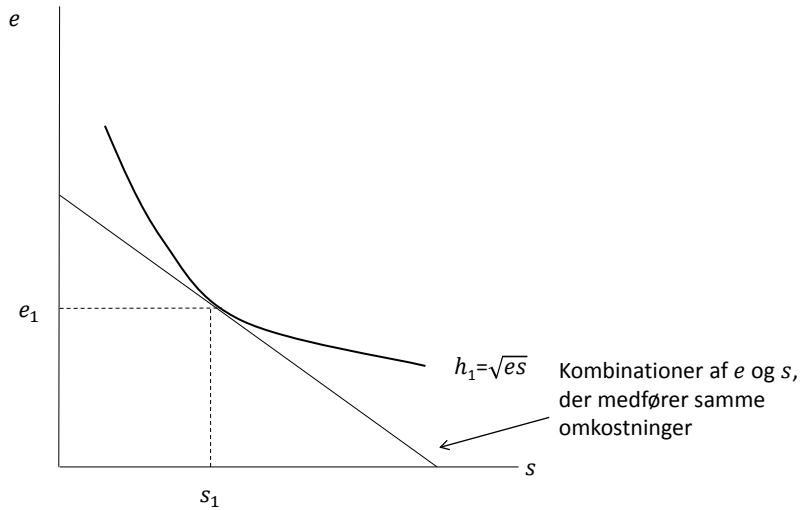
**Figur B2. Efterspørgslen efter energitjeneste som indkomsten, for given pris**



**Figur B3. Optimalt valg af energitjeneste og andre varer**

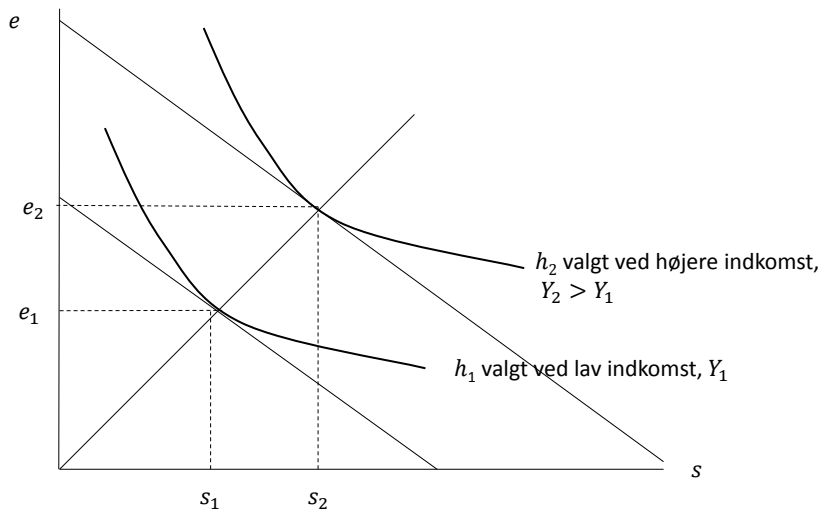


**Figur B4. Optimalt valg af energi og energistandard ved det optimale valg af energitjeneste**



I relation til estimationerne, er det interessante nu at se, hvad der sker, hvis fx indkomsten stiger. Energитjenesten vil stige (figur B2), og i figur B5 er ændringen i det optimale valg af  $e$  og  $s$  vist. Både energiforbrug og energistandard stiger. Det er den modsatte korrelation mellem  $e$  og  $s$  af, hvad den tekniske relation,  $h = \sqrt{es}$ , med given  $h$  forudsiger. Den simultane stigning i  $e$  og  $s$  skyldes, at husholdningen finder det billigst at forbedre energistandard ved at købe lidt mere energi og lidt bedre energistandard.

**Figur B5. Ændring i optimalt valg af energi og energitjeneste ved stigning i indkomst og energitjeneste**



Dette eksempel med frit valg af energi og energistandard viser to ting. Dels at det i nogle tilfælde ikke giver mening at spørge, hvad effekten på  $e$  af en stigning i  $s$  er, for  $s$  stiger ikke som en udefrakommende effekt. Og dels – i den grad spørgsmålet alligevel giver mening – at der i estimationer skal tages højde for fx indkomsteffekter, for ikke at give et skævt billede af reboundeffekten. I estimationerne er der netop taget hensyn til indkomst, men også fx alder, der kan være af betydning for varmebehovet. Endelig vil den anvendte instrumentmetode under visse betingelser kontrollere for ikke-observeret tilbøjelig til at vælge særlig højt eller lavt niveau for energitjeneste.

**s givet udefra og ikke valgt frit**

Husholdningens problem er nu

$$\text{Maks}_{e,c} u(\sqrt{es}, c)$$

under bibetingelsen

$$p_e e + c = Y$$

hvor  $s$  er givet.

Løsningen på husholdningens problem er

$$e = \frac{1}{s} e\left(\frac{p_e}{s}, Y\right)$$

Den samlede omkostning til energitjeneste er

$$C_h = p_e e$$

Husholdningens pris for en ekstra enhed  $h$  bliver (brug  $h = \sqrt{es}$ )

$$B3) \quad \hat{p}_h = \frac{\partial C_h}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial h} = p_e 2 \frac{h}{s}$$

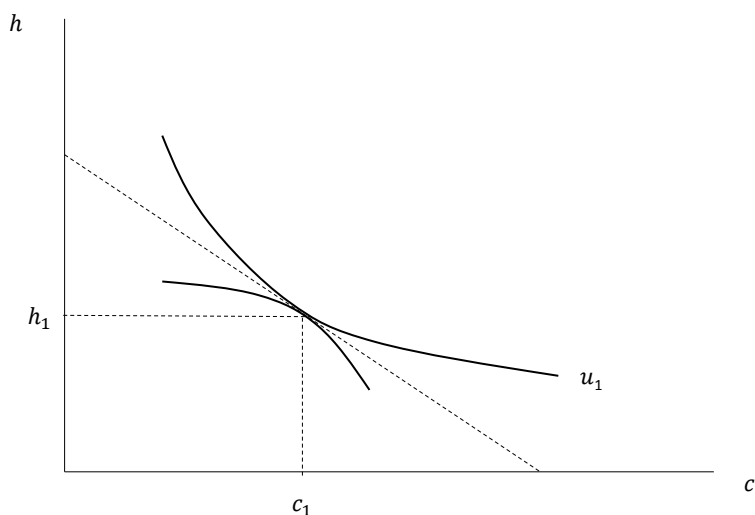
$$\text{dvs. } \frac{\partial \hat{p}_h}{\partial h} > 0, \text{ og } \frac{\partial \hat{p}_h}{\partial s} < 0$$

dvs. energitjenesteprisen stiger i  $h$  og falder i  $s$ . Det vil sige, at en ekstra enhed energitjeneste bliver stadig dyrere, desto større energitjenesten,  $h$ , allerede er, og billigere desto bedre energistandarden er. Hvis  $h$  og  $s$  er valgt frit, gælder (brug B1))

$$B4) \quad \hat{p}_h = p_h$$

Husholdningens optimale valg af  $h$  og  $c$  er vist i figur B6. Isokostkurven er ikke længere en ret linje, men krum (følger af ligning B3)). Den rette, stiplede linje er isokostkurven ved frit valg (kopieret fra figur B3). I figuren er det antaget, at den givne energistandard  $s$  svarer til den, som husholdningen ville vælge, hvis den kunne vælge frit. Derfor tangerer den krumme kurve, den rette, stiplede isokostkurve i optimum, (ligning B4)).

**Figur B6. Optimalt valg af energitjeneste og andre varer, ved given energistandard**

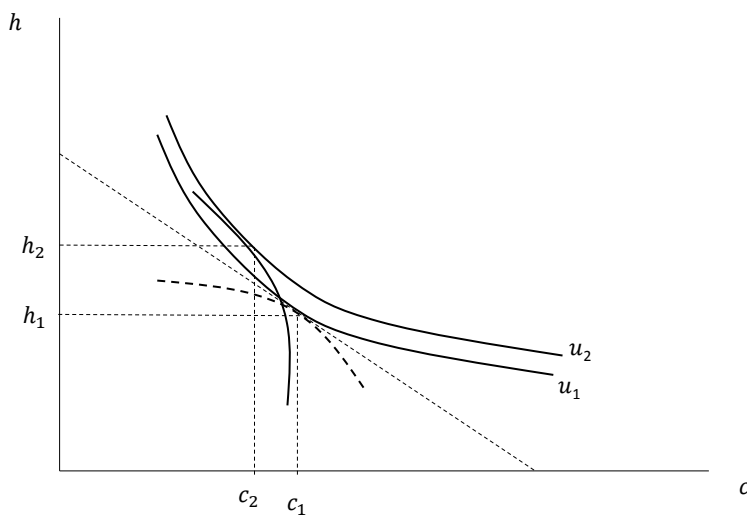


Nu ser vi på tre ”praktiske tilfælde” for, hvordan energistandarden  $s$  kunne ændres i virkeligheden. Formålet er et belyse, hvordan husholdningen teoretisk set ændrer energitjenesten,  $h$ . Dermed kobles ændringer i energistandarden  $s$  med ændringer i energitjenesten  $h$ , hvilket er det centrale i reboundteorien. I alle tre tilfælde er stigninger i  $s$  koblet til stigninger i  $h$ , som reboundteorien forudsiger, men i to af tilfældene er der alligevel modifikationer til den simple version af reboundteorien, hvor  $s$  betragtes som helt udefrakommende.

**Praktisk tilfælde:  $S$  givet udefra, stigning i  $S$  er omkostningsfri**

Det antages, at  $s$  er givet, men på et niveau svarende til det frie valg. Det vil sige som i figur 6. Det antages så, at  $s$  stiger som følge af en udefra kommende hændelse (og uden at indkomsten ændres for husejeren). Eksempel: Vinduer, der skiftes hvert 20 år, bliver teknologisk set ganske enkelt mere energieffektive, uden at omkostningerne til vinduer stiger. Figur B7 illustrerer. Prisen på energitjenester falder (isokostkurven bliver stejlere, jf. ligning B3)), og husholdningen vælger derfor et højere niveau for energitjenesten.

**Figur B7. Ændring i optimalt valg af energitjeneste og andre varer, ved ændring i energistandard**



Det er præcis denne effekt, der tænkes på i hovedteksten, og det tilfælde, hvor reboundeffekten og spørgsmålet om effekten på  $e$  af en ændring i  $s$  giver direkte mest mening.

### Praktisk tilfælde: Frit valg, tilskud til $S$

Hvis en husholdning med frit valg af  $s$  og  $e$  får tilskud ved køb af højere energistandard, vil billedet ligne figur B7. Man vil kunne identificere en reboundeffekt igen. Men det vil være en tilsnigelse, at sige, at effekten på  $e$  af stigninger i  $s$  er så og som meget. For ændringen i  $e$  er egentlig en effekt af *tilskuddet* til  $s$ .

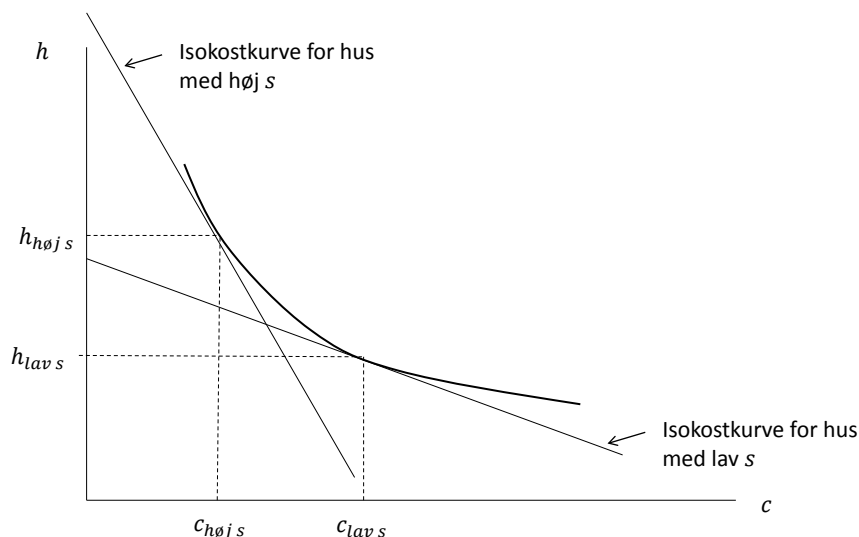
Den lille forskel på tilskudseffekten og effekten i figur B7 er, at med frit valg vil isokostkurven være den rette (stiplede) kurve, som tilskuddet vil ændre (øge) hældningen på.

### Praktisk tilfælde: Frit valg af huse med forskellig energistandard

For de enkelte, konkrete huse, der findes i virkeligheden, er energistandarden langt hen ad vejen givet (hvis man ser bort fra, at ejerne kan energiforbedre husene). Imidlertid er det frit for husholdningerne at vælge, hvilket hus de vil købe, og dermed er der indirekte er vis frihed i valget af  $s$ .

Hvis to huse med forskellig given energistandard kan vælges på markedet, vil prisen på de to huse tilpasse sig således, at husholdningerne får samme nytte ved at købe de to huse. Det er vist i figur B8, hvor isokostkurverne forskydes ved ændrede boligpriser. Figuren viser en kobling mellem energistandard,  $s$ , og energitjenesten,  $h$ , som i reboundteorien. Dog er effekten ikke kun en simpel (rebound-)effekt af stigning i  $s$ . Forskellen på niveauet for energitjenester i figur B8 skyldes, dels at der er forskel på  $s$ , dels en indkomsteffekt som følge af at huset med høj  $s$  er dyrest.

**Figur B8. Forskel på optimalt valg af energitjeneste og andre varer i to forskellige boliger**



## Bilag 2. Mere om de vigtigste variabler

### Behovet for energi

Enfamiliehuse skal energimærkes, når de skal sælges. Energimærket består af en række energirelaterede oplysninger, der er til gavn for dem, der overvejer at købe boligen. Energimærket er beregnet ud fra boligens behov for energi, og behovet er beregnet under standardiserede forhold, dvs. opvarmning til en bestemt temperatur, et bestemt forbrug af varmt brugsvand og en bestemt frigivelse af varme fra beboerne og fra apparater i boligen.

Det tildelte energimærke går fra G til A2020, og sammenhængen med energibehovet er vist i tabel B1.

**Tabel B1. Energimærket for enfamiliehuse**<sup>15</sup>

Mærke	Grænseværdi (KWh/m <sup>2</sup> /år)
A2020	$\leq 20$
A2015	$\leq 30 + 1000/\text{Areal}$
A2010	$\leq 52,5 + 1650/\text{Areal}$
B	$\leq 70 + 2200/\text{Areal}$
C	$\leq 110 + 3200/\text{Areal}$
D	$\leq 150 + 4200/\text{Areal}$
E	$\leq 190 + 5200/\text{Areal}$
F	$\leq 240 + 6500/\text{Areal}$
G	$> 240 + 6500/\text{Areal}$

I beregningerne i dette papir er der taget udgangspunkt i bygningernes energimærke og regnet baglæns til et behov. Behovet for et B-hus er således beregnet som  $70 + 2200$  delt med bygningens boligareal, skønt dette er den øvre grænse. For G-mærkede huse giver beregningen en nedre grænse, så i beregningerne er der derfor reelt ikke forskel på F- og G-mærkede huse.<sup>16</sup>

Energibehovet fra energimærket omfatter elforbrug til cirkulationspumper og ventilation. El til andre apparater som køleskabe og fjernsyn indgår ikke. Dette elforbrug medregnes i det opgjorte energibehov med 2,5 gange det faktiske elforbrug. (El til elpaneler, gulvvarme og varmepumper indgår i det beregnede behov, fordi det er energi til opvarmning.)

### Forbrug af fjernvarme, naturgas og olie

Leverandører af de tre energiarter skal til BBR oplyse, hvor meget energi der er leveret på alle adresser, hvor der faktisk leveres energi. Elleverandører opgør også leverancerne til BBR, men det er først sket sent i dette arbejde, og elforbruget er derfor ikke medtaget.

<sup>15</sup> Se <http://www.maerkdinbygning.dk/materiale/files/materiale-konsulenter/energimarkning/love-og-regler/omregningstabel>

<sup>16</sup> Når behovet ikke direkte er taget fra energimærket, skydes det, at i den administrative database, der henter data fra de udarbejdede energimærker, synes de tilgængelige data ikke altid at være pålidelige. Selve energimærket er med andre ord den mest troværdige kilde til bygningernes energistandard, selv om mærket er lidt grovere mål, fordi det er kategoriseret.



Der er vanskeligt at opgøre forbruget af fjernvarme, naturgas og olie til opvarmning i bestemte bygninger af flere årsager. Den vigtigste er: Leverandørerne oplyser som nævnt leverancerne til en adresse, nemlig der hvor fjernvarme- eller naturgasmåleren eller olietanken står. Det er imidlertid ikke altid oplagt, hvilke bygninger der faktisk er opvarmet med energi leveret til denne adresse. Der kan således være uopvarmede bygninger på de adresser, hvor der er leveret energi, eller der kan være bygninger på én adresse, der er opvarmet med energien leveret til naboadressen.

Noget energi kan desuden tænkes brugt til andet end opvarmning. Det kan fx være, at et parcelhus ligger på samme adresse som en produktionsvirksomhed, der bruger en del af energien til produktionen.

Der ses kun på parcelhuse i undersøgelsen, fordi det vurderes, at problemerne er mindst her. Selv om der kun ses på parcelhuse, finder vi (se hovedteksten), at der er observationer med ekstremt stort energiforbrug pr. kvadratmeter. Der er også observationer med ekstremt lave forbrug, hvilket måske skyldes, at boligerne ikke er beboede i store dele af året.

Leverancerne af fjernvarme, naturgas eller olie opfattes som den primære varme (i modsætning til supplerende varme).

### **Bygningsarealet**

Arealet spiller stor rolle ved bestemmelsen af energiforbruget. Det viser sig, at energiforbruget pr. kvadratmeter falder meget kraftigt, desto større arealet er. Det peger på, at det er vigtigt at inddrage arealet på den rigtige måde.

BBR-definitionen af det anvendte bygningsareal er ”areal, der anvendes til boligformål, herunder også udnyttet tageetage og udnyttet beboelse i kælder”. Selv om dette areal burde omfatte tageetage og kælder, er der i estimationerne også inddraget dummyer for, om der er tageetage og kælder i huset. Dummyerne kan i princippet opfange, om fx kælderen er mindre opvarmet end resten af huset.

### **Supplerende varmekilde**

Det er i BBR angivet, om bygningen benytter en supplerende varmekilde. Det er dog langt fra sikkert, at BBR er opdateret, således at registreringerne er korrekte. BBR bliver ofte opdateret ved nybyggeri og ved salg, men ellers er det op til ejeren at informere kommunen om fx supplerende varmekilde.

Selv om BBR ikke er præcis for supplerende varmekilder, så stemmer den BBR-andelen af boliger med supplerende varmekilde nogenlunde overens med resultaterne fra en spørgeskemaundersøgelser (se kapitel 7).

## Bilag 3. Beskrivende statistik

Tabel B2 viser beskrivende statistik for de anvendte variabler.

**Tabel B2. Beskrivende statistik for alle parcelhuse, der er energimærket, og hvor der er forbrugsoplysninger, opført fra 1900, som er solgt før 2011 eller efter 2013, og med forbrug mellem 50 og 350 kWh pr. m<sup>2</sup>\***

Variabel	N	Gns.	Std afv.	5 %	50 %	95 %
Energiforbrug, kWh/m <sup>2</sup> <sup>1</sup>	61849	135	52	66	127	234
Energibehov, kWh/m <sup>2</sup>	61849	198	63	85	184	304
Boligareal	61849	146	43	90	140	220
Antal fejl i tilstandsrapport	61849	3,8	9,2	0	0	26
Dummy for kælder	61849	0,24	0,43	0	0	1
Dummy for tagetage	61849	0,35	0,48	0	0	1
Dummy for suppl. varme	61849	0,25	0,43	0	0	1
Antal etager	61849	1,02	0,16	1	1	1
År for større ombygning	61849	699	948	0	0	2002
Dummy for større ombygning	61849	0,35	0,48	0	0	1
Dummy for naturgas	61849	0,42	0,49	0	0	1
Dummy for olie	61849	0,11	0,32	0	0	1
Antal personer i e-familien <sup>2</sup>	59667	2,56	1,30	1	2	5
Alder for hovedperson <sup>2</sup>	59667	50,8	17,4	28,0	47,0	83,0
Dansk statsborger	61849	0,90	0,30	0	1	1
Alder for ældste barn	61849	4,75	6,73	0	0	19
Dummy for børn	61849	0,46	0,50	0	0	1
Antal børn i e-familien	59667	0,87	1,07	0	0	3
Dummy for uddannelseskategori 2	61849	0,02	0,14	0	0	0
.. 3	61849	0,31	0,46	0	0	1
.. 4	61849	0,05	0,22	0	0	1
.. 5	61849	0,20	0,40	0	0	1
.. 6	61849	0,13	0,34	0	0	1
.. 7	61849	0,01	0,10	0	0	0
Husstandsindkomst pr. person <sup>2</sup>	53078	141672	190684,82	40923,26	107892,57	328580,42
Dummy for erhvervsindkomst	61849	0,62	0,49	0	1	1
Dummy for offentlig overførsel	61849	0,82	0,39	0	1	1
Afstand til kyst	61849	7,12	171,82	0	0	19
Dummy for oplysning om kyst	61849	0,50	0,50	0	0	1

\* Godt 50 huse med A-mærke opført før 2007 er udeladt. For mange af husene var energiforbruget meget højt set i forhold til energimærket.

<sup>1</sup> Af fjervarme, naturgas og olie.

<sup>2</sup> I beregninger med husholdningsoplysninger er udeladt observationer uden disse oplysninger.

Kommunedummyer er også anvendt, men fordelingen ikke vist i tabel 1.

## Bilag 4. Detaljerede estimationsresultater

I tabel B3 er resultater fra estimationer af varianter af 3) fra kapitel 2 vist. Modellerne er estimeret med OLS. I sidste række er effekten på det faktiske forbrug af ændring i det teknisk beregnede energibehov vist. Denne er beregnet som en partiel afledt, og svarer i den første og mest simple model til den estimerede parameter for det teknisk beregnede behov. I de øvrige modeller, hvor behovet indgår kvadreret eller krydset med andre variabler, skal effekten beregnes.

I model 1, med kun behovet som forklarende variabel, er effekten af behovet på forbruget ca. 1/3. Det betyder, at hvis det teknisk beregnede behov falder med 1 kWh pr. m<sup>2</sup> pr. år, så falder det faktiske forbrug af fjernvarme, naturgas og olie med 1/3 kWh pr. m<sup>2</sup> pr. år. Således er reboundeffekten 2/3 i denne model. Den interessante estimerede parameter er stærkt signifikant. Det samme gælder for alle estimerede parametre til behovet (eller det kvadrerede behov) i de øvrige modeller. I model 2 viser parameteren til behovet kvadreret, at ændringen i forbruget ved en ændring i behovet aftager desto større behovet er. Inklusion af demografiske variabler ændrer ikke den centrale parameter (model 3), hvilket kan ses som et tegn på, at der ikke er systematisk sammenhæng mellem beboernes karakteristika og bygningernes energibehov. Det indikerer, at det fx ikke er sådan, at alle, der ønsker højt niveau af energitjenester, dels køber energivenlige huse, og dels har et højere energiforbrug (jf. bilag 1 og kapitel 2).

**Tabel B3. Estimation af faktisk forbrug af fjernvarme, naturgas og olie, kWh pr. m<sup>2</sup>. I 2012 (ligning 3), kapitel 5) med forskellige forklarende variabler\* (fortsættes)**

	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4	
	Par	Std.err.	Par	Std.err.	Par	Std.err.	Par	Std.err.
Behov kWh pr. m2	0,317	0,003	0,6238	0,0175	0,5964	0,0184	0,528	0,0178
.. kvadreret			-0,0008	<0,0001	-0,0007	<0,0001	-0,0007	<0,0001
<i>Kategorier af kontrol-variabler</i>								
Beboer-karakteristika <sup>1</sup>					+		+	
Bygningens karakteristika <sup>2</sup>							+	
Df	61847		61846		53060		53049	
R <sup>2</sup>	0,14883		0,15316		0,17425		0,22808	
Beregnet effekt af behov på forbrug ved gns. hus <sup>3</sup>	0,32		0,30		0,32		0,23	

\* Samplet er som i tabel B2.

<sup>1</sup> Beboerkarakteristika: Antal beboere i husstand, alder for ældste beboer i husstand, alder på ældste barn, børn i husstand, antal børn i husstand, dansk statsborger, uddannelseskategori, husstandsindkomst pr. beboer, forekomst af erhvervsindkomst, forekomst af offentlig overførselsindkomst.

<sup>2</sup> Bygningsoplysninger: Areal, areal kvadreret, forekomst af kælder, areal af kælder, forekomst af udnyttet tagetage, forekomst af supplerende varmekilde, opvarmning med naturgas, olie eller fjernvarme, antal etager, forekomst af større ombygning, år for større ombygning.

<sup>3</sup> Effekten (den partielle afledte) af det teknisk beregnede behov på det faktiske forbrug af de tre energiarter er beregnet for et gennemsnitligt hus med areal på 145 m<sup>2</sup> og et teknisk beregnet energibehov på 200 kWh pr. m<sup>2</sup>.

(fortsat)

	Model 5		Model 6		Model 7		Model 8	
	Par	Std.err.	Par	Std.err.	Par	Std.err.	Par	Std.err.
Behov kWh pr. m <sup>2</sup>	0,3447	0,0193	0,8564	0,0315	0,8405	0,0315	0,8061	0,0307
.. kvadreret	-0,0004	0,00005	-0,0011	0,0001	-0,001	0,0001	-0,0009	0,0001
<i>Kontrolvariabler</i>								
Beboer-karakteristika	+		+		+		+	
Bygningens karakteristika	+		+		+		+	
Opførelsesår	-0,4212	0,0117						
<i>Interaktion</i>								
Behov*kælder			-0,0596	0,00786	-0,0612	0,00785	-0,055	0,00763
..*tagetage			-0,022	0,00692	-0,0194	0,00691	-0,0015	0,00673
..*olie			-0,1339	0,0113	-0,1329	0,0113	-0,1345	0,011
..*suppl. varmekilde			-0,0458	0,00766	-0,0455	0,00765	-0,0433	0,00744
..*areal			-0,0011	0,0001	-0,0011	0,0001	-0,0012	0,0001
Geografi (afstand til kyst)					+		+	
Kommuner							+	
Df	53048		53043		53041		52945	
R <sup>2</sup>	0,24647		0,23497		0,23704		0,28282	
Beregnet effekt af behov på forbrug ved gns. hus	0,17		0,27		0,28		0,27	

Inklusion af bygningskarakteristika (model 4) øger forklaringsgraden (R<sup>2</sup>) en del, og sænker effekten af behovet på forbruget til en fjerdedel. Bygningsarealet er den vigtigste bygningsvariabel, og det viser sig, at desto større boliger, desto mindre er forbruget af fjernvarme, naturgas og olie pr. m<sup>2</sup>. Man kan argumentere for (Aydin m.fl. (2014)), at arealet ikke burde indgå, fordi det er helt centralt i reboundhypotesen for boliger, fordi boligejerne kan vælge hvor stort areal, der skal opvarmes. Denne hypotese antages dog at blive fanget bedre med interaktionsvariabler (jf. nedenfor).

I model 5 er opførelsesåret inkluderet, og er stærkt signifikant. Det betyder væsentligt svagere effekt af behovet på forbruget. Da bygningsreglementet gradvist er blevet strammet, og teknologi i øvrigt udvikles over tid, antages opførelsesåret at fange en del af effekten fra energibehovet, og opførelsesåret udelades derfor i de følgende estimationer.

”Interaktionsvariabler”, hvor behovet er multipliceret med andre variabler, er medregnet i model 6. I store boliger, eller boliger med kælder eller tagetage, kan man forestille sig, at reboundeffekten er stærk, fordi boligejeren har relativt gode muligheder for at undlade at varme dele af huset op, og det kan måske ske særligt ofte, hvis bygningen ikke er energivenlig. På samme måde kan den

supplerende varmekilde tænkes at blive brugt mere intensivt i huse med højt energibehov. Model 6 finder netop sådanne effekter. For eksempel falder effekten af behovet på forbruget med 0,0011 kWh pr. m<sup>2</sup>, for hver kvadratmeter, som huset bliver større. Effekten er fx 0,27 for et gennemsnitligt hus, men  $0,27 - 0,0011 \cdot 10 \approx 0,26$  for et hus, der er 10 m<sup>2</sup> større. Samtlige interaktionseffekter er signifikante i model 6 og har det forventede fortegn.

Reboundeffekten kan tolkes som en slags priseffekt, og man skulle forvente, at reboundeffekten var stærkest ved højest energipriser. Olie er dyrere end naturgas og fjernvarme, og man finder faktisk større reboundeffekt, når huset er opvarmet med olie sammenlignet med fjernvarme og naturgas.

Inklusion af geografiske variabler har ikke betydning for de centrale parameterestimer, jf. model 7 og 8. Dog bliver parameteren for interaktionsvariablen for behov og tageetage insignifikant. Det viser sig i de følgende estimationer, at denne parameter er ustabil. Det kan måske skyldes, at beboerne ikke i særlig grad vælger opvarmning af tageetager fra, hvis de ønsker at spare på varmen (i modsætning til kælderen, hvor der måske oftere i praksis lukkes for varmen).

Betydningen af samplet er vist i tabel B4, hvor model 8 fra tabel B3 er vist dog med forskellige samples. I den første estimation er huse med olie eller supplerende varme udeladt. Det er sket for at undersøge en hypotese om, at effekten af behovet på forbruget er særlig svag i disse boliger. Det ses, at sammenhængen mellem behov og forbrug (den partielle afledte) kun falder et par procentpoint fra 0,27 til 0,24, når huse med supplerende varme eller olie udelades (dvs. i modsat retning af, hvad der var forventet). Det kan bl.a. tolkes som, at forbruget af supplerende varme ikke er korreleret med behovet for energi i bygningen. Det peger i modsat retning af tolkningen af fortegnet på interaktionsvariable for supplerende varme i model 8.

I anden estimation i tabel B4 er huse solgt i 2011, 2012 eller 2013 medtaget. Disse huse var undtaget, da vi ser på energiforbrug i 2012 og gerne vil undgå, at ind- og udflytning påvirker beregningerne. Heller ikke det påvirker effekten af behovet på forbruget væsentligt, men alle interaktionsvariabler bliver insignifikante og/eller får uforventet fortegn.

I tredje estimation er betydningen af at have udeladt observationer med ekstremt energiforbrug belyst. Det har ikke betydning for effekten af behovet på forbruget. Det samme gælder, hvis der kun ses på mellemstore huse, jf. fjerde estimation, eller hvis G-mærkede huse udelades, jf. femte estimation.

Samlet set er de centrale parametre robuste i den forstand, at effekten af behovet på forbruget er omtrent uændret ved de forskellige samples.

I tredje estimation er den absolutte værdi af parameteren for interaktionsvariablen for behov og olie væsentligt lavere end i model 8 i tabel B3. Bortset fra det, er der nogenlunde overensstemmelse mellem parametrene for interaktionsvariablerne i de sidste tre modeller i tabel B4 og i model 8 i tabel B3.

**Tabel B4. Estimation af faktisk forbrug af fjernvarme, naturgas og olie, kWh pr. m<sup>2</sup>. I 2012 (ligning 3), kapitel 5) med forskelligt sample, (fortsættes)**

	Model 8 + Huse med olie eller supplerende varme er udeladt		Model 8 + Huse solgt i 2011-13 medtaget		Model 8 + Huse med forbrug 30- 550 kWh/m2 medtaget	
	Par	Std.err.	Par	Std.err.	Par	Std.err.
Behov kWh pr. m2	0,9097	0,0331	0,7685	0,0268	0,8266	0,0349
.. kvadreret	-0,0011	0,0001	-0,0009	0	-0,0009	0,0001
<i>Kontrol-variable</i>						
Beboer- karakteristika			+		+	
Bygningens karakteristika			+		+	
<i>Interaktion</i>						
Behov*kælder	-0,0419	0,00829	0,00586	-0,0468	-0,0584	0,00874
..*tagetage	0,01956	0,00747	0,00583	0,00343	-0,0146	0,00768
..*olie			0,0095	-0,1289	-0,0312	0,01206
..*suppl. Varmekilde			0,00644	-0,0397	-0,0442	0,00846
..*areal	-0,0016	0,0001	0,0001	-0,0011	-0,0015	0,0001
Df	35519		71125		54681	
R <sup>2</sup>	0,35814		0,27493		0,25839	
Beregnet effekt af behov på forbrug ved gns. hus	0,24		0,25		0,25	

(fortsat)

	Model 8 + Kun huse med areal 125-200 medtaget		Model 8 + Huse med energimærke G udelukket	
	Par	Std.err.	Par	Std.err.
Behov kWh pr. m2	0,8574	-0,0012	0,8092	0,0311
.. kvadreret	0,0493	0,0001	-0,001	0,0001
<i>Kontrol-variable</i>				
Beboerkarakteristika	+		+	
Bygningens karakteristika	+		+	
<i>Interaktion</i>				
Behov*kælder	-0,0523	0,01016	-0,0498	0,0083
..*tagetage	0,01472	0,00906	0,00457	0,00737
..*olie	-0,114	0,0152	-0,1395	0,0123
..*suppl. varmekilde	-0,0342	0,00947	-0,0399	0,00797
..*areal	-0,0011	0,00023	-0,0011	0,0001
Df	30648		49256	
R <sup>2</sup>	0,24420		0,27884	
Beregnet effekt af behov på forbrug ved gns. hus	0,23		0,25	

### Instrumentvariabelmetode

Energimærkerne og det målte behov er ikke en perfekt opgørelse af bygningens energistandard. Når energistandarden er upræcist målt, medfører det, at parameteren for behovet bliver mindre end den sande parameter. Nedenfor er derfor søgt at anvende et instrument for behovet. Denne metode kan under visse forudsætninger også mindske problemer med, at der er udeladte variabler i modellen, der korrelerer med behovet. I første trin af denne beregning er behovet for energi forudsagt ud fra bygningens opførelsesår, og det forudsagte behov er derefter brugt som alternativ til det faktiske behov. Der er brugt samme model som model 8 fra tabel B3, blot med forudsagt behov for energi.

Estimationen til bestemmelse af det forudsagte energibehov,  $\hat{b}_i$ , er

$$B5) \quad \hat{b}_i = \sum_{t=1}^8 \tau_t d_t + \gamma_{olie} d_{olie} + \gamma_{fjv} d_{fjv} + v_i$$

hvor de græske bogstaver,  $\tau_t$ ,  $\gamma_{olie}$  og  $\gamma_{fjv}$  skal estimeres, og  $d_x$  er 0-1-variabler for forskellige tidsperioder eller opvarmningsarter. Estimationen har en forklaringsgrad, så  $R^2$  er lig 0,38. Desto nyere huset er, desto lavere er det forudsagte behov. Dog er det teknisk beregnede energibehov lavere for huse bygget før 1950 end for huse bygget 1950-60.

Instrumentvariabelmetoden kan under visse betingelser også korrigere for, at husholdningers smag for god energistandard er korreleret med energiforbruget (simultanitetsproblemet, jf. bilag 1 og kapitel 2).

Estimationen med det forudsagte behov er vist i tabel B5. Effekten af behovet på forbruget er på 0,40 mod 0,27 med OLS. Denne lidt større værdi kan tyde på, at der faktisk er et problem med i estimationer i tabel B3 som følge af, at behovet ikke er målt præcist, eller som følge af, at behovet korrelerer med andre fx demografiske faktorer, der ikke er inkluderet i modellen. Parameteren for interaktionsvariablen for behov og tagetage får uforventet fortegn. Ikke desto mindre benytter vi denne model som den foretrukne, således at det er resultatet herfra (effekten på 0,4), der benyttes i hovedteksten.

**Tabel B5. Estimation af faktisk forbrug af fjernvarme, naturgas og olie, kWh pr. m<sup>2</sup>. I 2012 (ligning 3), kapitel 5), instrumentmetode**

	Par	Std.err.
Behov kWh pr. m <sup>2</sup>	0,9736	0,0501
.. kvadreret	-0,0007	0,00012
<i>Kontrol-variabler</i>		
Beboerkarakteristika	+	
Bygningens karakteristika	+	
<i>Interaktion</i>		
Behov*kælder	-0,0393	0,01343
..*tagetage	0,04569	0,01324
..*olie <sup>1</sup>		
..*suppl. varmekilde	-0,0671	0,0124
..*areal	-0,002	0,0001
Geografi (afstand til kyst)	+	
Kommuner	+	
Df	52949	
R <sup>2</sup>	0,28313	
Partiel effekt af behov på forbrug ved gns. hus	0,40	

<sup>1</sup> Opvarmningsform er udeladt, fordi det indgår i 2)