Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

IDAs Klimasvar: Transport- og energiløsninger 2030

Lund, Henrik; Mathiesen, Brian Vad; Thellufsen, Jakob Zinck; Sorknæs, Peter; Skov, Iva Ridjan

Publication date:
2020

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

Link to publication from Aalborg University

Citation for published version (APA):
Lund, H., Mathiesen, B. V., Thellufsen, J. Z., Sorknæs, P., & Skov, I. R. (2020). *IDAs Klimasvar: Transport- og energiløsninger 2030*. Ingeniørforeningen IDA.

General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from vbn.aau.dk on: April 19, 2024

IDAs Klimasvar

– Transport- og energiløsninger 2030

Udarbejdet af forskere fra
Aalborg Universitet i dialog med
IDAs Klima ad hoc-udvalg

AALBORG UNIVERSITET

IDAs Klimasvar: Transport- og energiløsninger 2030

© Udarbejdet af forskere fra Aalborg Universitet:
Henrik Lund
Brian Vad Mathiesen
Jakob Zinck Thellufsen
Peter Sorknæs
Iva Ridjan Skov
Institut for Planlægning, Aalborg Universitet

Udgivet af:
Ingeniørforeningen, IDA
Kalvebod Brygge 31-33
1560 København V
Danmark
Maj 2020

ISBN: EAN 978-87-87254-29-8

Rapportens fund og konklusioner er redaktionens ansvar.
Rapporten er bestilt af Ingeniørforeningen, IDA.

IDAs Klimasvar er et resultat af et forskningssamarbejde mellem IDA og Energiforskningsgruppen ved Institut for Planlægning ved Aalborg Universitet. IDAS Klimasvar er skrevet af rapportens forfattere, som også har lavet alle analyserne. Arbejdet bygger på de tre tidligere IDA energi-strategier fra 2006, 2009 og 2015 samt resultatet af ud-valgsarbejde i 2020.

Arbejdet er blevet fulgt af og modtaget bidrag fra
IDAs Klima ad hoc-udvalg:
Monika Skadborg, Per Homann Jespersen
Niels Brock, Torben Nørgaard
Felica Fock, Henrik Lund, Søren Linderoth, Peter Bach,
Laura Klitgaard (tovholder fra IDAs Hovedbestyrelse) samt
Pernille Hagedorn-Rasmusen, IDA (faglig sekretær)

Arbejdet har desuden fået input og kommentarer fra:
IDA Energi gennem formand Anders Dyrelund og
IDA Byg ved Kurt Emil Eriksen

Herudover ønsker forfatterne at takke følgende personer for værdifulde input undervejs:
Professor Henrik Wenzel, SDU
Seniorforsker emerita Linda Christensen, DTU
Chefkonsulent Per Henriksen, Dansk Luftfart

Forord

Klimaforandringerne er en vor tids væsentligste samfundsmæssige udfordringer, og reduktioner af klimagasudledninger er løsningen. Det har danske politikere anerkendt ved at vedtage en klimalov, der sætter mål om 70 pct. reduktion i 2030 og klimaneutralitet i 2050.

I IDA har vi de sidste 15 år arbejdet med energi- og klimascenarier for Danmark. Vi har med udgangspunkt i vedtaget dansk politik og internationale aftaler, i samarbejde med Forskningsgruppen for Energiplanlægning ved Institut for Planlægning ved Aalborg Universitet udregnet scenarier, der viser hvordan Danmark kan få et 100 pct. vedvarende energisystem og levere på sine klimamål. Det har vi gjort, fordi vi som forening mener, at vores medlemmer, på grund af deres viden om teknologi, produktion og infrastruktur, har et særligt ansvar for at deltage i den klimamæssige diskussion og komme med faglige forslag til løsninger.

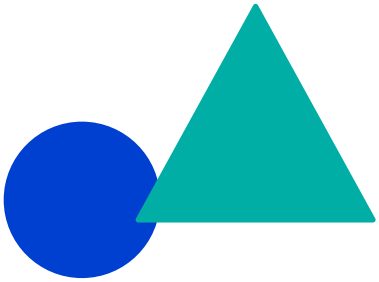
Nu har vi forsøgt os igen. Vi kalder det IDAs Klimasvar – transport- og energiløsninger 2030. Vi vil vise hvordan Danmark kan nå 70 pct. klimagas reduktion i 2030. Vi forudsætter, at landbrugets ikke-energirelaterede emissioner, samt de industrielle processer, vil reduceres med lidt over 30 pct. i forhold til 2020. Med udgangspunkt i erhvervs klimapartnerskabernes input til regeringerne i marts 2020, ser det ud til, at det er rimelige forventninger til brancherne. IDAs Klimasvar viser et fagligt funderet scenarie for, hvordan transport og energi kan bidrage med resten af de nødvendige reduktioner, så Danmark samlet set kommer ned på 70 pct. reduktion i 2030. Vi går også længere end det. Hvor den danske klimalov går mod klimaneutralitet i 2050, så arbejder vi i dette scenarie for et mål om klimaneutralitet allerede i 2045. Det gør vi fordi, vi mener Danmark skal lægge sig foran andre lande i klimaambitionerne. Det skal vi gøre fordi, det er nødvendigt. Hvis ikke lande som Danmark viser vejen, så får vi aldrig resten af verden med på en udvikling, der holder jorden under 1,5 grader. Meget tyder faktisk på, at det vil blive nødvendigt at holde sig et mål for øje, der hedder klimaneutralitet allerede i 2040. Det vil vi arbejde videre med i de kommende år, så vi kan finde veje til endnu flere reduktioner af de danske udledninger.

IDAs Klimasvar har desuden endnu et væsentligt udgangspunkt – vi arbejder for en positiv udvikling i dansk beskæftigelse og eksport. Den grønne omstilling skal gennemføres på en måde, så vi sikrer vores velfærdssamfund. De seneste måneders omvæltning på grund af corona-krisen har gjort denne tilgang endnu mere central.

Vi har i IDA en særlig opmærksomhed på teknologiudvikling som et nødvendigt spor i klimaløsninger, og vi ser på, hvor Danmark har særlige styrkepositioner, der kan bruges strategisk i klimaomstillingen. Vi mener, at en ambitiøs politik giver danske virksomheder et godt udgangspunkt for eksport af grønne løsninger. Gennem eksport af viden og teknologi, samt fastholdelse af Danmark som et udstillingsvindue for klimaløsninger, kan vi mangedoble effekten af de grønne løsninger, når de tages i brug ude i verden.

Tak til IDAs Klima Ad Hoc-udvalg, IDA Energi, IDA Byg, AAU og andre, der har bidraget til arbejdet med data og løsninger. Målet med arbejdet har været at skabe debat og klarhed om mulighederne i den grønne omstilling af Danmark. Vi vil fortsætte debatten og håber, at mange vil bruge tid på at udvikle og bidrage til teknologier og løsninger, der kan skabe de reduktioner, der er nødvendige for at begrænse klimaforandringerne i verden.

Thomas Damkjær Petersen
Formand for IDA



Indhold

Forord **3**

Indledning **6**

Resumé og resultater **6**

1 Baggrund og overordnede principper **13**

2 Metode **14**
2.1 Modellen for 2020 – ENS2020 15
2.2 Modelleringen af IDAs Klimasvar 2030 16
2.3 Modellering af 100 pct. VE i 2045 16
2.4 Opgørelse af de samfundsøkonomiske omkostninger 16
2.5 CO_2-emission fordelt på forbrugssektorer 17

3 CO_2-reduktioner og opgørelser nu og i fremtiden **18**
3.1 Den danske andel af den internationale transport 20

4 IDAs forslag opdelt på fire forbrugssektorer og fem tværgående temaer **22**

Oversigt **23**

5 Varme **25**
5.1 Energieffektivitet og varme 25
5.2 Sektorintegration og varme 25
5.3 Biomasse og varme 26
5.4 Vedvarende energi og varme 26
5.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af varmesektoren 27
5.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af varmesektoren 27
5.7 Samfundsøkonomi og varme 28

6 Industri **30**
6.1 Energieffektivitet og industri 31
6.2 Sektorintegration og industri 31
6.3 Biomasse og industri 33
6.4 Vedvarende energi og industri 33
6.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af industrisektoren 34
6.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af industrisektoren 34
6.7 Samfundsøkonomi og industri 35

7 Transport **38**
7.1 Energieffektivitet og transport 38
7.2 Sektorintegration og transport 39
7.3 Biomasse og transport 40
7.4 Vedvarende energi og transport 41
7.5 Teknologiske udfordringer i omstilling af transportsektoren 41
7.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af transportsektoren 41
7.7 Samfundsøkonomi og transport 43

8 El 45
8.1 Energieffektivitet og el 45
8.2 Sektorintegration og el 46
8.3 Biomasse og el 47
8.4 Vedvarende energi og el 47
8.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af el-sektoren 48
8.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af el-sektoren 48
8.7 Samfundsøkonomi og el 49

9 Energieffektivitet 51

10 Sektorintegration 52

11 Biomasse 54

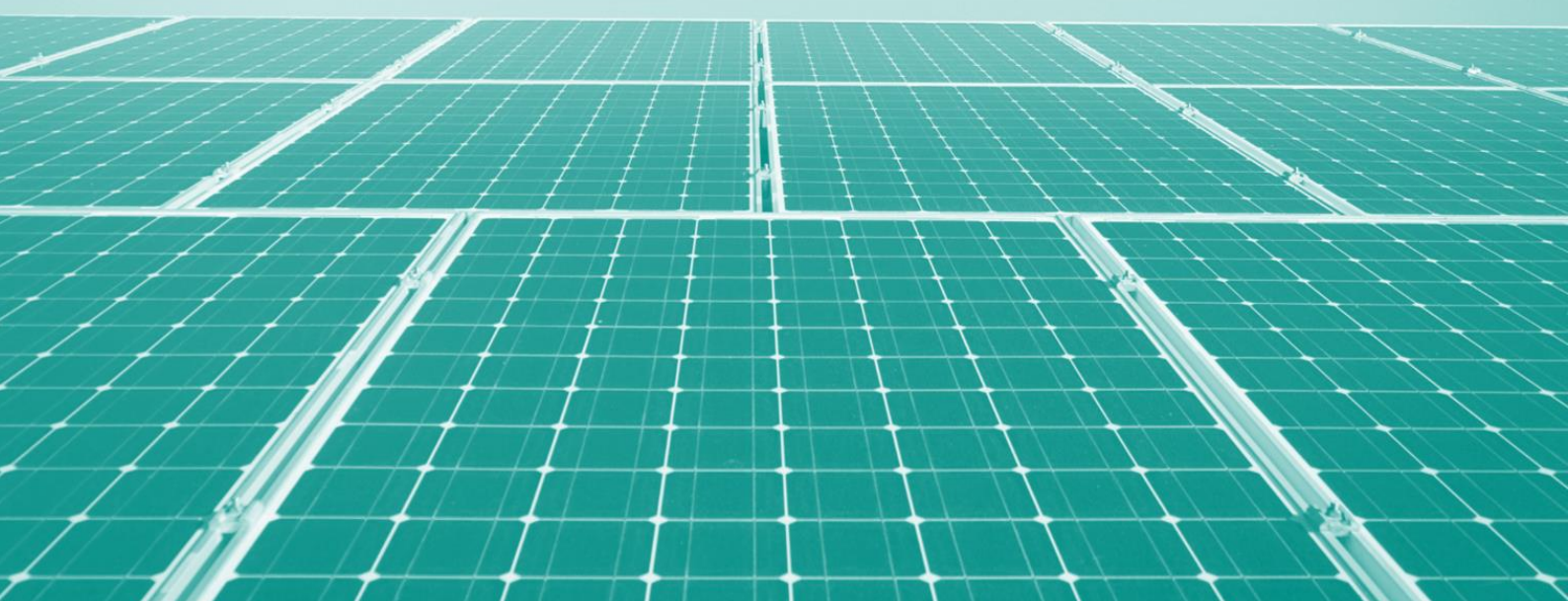
12 Vedvarende energi 55

13 Teknologiske udfordringer 56

Appendiks A: Forudsætninger for Økonomiberegning 58

Appendiks B: International fly og skibstrafik 59
International skibstransport 61

Referencer 62



Indledning

IDAs Klimasvar er IDAs bud på, hvordan Danmark når sit mål om 70 pct. reduktion af klimagasser i 2030. Det er ikke første gang, vi har arbejdet med løsninger på klima- og energiområdet. IDA har i IDAs Energiplan fra 2006, IDAs Klimaplan fra 2009 og i IDAs Energivision 2050 fra 2015 lavet scenarier for det danske energisystem. Igennem scenarier har IDA undersøgt, hvilke udviklingsveje mod 100 pct. vedvarende energi og reduktion af CO_2-udledninger, der gav billigst energi, mest stabilitet, højest forsyningssikkerhed og samtidig sikrede job og beskæftigelse i Danmark. Her i IDAs Klimasvar bygges der videre på de samme tanker. Det undersøges, hvordan det kan lade sig gøre, når Danmark skal reducere sine udledninger med 70 pct. i 2030 og gå mod klimaneutralitet på den længere bane.

Igennem arbejdet de sidste 15 år er der fremkommet en række tværgående anbefalinger for, hvad der er vigtigt for ændringer og udvikling af energisystemet i Danmark. De har ikke relation til enkelte tiltag, men går på tværs og er centrale for, at Danmark kan komme videre med en omfattende omlægning mod 100 pct. vedvarende energi og klimaneutralitet. De tværgående konklusioner og anbefalinger er:

1. Danmark har brug for en langsigtet vision og en aktiv energiplanlægning. Energiplanlægningen skal både ske nationalt i energi- og klimaplaner og lokalt/regionalt i relation til den kommunale planproces.
2. Forskning, udvikling og demonstration indenfor energi- og transportløsninger er nødvendigt for, at Danmark kan nå sine klimamål.
3. Danmark har brug for en revision af afgift- og tarifsystemerne inden for transport og energi, så afgifter og tariffer bidrager til – og ikke modarbejder – den grønne omstilling.

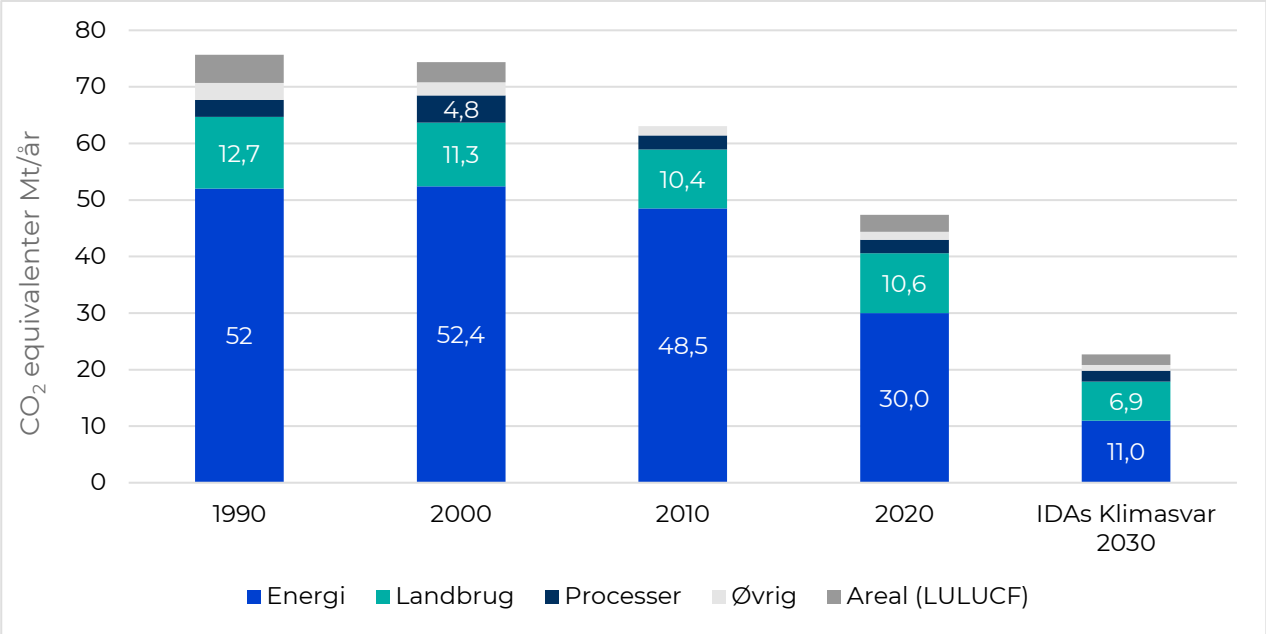
Arbejdet med Klimasvaret bygger på denne erkendelse og må anses som en forudsætning for, at Danmark kommer bedst muligt igennem en grøn omlægning af samfundet.

Resumé og resultater

I IDAs Klimasvar gives et konkret bud på, hvordan Danmark rent teknisk kan opfylde målsætningen om 70 pct. CO_2-reduktion i 2030 på en samfundsøkonomisk god måde. IDAs Klimasvar prioriterer, at Danmark bruger den grønne omstilling til at skabe industriel udvikling og jobs. Derudover sætter IDAs Klimasvar fokus på, hvordan vi teknologisk forbereder os på tiden efter 2030. IDAs mål er, at Danmark overgår til 100 pct. vedvarende energi og bliver klimaneutrale i 2045. I en senere rapport følger vi op og ser på et mere detaljeret scenarie fra 2030 og frem mod 2045.

Reduktionsmålsætningen på 70 pct. regnes ift. Danmarks udledninger i 1990 regnet efter FNs opgørelser. IDAs Klimasvar omfatter energi og transport (vist med mørkeblå i figur 1). Ud over energisektoren omfatter FNs opgørelser også landbrug, industrielle processor, arealanvendelse samt øvrigt, dvs. de ikke energirelaterede emissioner.

Figur 1. Dansk CO_2-emission iflg. FN-opgørelsesmetoden



Kilde: Energistatistik 2018.
Note: Tallene er justeret for LULUCF og tilpasset 75,7 i 1990. *Øvrig omfatter "andre emissioner" og "indirekte emissioner". 2020 er delvist baseret på historiske tal for 2017 samt fremskrivning til 2020. IDAs Klimasvar omfatter energi og transport - den blå

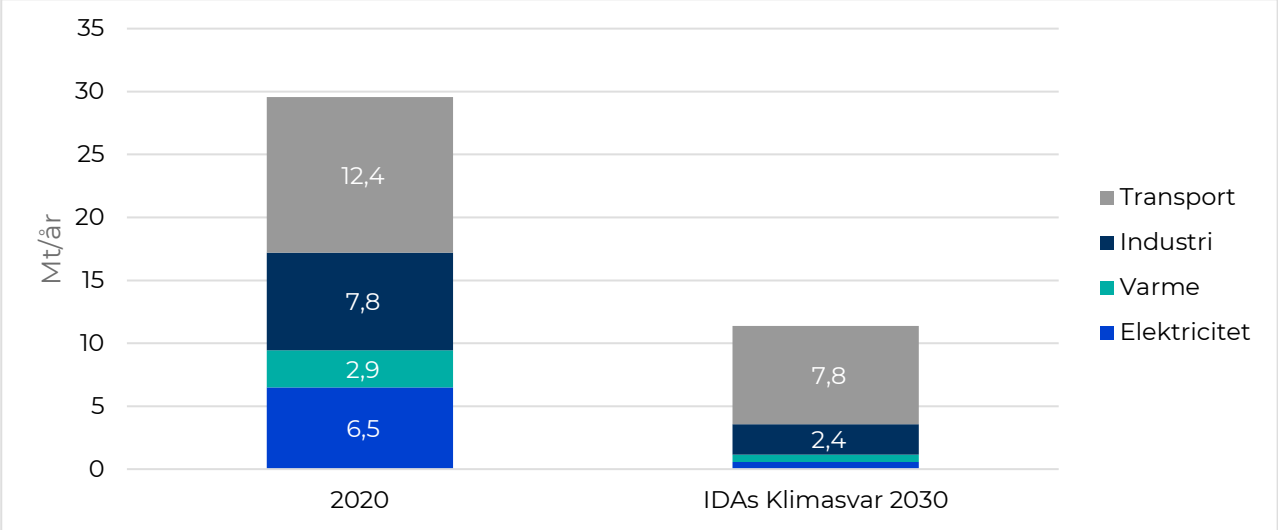
Opgjort på denne måde var de danske emissioner på 75,7 Mt i 1990 og med en 70 pct. reduktion skal den altså nedbringes til 22,7 Mt i 2030. IDA forudsætter, at der også i de andre sektorer sker reduktioner frem til 2030. Konkret forudsættes det, at de andre sektorer reducerer fra en (forventet) emission på 17 Mt i 2020 til 11,7 Mt i 2030.

Målet for energi og transport bliver således, at emissionen skal reduceres fra 30 Mt i 2020 til ca. 11 Mt i 2030.

Det kan blive nødvendigt i de øvrige sektorer før og/eller efter 2030 at gøre brug af CCS (opsamling af CO_2 og lagring) for at blive helt CO_2-neutrale. For at det kan være muligt for de andre sektorer at benytte CCS-teknologien satser IDAs Klimasvar udelukkende på CCU (opsamling af CO_2 og anvendelse) i energi- og transportsektoren, hvor den indsamlede CO_2 bruges (CCU) til produktion af VE brændsler i til især flytransport og skibsfart.

IDAs Klimasvar opdeler energi- og transportområdet i fire forbrugssektorer: Varme, Industri, Transport og El. Resultatet af IDAs Klimasvar er vist i figur 2. Som det ses har transportsektoren i 2020 den største andel af CO_2-emissionen, og det er forsat gældende i 2030, også i IDAs Klimasvar. Det er derfor helt afgørende, at vi allerede nu forbereder Danmark på, hvordan sektoren kan reducere yderligere i årene efter 2030.

Figur 2. Fordeling af CO_2-emissionen på sektorer. CO_2-emission. FN-opgørelsesmetoden



IDAs klimasvar kræver investeringer for ca. 500 milliarder kroner i de næste 10 år. De vigtigste investeringer er oplistet i tabel 1.

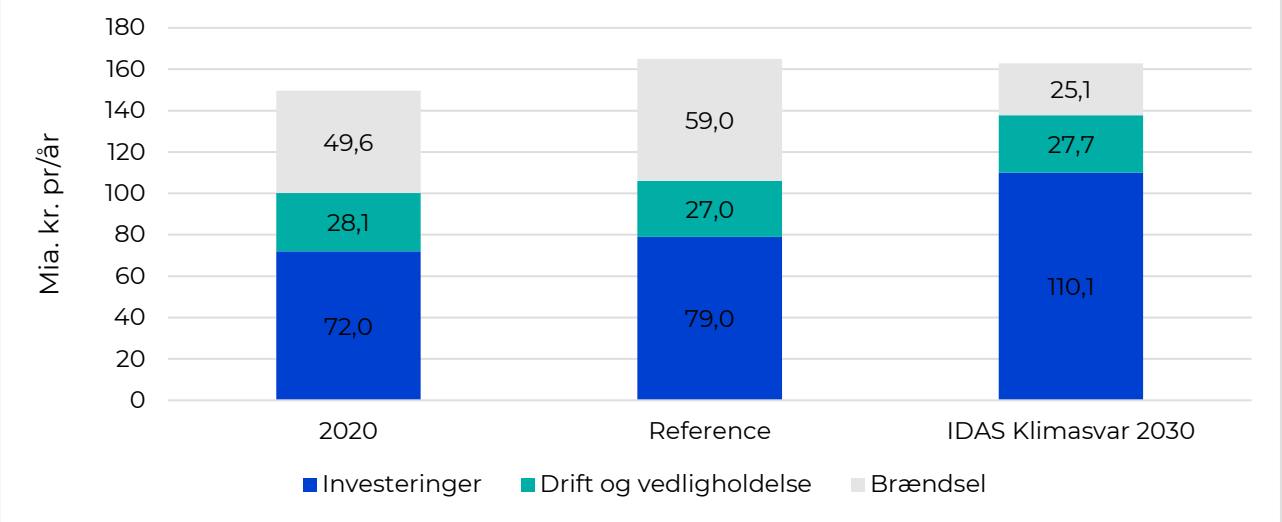
Tabel 1. De største investeringer i perioden 2020 til 2030

	Investeringsbehov	**Årlige afskrivning og rente i 2030**
	Milliarder DKK	*Millioner DKK/år*
Bygningsrenovering	124	5360
Offshore og onshore vindmøller	78	4173
El-køretøjer (ekstraomkostning inkl. e-roads)	73	6896
Individuelle varmepumper	70	5114
Industri (besparelser og elektrificering)	36	2570
Fjernvarmeudvidelse og 4G fjernvarme	30	1467
Solceller	21	937
Biogasanlæg	18	1223
Nye gasfyrede værker	16	897
Store varmepumper	9	499
Elektrolyse og brintlager	8	501
Geotermi	8	440
Bølgekraft	5	303
Forgasning, hydrogenring og elektrofuels	5	316
Ladestandere, infrastruktur og ITS	4	2252
Intelligent fleksibelt elbehov	3	235
Solvarme, Overskudsvarme og varmelagre	3	176
Fjernkøling	2	89
Gasnet	2	89
Sum	**515**	**33.536**

Sammenlignet med 2020 betyder det, at den samfundsøkonomiske omkostning til renter og afskrivninger øges med knap 40 milliarder kr. per år i 2030 sammenlignet med 2020. Til gengæld spares der brændsel for ca. det samme beløb.

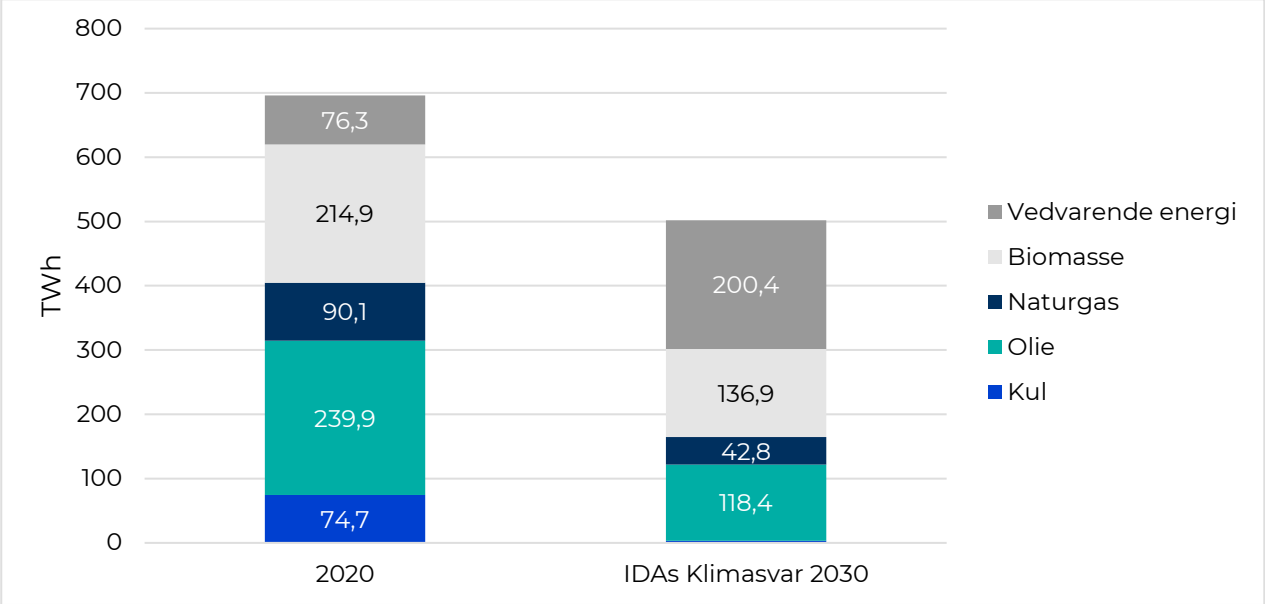
Omlægningen i omkostninger er vist i figur 3. Som det ses erstattes udgifter til brændsel med udgifter til investeringer. Ift. 2020 stiger de samlede omkostning en smule, men det skyldes at energibehovene også forventes at stige frem til 2030. Sammenlignet med en reference 2030 situation stiger den samlede omkostning ikke, hvis brændselspriserne udvikler sig iht. Energistyrelsens seneste forventninger. Denne sammenligning er dog meget afhængig af hvilke brændselspriser, der forudsættes. Konklusionen er derfor, at hvis omstillingen teknisk-set gennemføres på den rigtige måde, er den uden nævneværdige samfundsøkonomiske omkostninger**.** Det vil dog have store fiskale konsekvenser, hvorfor en afgift- og skatteomlægning er nødvendig

Figur 3. Ændringen i Danmarks omkostninger til energi fra 2020 til 2030.



Med IDAs Klimasvar nedbringes forbruget af fossile brændsler gennem effektiviseringer og gennem erstatning med vedvarende energi (se figur 4). Samtidigt nedbringes også afbrændingen af biomasse. Målt per capita bringes biomasseforbruget ned fra ca. 29 GJ/capita i 2020 til ca. 26 GJ/capita 2030. Desuden omlægges der fra importerede træpiller til biogas, halm, træpiller og flis primært baseret på danske ressourcer.

Figur 4. Brændsler og vedvarende energi i IDAs Klimasvar sammenlignet med 2020.

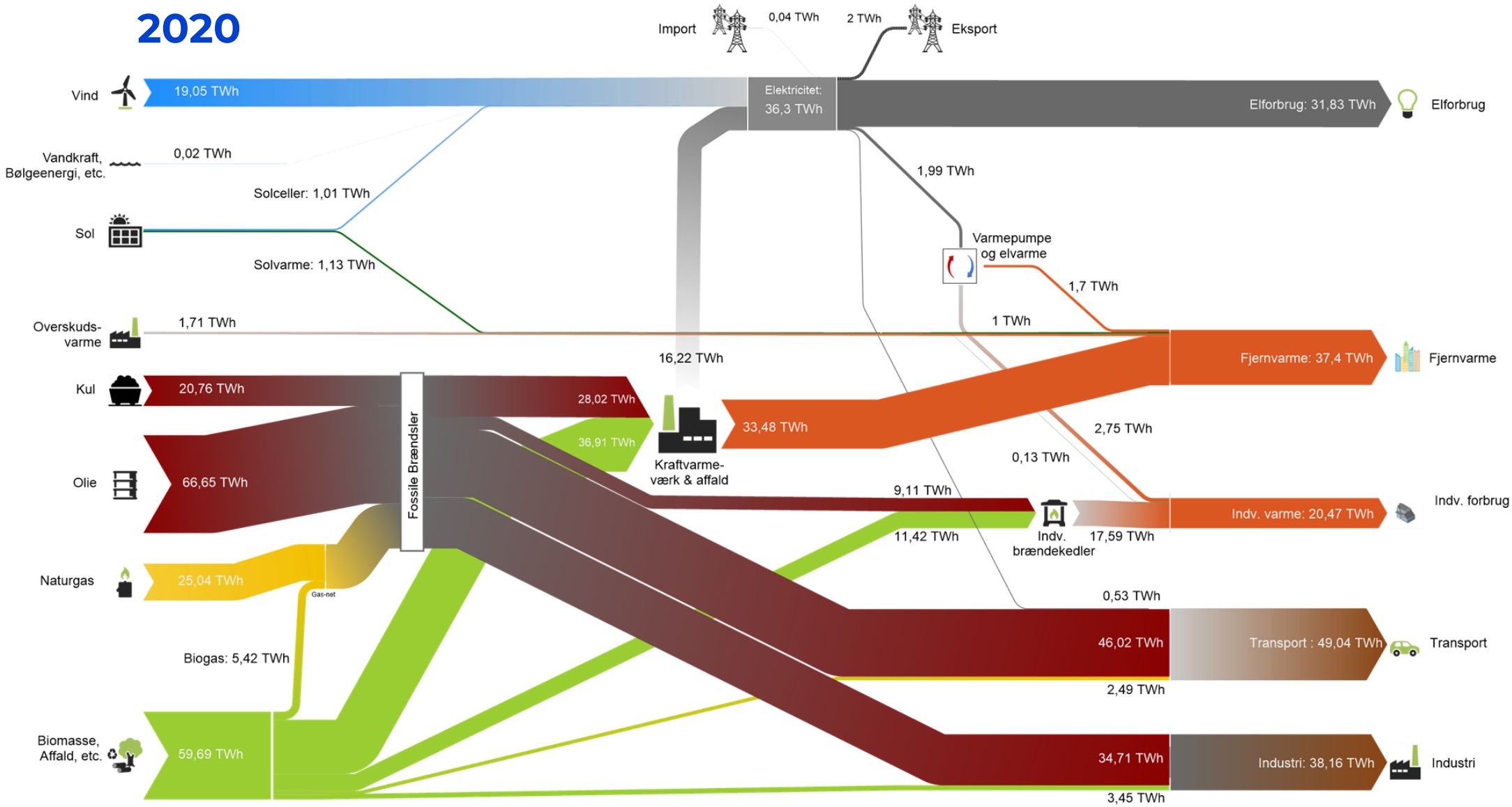


Med hensyn til **energieffektivitet** vil Danmark med IDAs Klimasvar kunne opfylde sine forpligtigelser iht. EU's energieffektiviseringsdirektiv.

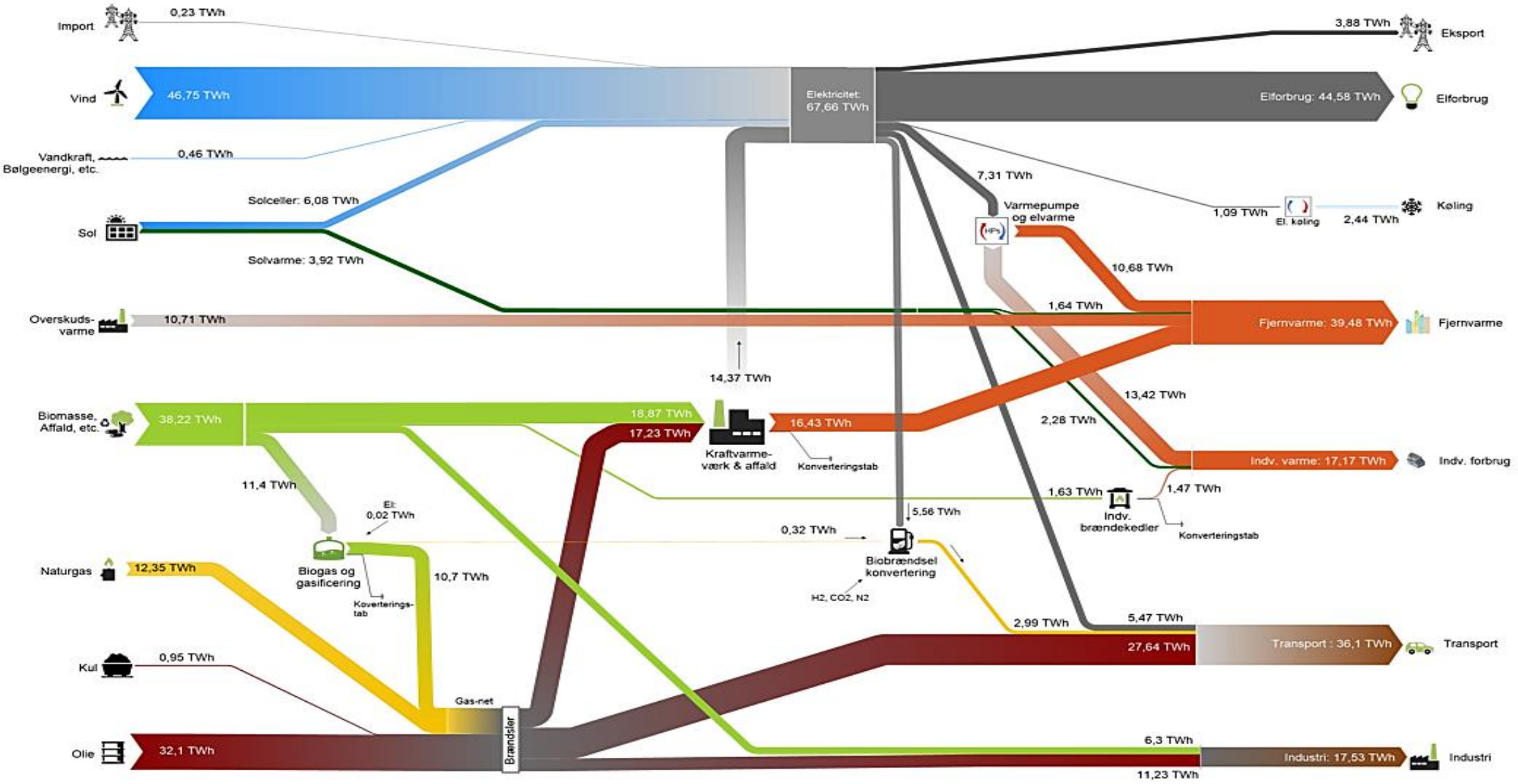
Med hensyn til **sektorintegration** sikrer IDAs Klimasvar en omkostningseffektiv brug af forskellige lagermuligheder fleksibilitet og indregulering, så ubalancer i elforsyningen nedbringes til et minimum.

I figur 5 herunder er illustreret, hvordan energi-flowet omlægges i sankey diagram.

Figur 5. Sankey diagrammer for IDAs Klimasvar sammenlignet med Danmark 2020



2030


Import
0,23 TWh
Vind
46,75 TWh
Vandkraft, Bølgeenergi, etc.
0,46 TWh
Sol
Solceller: 6,08 TWh
Solvarme: 3,92 TWh
Overskuds-varme
10,71 TWh
Biomasse, Affald, etc.
38,22 TWh
11,4 TWh
Naturgas
12,35 TWh
Kul
0,95 TWh
Olie
32,1 TWh
Elektricitet: 67,66 TWh
Brændsler
Gas-net
El: 0,02 TWh
Biogas og gasificering
Koverterings-tab
10,7 TWh
14,37 TWh
18,87 TWh
17,23 TWh
Kraftvarme-værk & affald
16,43 TWh
Konverteringstab
0,32 TWh
5,56 TWh
Biobrændsel konvertering
H2, CO2, N2
2,99 TWh
27,64 TWh
6,3 TWh
11,23 TWh
3,88 TWh
Eksport
Elforbrug: 44,58 TWh
Elforbrug
7,31 TWh
Varmepumpe og elvarme
1,09 TWh
El. køling
2,44 TWh
Køling
10,68 TWh
1,64 TWh
Fjernvarme: 39,48 TWh
Fjernvarme
13,42 TWh
2,28 TWh
Indv. varme: 17,17 TWh
Indv. forbrug
1,63 TWh
Indv. brændekedler
1,47 TWh
Konverteringstab
5,47 TWh
Transport : 36,1 TWh
Transport
Industri: 17,53 TWh
Industri

1 Baggrund og overordnede principper

Startende i 2006 (Lund & Mathiesen, 2006) og efterfølgende i 2009 (Mathiesen, Lund & Karlsson, 2009) og i 2015 (Mathiesen *et al.*, 2015) har IDA fremsat forslag til, hvordan Danmark kan opnå en energiforsyning baseret 100 pct. på vedvarende energi i 2050. I 2019 har IDA yderligere formuleret en række anbefalinger til, hvad man kan gøre for at fremrykke gennemførelsen af disse forslag med henblik på at kunne opfylde målsætningen om en 70 pct. reduktion i CO_2-emissionerne allerede i 2030. I den forbindelse har IDA også argumenteret for at fremrykke målsætningen om 100 pct. vedvarende energi og CO_2-neutralitet til tidligere end 2050.
I det følgende fremlægger IDA et konkret forslag til, hvordan Danmark kan opnå målsætningen om 70 pct. CO_2-reduktion i 2030 og samtidig være forberedte til næste skridt, en forsyning baseret på 100 pct. vedvarende energi i 2045.

I dette, såvel som i de tidligere forslag fra IDA, er der fokus på:

- Hvordan Danmark opnår målene om vedvarende energi og CO_2-reduktion på en teknologisk hensigtsmæssig og samfundsøkonomisk fornuftig måde.
- Hvordan Danmark kan bruge den grønne omstilling til at skabe industriel udvikling og jobs.
- Hvordan Danmark kan lave den grønne omstilling inden for rammerne af et bæredygtigt forbrug af biomasse.
- Hvordan Danmark kan styrke sin position indenfor energiplanlægning og grønne nøgleteknologier.

Ud over disse fokuspunkter er der formuleret følgende to overordnede principper, som har været bærende for sammensætningen af IDAs forslag:

1. Danmark bør opfylde målsætningen om 70 pct. CO_2-reduktion i 2030 på en måde, så den passer godt ind i at opnå 100 pct. vedvarende energi og CO_2-neutralitet i 2045. Det betyder:

- at vi frem til 2030 bør vælge de teknologier, som er hensigtsmæssige for at kunne tage de næste skridt i årene efter 2030.
- at vi frem til 2030 bør have fokus på at udvikle de nye teknologier, som vi får brug for i næste omgang, også selvom de ikke nødvendigvis gør den store forskel i 2030.

2. Danmark bør opfylde målsætningerne om vedvarende energi og CO_2-reduktion på en måde, så det passer ind i, at resten af Europa og i sidste ende, at resten af verden kan gøre det samme. Det betyder:

- at vi skal forholde os til Danmarks andel af bl.a. den internationale fly- og skibstransport og bidrage til at nedbringe klimagasser fra disse transportformer, også selvom de ikke er med i FN-måden at opgøre vores forpligtigelser på.
- at vi skal holde os inden for Danmarks andel af verdens bæredygtige biomasse ressourcer.
- at vi skal bidrage med vores andel af både fleksibilitetsydelser og reservekapacitet på el-nettet i en europæisk sammenhæng.

2 Metode

De tidligere arbejder med energiscenarier i IDA peger på, at for at kunne finde de mest hensigtsmæssige tekniske og samfundsøkonomiske løsninger, er det afgørende at anlægge en helhedsbetragtning på energisystemet - også formuleret som "det smarte energisystem".
Ved en sådan helhedsbetragtning har man fokus på, hvordan de forskellige sektorer kan hjælpe hinanden, og hvor der er synergier, at man kan finde frem til de bedste og de billigste løsninger.

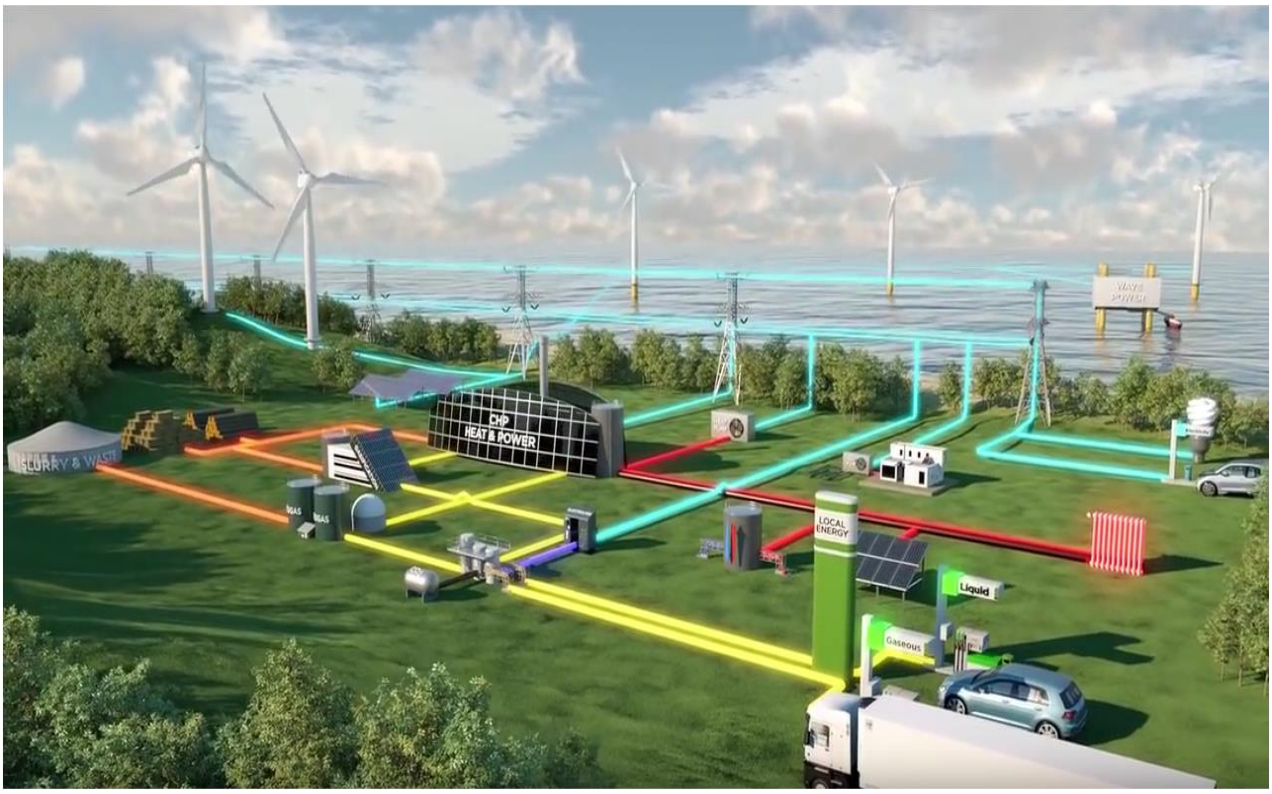
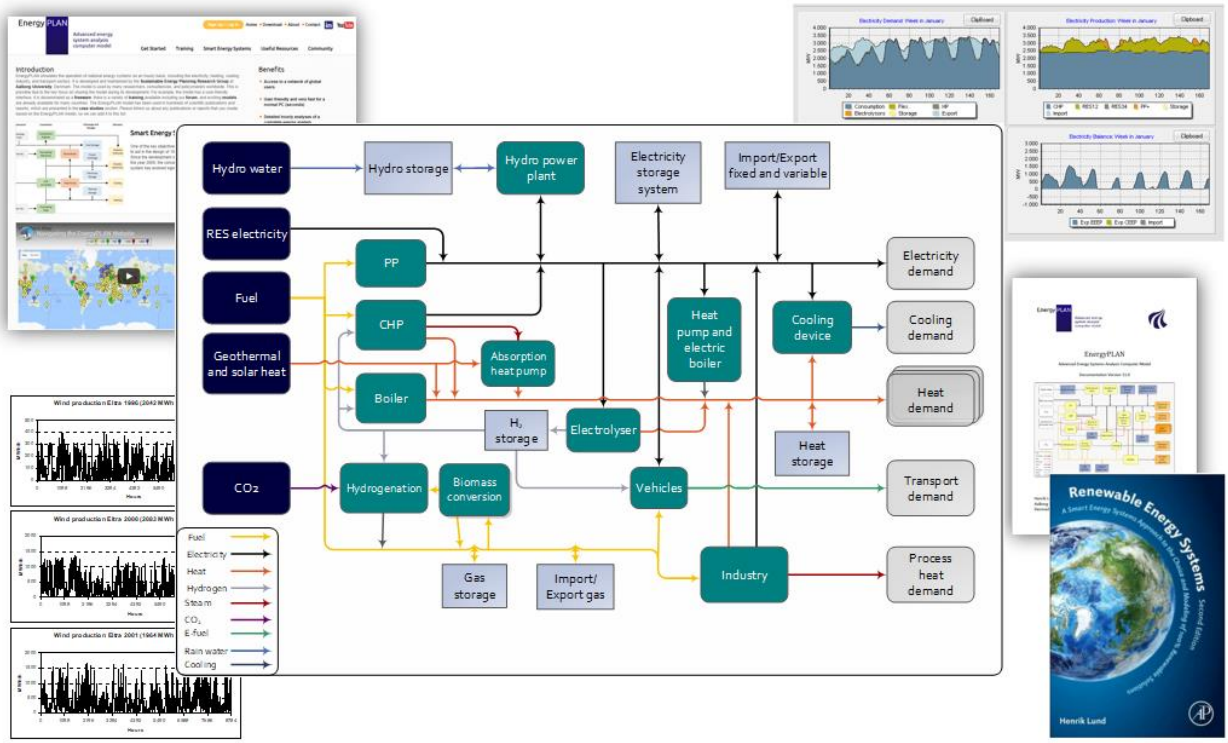


Illustration af det smarte energisystem, hvor der er fokus på sektorintegration og synergier med det formål at finde frem til de bedste og de billigste løsninger. (Se video på her www.energyplan.eu/smartenergysystems)

IDAs forslag er gennemregnet i energisystemanalysemodellen EnergyPLAN, som har særlig fokus på at kunne analysere synergier i det smarte energisystem. Således gennemregner modellen timebalancer for de forskellige sektorer og energilagre samtidigt med, at der er fokus på, hvordan energi kan konverteres mellem sektorernes forskellige energibærere og lagermuligheder.



IDAs Klimasvar er gennemregnet på energisystem analysemodellen EnergyPLAN, som med fokus på det smarte energi systems fordele foretager timesimuleringer med fokus på sektorintegration og energilagring (Lund & Thellufsen, 2019)

Det smarte energisystem tager udgangspunkt i, at der er meget store prisforskelle på om energi lagres som el, varme, køling, gas eller flydende brændsel. Der er derfor store omkostningsreduktioner forbundet med at sikre, at energien lagres på en hensigtsmæssig måde. Tilsvarende, har det stor betydning for omkostningerne til infrastruktur i form el-, gas- og fjernvarmenet.

De detaljerede energisystemanalyser gør, at ubalancer kan kvantificeres og at løsningsforslag i form af forskellige former for energikonvertering og lagring kan gennemregnes.

IDAS Klimasvar har opstillet og gennemregnet en model for årene 2020 og 2030. For 2045 anvendes den tidligere model og analyser fra IDAs Energivison (Mathiesen *et al.*, 2015).

2.1 Modellen for 2020 – ENS2020

Modellen for 2020 er baseret på Energistyrelsens 2018 fremskrivning med enkelte justeringer. CO_2-emissionen for energi- og transport sektorerne ender på ca. 30 Mt CO_2 svarende til lidt under niveauet i den seneste statistik for 2017. Modellen er et bud på, hvordan 2020 forventes at blive - dog før indflydelsen fra corona-krisen.

2.2 Modelleringen af IDAs Klimasvar 2030

Modelleringen af det nye forslag i IDAs Klimasvar er gjort med udgangspunkt i de tidligere modeller og analyser i IDAs Energivision for årene 2035 og 2050. Dog er der foretaget følgende justeringer i grundlaget:

- Udviklingen i transportens energibehov er erstattet med Energistyrelsens seneste basisfremskrivning fra 2019 (BF2019) (Energistyrelsen, 2019b).
- Elforbruget er øget med et forventet elforbrug til store datacentre på 7 TWh i 2030, hvorefter der er et sammenligneligt elforbrug med BF2030

Udover disse justeringer af energibehovet, er en række af de tidligere forslag forøget eller fremrykket for at kunne nå målet om 70 pct. reduktion i 2030 og ønsket om 100 pct. vedvarende energi og CO_2-neutralitet i 2045.

Det er værd at være opmærksom på, at BF2019 fremskriver en række ændringer i energisystemet, som forventes at være realiseret i 2030 med nuværende lovgivning og initiativer. Som følge heraf forholder fx Klimarådet i deres anbefalinger sig alene til de yderligere initiativer og investeringer, der skal til ud over basisfremskrivningen for at opnå en realisering af 70 pct. målsætningen. På det punkt er IDAs Klimasvar anderledes.

IDAs Klimasvar indeholder alle teknologiske ændringer og investeringer hele vejen fra dagens 2020 energi system til en realisering af 70 pct. målsætningen i 2030.

Det gør vi for at kunne vurdere alle omkostninger og alle konsekvenser ift. CO_2 -reduktioner og beskæftigelse for hele ændringen af Danmarks energisystem, også de der allerede er politisk besluttede og derfor indeholdt i Energistyrelsens fremskrivning.

2.3 Modellering af 100 pct. VE i 2045

I forbindelse med udarbejdelsen af IDAs Klimasvar er der ikke foretaget en ny konkret modellering og analyse af år 2045. I stedet bruges det gennemregnede forslag fra IDAs Energivison for året 2050 som pejlemærke. Dog er det nu målet, at realiseringen fremrykkes til 2045, samt at der som følge heraf foretages visse justeringer, hvoraf nogle er nævnt i det følgende. En af de væsentligste er, at det forventes, at andelen af direkte elektrificering af transporten bliver højere end i IDAs Energivision. Det afgørende er dog, at Energivisionen her kan bruges som pejlemærke på, hvilke teknologier Danmark får brug for efter 2030 for at kunne nå helt i mål i 2045.

2.4 Opgørelse af de samfundsøkonomiske omkostninger

Anlægsomkostninger, levetider og drift- og vedligeholdelse er som udgangspunkt baseret på Energistyrelsen og Energinets Teknologikatalog. I omkostningsopgørelsen er de omregnet til en årlig udgift baseret på en samfundsøkonomisk kalkulationsrente på 3 pct. Hvor omkostninger ikke foreligger i Teknologikataloget, eller hvor andre omkostninger er mere relevante, er det angivet under de enkelte afsnit. Mht. brændselspriser og håndterings omkostninger er anvendt Energistyrelsens seneste fremskrivning for 2030 priser (oktober 2019) (Energistyrelsen, 2019d).

Naturgas "handling costs" er ekskl. sunk cost således, at det så vidt muligt afspejler mulighederne for at spare givet, at der er investeret i gasnettet. De konkrete tal fremgår af appendiks A.

Energistyrelsen forventer en gennemsnitlig samfundsøkonomisk elpris på 50,94 EUR/MWh i 2030. I timesimuleringerne af IDAs Klimasvar er der taget udgangspunkt i prisvariationer på Nordpool i 2013 (samme år som der anvendes vind og sol data fra), som er justeret til, så gennemsnitsprisen bliver 51 EUR/MWh. Herudover regner modellen med en vis priselasticitet således, at stor eksport af strøm fra Danmark reducerer prisen, og stor import øger prisen i den enkelte time.

2.5 CO_2-emission fordelt på forbrugssektorer

I IDAs klimasvar er CO_2-emissionen fordelt på forbrugssektorer. I den forbindelse er anvendt følgende principper:

- Den enkelte sektors forbrug af biogas hhv. naturgas er fordelt efter det samme forhold som for hele energisystemet, dvs. ca. 52 pct. er naturgas og resten er biogas i 2030. Der er i 2030 anvendt gas i industri, kraftvarme og kraftværker.
- Den enkelte sektors CO_2-emission fra produktion af el er fordelt efter, hvordan den samlede mængde el er produceret i det samlede energisystem. Dvs. der er en mindre CO_2-emission hidrørende fra naturgas i kraft- og varmeværker i 2030 og en noget større emission i 2020.

Disse principper har alene at gøre med, hvordan den samlede CO_2-emission fordeles på sektorerne.

3 CO_2-reduktioner og opgørelser nu og i fremtiden

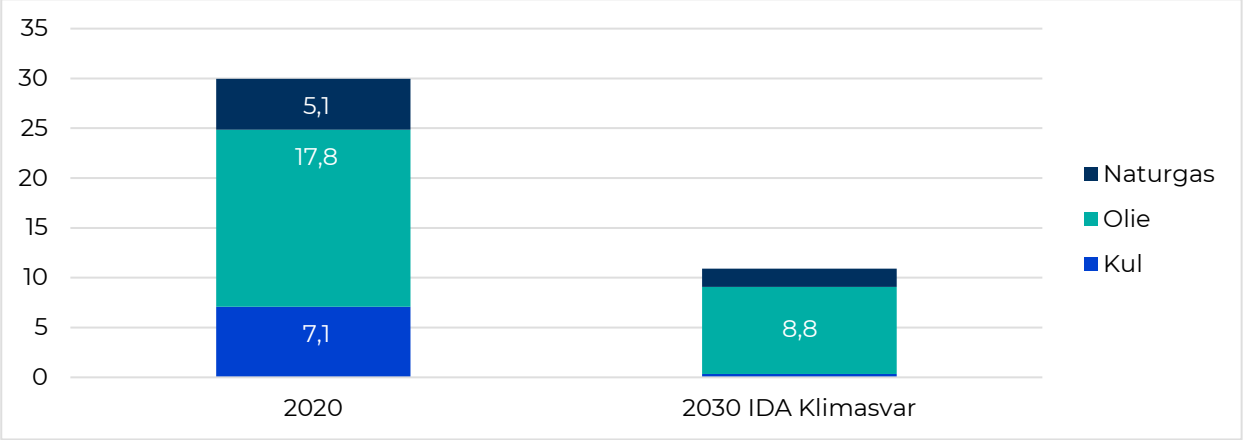
IDAs Klimasvar omfatter ikke alle emissionssektorerne. Vi har afgrænset os til energi og transport (figur 1). Det betyder, at vi har defineret en sammenhæng, hvor de andre sektorer også bidrager til opfyldelsen af den samlede målsætning. Ud over energi og transport drejer det sig om industrielle processer, landbrugets arealanvendelse samt øvrigt, som blandt omfatter affaldsdeponi og spildevandsrensning.

Opgjort efter de seneste regler (hvor arealanvendelsen LULUCF skal medregnes) var klimagasemissionen i 1990 75,7 Mt. Med en 70 pct. reduktion skal den nedbringes til 22,7 Mt i 2030. IDAs Klimasvar forudsætter, at de andre sektorer reducerer fra en forventet emission på 17 Mt i 2020 til 11,7 Mt i 2030. Målet for energi og transport bliver således, at en forventet emission i 2020 på 30 skal reduceres til ca. 11 Mt i 2030. Ved fastlæggelsen af denne fordeling er der skelet til resultaterne af og løsningerne fra de mange erhvervsklimapartnerskaber, der afleverede deres løsningsforslag i marts 2020.

Regeringens målsætning om en 70 pct. reduktion i CO_2-emissionen i 2030 (målt ift. 1990) er defineret iht. regler fastsat af International Panel on Climate Change (IPCC). For det enkelte land medregnes iht. Kyoto og UNFCCC forpligtelserne den CO_2-udledning, som direkte kan henføres til aktiviteten i det gældende land. Ift. energisystemet gælder det fx stationære anlæg og indenrigstransport i landet. Hvorimod international transport ikke medtages i landeopgørelserne. International transport dækker her international land-, fly- og søtransport.

Emissionerne for fossile brændsler henføres til det land, hvori de afbrændes, mens det for biomasse gælder, at emissionerne skal henregnes til det land, som biomassen stammer fra. Emissionerne indgår som en del af punktet LULUCF. LULUCF er en forkortelse for Land Use, Land Use Change and Forestry. Det betyder, at der ingen emission skal medregnes for importeret biomasse, samt at emissionen fra indenlands biomasse er med i landets opgørelse af LULUCF. IDAs Klimasvar udregner CO_2-emissionen efter UNFCCC metoden, så der direkte kan sammenlignes ift. opfyldelsen af 70 pct. målsætningen. Dvs. at emissionerne fra den danske andel af international transport og importeret biomasse ikke er medtaget. Opgjort på denne måde er CO_2-emissionerne vist i figur 6 fordelt på brændsel.

Figur 6. CO_2-emissioner fordelt på brændsler opgjort efter FN-opgørelsesmetoden.



IDAs Klimasvar peger dog på, at Danmark allerede nu bør forholde sig til international transport, samt mængden og typen af biomasse vi anvender i vores energisystem. Der er derfor her foretaget to regnestykker, hvor betydningen af disse to punkter er illustreret.

I det første regnestykke er vist, hvordan CO_2-emissionerne ser ud, hvis der indregnes et CO_2-bidrag opgjort efter den såkaldte "Cradle-to-gate" metode set i en 100 års tidshorisont.

Opgørelsen er gjort med udgangspunkt i tabel 4-4 side 105 i rapporten *Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system* (SDU & COWI, 2014). Ud fra denne rapport, samt samtaler med Henrik Wenzel (SDU) om fortolkning af tallene inkl. seneste justeringer, er anvendt følgende CO_2-emissions faktorer for biomasse:

- For biogas og biogent affald er anvendt faktoren 0. For biogas vil faktoren være negativ, som følge af de positive effekter biogas har i landbruget. Her forudsættes disse dog medtaget under landbrugssektoren.

- For afbrænding af halm er der regnet med en faktor på 11 kg CO_2 per GJ. Når faktoren ikke er nul, er det et udtryk for, at halm alternativt ville være nedmuldet og at en del af kulstoffet, derved vil blive bevaret som humus i jorden. Hvis halm bruges til biogas, er faktoren 3-4 kg CO_2 per GJ.

- For træflis fra danske skove er der tilsvarende regnet med en faktor på 0,02 kg CO_2 per GJ. Det er forudsat, at der er tale om udtynding, der alternativt ville rådne i skovbunden, men her ender en væsentlig mindre del som kulstof i jorden.

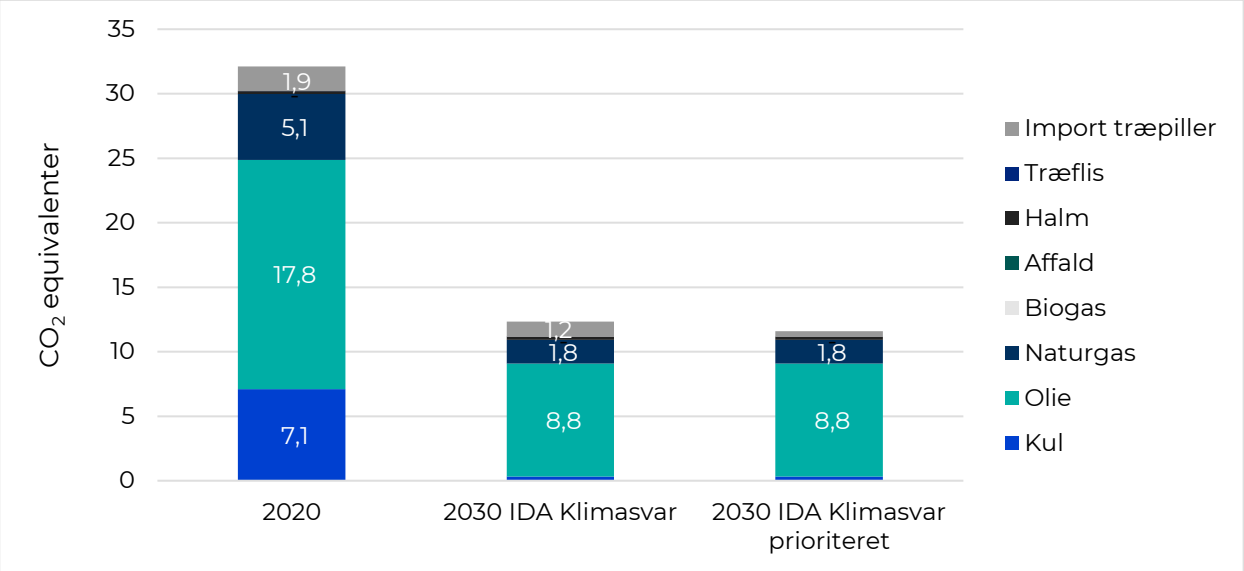
- Importeret træpiller og træflis afhænger af, hvor det stammer fra, og i rapporten angives værdier mellem 0 og 200. Ifølge modellerne bag SDU & COWI studiet fra 2014 vil det ligge i området 30-40 kg CO_2 per GJ, mens andre kilder mener, det bør ligge i et niveau af 9-17 kg CO_2 per GJ. Her er valgt 25 kg CO_2 per GJ.

Det skal understreges, at især de to sidste værdier er behæftet med store usikkerheder, idet de afhænger af oprindelsen af træressourcer. Der er også studier, der viser, at hvis man gennem skovdrift kan undgå metan udslip i en oprindelig urskov, vil det have en stor positiv effekt. Det

vurderes dog ikke umiddelbart, at træpiller, der importeres til Danmark, vil stamme fra skov, der alternativt ville have ligget urørt som urskov.

Resultatet er vist i figur 7. Opgjort på denne måde udgør CO_2-bidraget fra biomasse i størrelsesordenen 1,9 Mt i 2020 (søjle 1) faldende til 1,2 Mt i 2030, hvis biomassen til de store kraft/varmeværker forsat importeres (søjle 2). Hvis der aktivt prioriteres kun at aftage træpiller/flis fra udtyndingstræ/ammetræ fra bæredygtig skovdrift, vil bidraget kunne sænkes til i størrelsesorden det halve, dvs. 0,4 Mt i 2030 (søjle 3).

Figur 7. Emissioner fordelt på brændsler "Cradle-to-gate" i en 100 år tids horisont



3.1 Den danske andel af den internationale transport

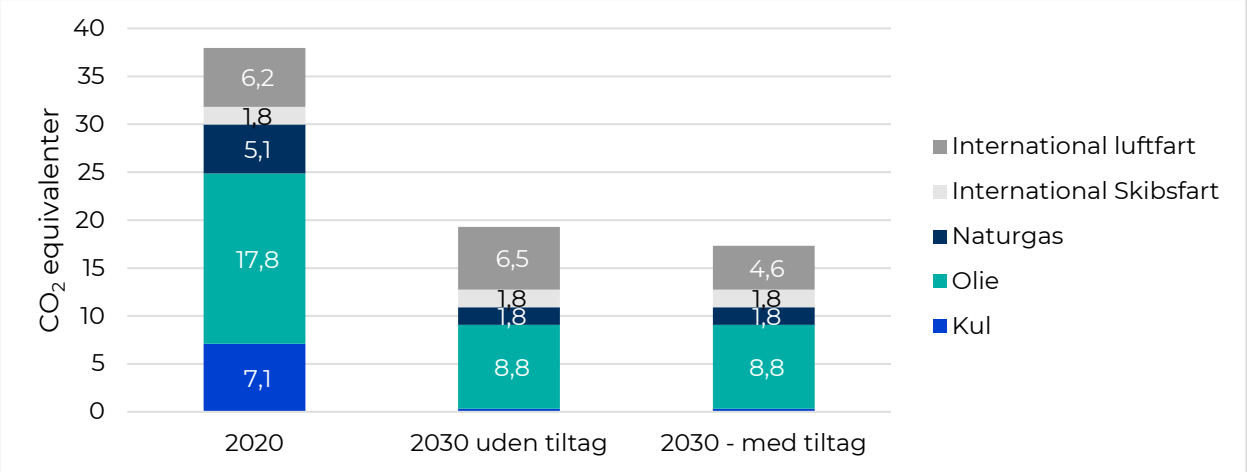
I det næste regnestykke er indflydelsen af international transport forsøgt illustreret. Princippet fra IDAs Energivision er at afgrænse transportsektoren på en måde, så hvis alle andre lande gør det samme, vil vi få hele verdens energiforbrug med en gang og kun en gang. Her er der til at illustrere pointen anvendt Energistyrelsens tal for international luftfart, som i 2020 er opgjort til forventet 41,6 PJ stigende til 44,1 PJ i 2030. Yderligere er der tillagt et tilsvarende brændselsforbrug til den danske andel af international skibstransport på 24,9 PJ. I appendiks B er der nærmere redegjort for valget at disse tal.

Ud over selve CO_2-emissionen har fly også andre klimaeffekter. Det drejer sig bl.a. om NOx'er og contrails fra vanddamp (de hvide striber efter flyene) udledt i de øvre atmosfærelag.

Der er store forskelle på de enkelte flyvninger. Drivhusgasemissionen for et propelfly i lav flyvehøjde vil næsten kun bestå af CO_2, mens et interkontinentalt jetfly fra Europa til Nordamerika vil flyve i stor højde i arktiske områder. hvor grænsen til de øvre atmosfærelag ligger lavest og dermed har en drivhusgaseffekt, der er adskillige gange større end den, der kommer fra CO_2. Det er et felt, hvor der er store forskningsmæssige usikkerheder. Den tyske organisation *Atmosfair*, der sælger kompensationer for flyrejser, har gjort et omfattende arbejde for at kortlægge dette

fænomen, så man som flyrejsende kommer til at kompensere den fulde mængde drivhusgasser. Deres model går ud fra, at flyvning under 9.000 m's højde kun har CO_2-klimaeffekter, mens flyvning over 9.000 m har non- CO_2-klimaeffekter, der er dobbelt så store som CO_2-effekten – altså en faktor 3. Her er beregningerne vist med en antagelse om en faktor 1 for national og en faktor 2 for international luftfart. Med disse forudsætninger ser regnestykket ud som vist i figur 8.

Figur 8. Emissioner fra brændsler og international skibs- og luftfart, dansk andel



Uden tiltag vil international luftfart bidrage med i størrelsesordenen 6-7 Mt i 2030. Hvis der gennemføres tiltag (som beskrevet senere) til at dæmpe væksten, erstatte flybrændstof med elektrobrændstof eller bæredygtigt biobrændstof samt reducere flyvehøjden, vil bidraget kunne sænkes til fx 4-5 Mt i 2030. Det sidste forudsætter (som beskrevet senere) dog et indgående internationalt samarbejde.

Ovenstående regnestykker er, som beskrevet behæftet med en vis usikkerhed, men de viser pointen om, at Danmark bør forholde sig til forhold omkring egne udledninger, der ikke er inkluderet i 70 pct. målsætningen. IDAs Klimasvar inddrager disse forhold på følgende måde:

1. IDAs Klimasvar tager fat i biomasseproblematikken ved at fokusere på,
- at Danmark nedbringer sin afhængighed af afbrænding af biomasse,
- omlægger til primært indenlandske biomasse ressourcer med prioritet til biomasse med lave CO_2-emissioner, samt
- forbereder Danmark på at begrænse os til Danmarks andel af mængden af et globalt bæredygtigt biomasseforbrug.

2. IDAs Klimasvar medtager anbefalinger til, hvordan Danmark kan nedbringe CO_2-emissionerne på den internationale transport allerede i 2030 og på sigt gøre den CO_2-neutral i 2045.

4 IDAs forslag opdelt på fire forbrugssektorer og fem tværgående temaer

I det følgende beskrives IDAs forslag opdelt på fire forbrugssektorer og med fokus på fem tværgående temaer.

De fire forbrugssektorer

Varme: Opvarmning af bygninger
Industri: Service, erhverv, tung industri inklusiv Nords're
Transport: Person og godstransport inklusive fly og skibe.
El: Primært det "klassiske elforbrug", idet nyt elforbrug til varme, transport og industri medtages under de respektive sektorer i form af vindkraft. Sektoren inkluderer den overordnede indregulering og udveksling med el.

De fem tværgående temaer

Energieffektivitet: Herunder opfyldelsen af EU's energieffektiveringsdirektiv.
Sektorintegration: Inklusive energilagring, konvertering og elektrificering samt integration med el-, gas- og fjernkøling-nettene samt Pt.
Biomasse: Med fokus på opfyldelsen af kravet om bæredygtig biomasse.
Vedvarende energi: Hvilke former for VE og hvor meget.
Teknologiske udfordringer: Oplistning af de vigtigste teknologiske udfordringer med fokus på hvordan vi som samfund forbereder os på tiden efter 2030. Her fremhæves også vigtige eksport potentialer.

De enkelte sektorer vurderes herefter på følgende parametre:

- Bidrag til CO_2-reduktionsmålsætningen (Mt CO_2/år).
- Den samfundsøkonomiske omkostning herunder sektoren gennemsnitlige CO_2-reduktionsomkostning (DKK/ton CO_2).

Endelig oplistes en række forslag til centrale virkemidler for hver sektor. Listen over virkemidler skal ikke betragtes som en udtømmende liste, der korresponderer én til én med en realisering af IDAs Klimasvar. Listen skal ses som et idekatalog, der supplerer andre gode forslag, som er bragt i spil af klimaerhvervspartnerskaberne, Klimarådet og andre deltagere i debatten om en dansk klimahandlingsplan.

IDAs virkemiddelforslag har særlig opmærksomhed på, hvad der er vigtigt for at sikre folkelig opbakning og en hensigtsmæssig teknologisk udvikling ift. en god udnyttelse af Danmarks styrkepositioner og potentialer for industriel udvikling og arbejdspladser. Forslagene har derfor fokus på:

- At udnytte teknologiske styrkepositioner og skabe arbejdspladser.
- At fremme en teknologiudvikling der kan bringe os videre efter 2030.
- At sikre energieffektivitet bla. iht. EU's energieffektiviseringsdirektiv.
- At tilstræbe at vi opnår 70 pct. målsætningen på en samfundsøkonomisk effektiv måde.
- At sikre en bred folkelig inddragelse i gennemførelse af de politiske målsætninger.

Oversigt over IDAs Klimasvar

IDA 70 pct. 2030 - Oversigt	Varme	Industri	Transport	Elektricitet
Energieffektivitet (opfyldelse af EU's energieffektiviseringsdirektiv)	- Besparelser i alle bygninger (12 pct. i 2030 og 30 pct. i 2045) - Gradvis omlægning til 4G fjernvarme (halvt i 2030, helt i 2045) - Anvendelse af bygningsreglementets renoveringsklasser som mål for renovering	- Besparelser og effektiviseringer (24 PJ inkl. effektiviseringer i el, varmepumper, fjernvarme og fjernkøling) - Besparelser i datacentre (5 pct. af el)	- Afdæmpning af vækst i personbil km ift. vækst i basisfremskrivningen (1,6 pct./år i stedet for 2 pct./år), men stadig flere køretøjer end i dag. - Omlægning af personkm fra biltransport (2 pct.) og fly (10 pct.) til tog og kollektiv trafik nationalt - Omlægning af personkm fra biltransport (2 pct.) til cykler - Afdæmpe væksten i brændselsforbrug med 10 pct. i national og internationale fly	- 10 pct. besparelser i det "klassiske elforbrug" i 2030 (20 pct. i 2045)
Sektorintegration (lager, konvertering og elektrificering)	- Olie- og gasfyr afvikles inden 2030 og erstattes med fjernvarme og individuelle varmepumper - Fjernvarme udvides til 63 pct. af varmebehovet, primært på bekostning af naturgasområder - Individuelle varmepumper, primært udenfor eksisterende naturgasområder - Overskudsvarme fra industri og datacentre - Overskudsvarme fra elektrolyse anlæg - Fjernvarme til biogasanlæg og industri - Store varmelagre, særligt i større fjernvarmenet	- Omlægning til fjernvarme (2 TWh) - Fjernkøling med kølelagre (0,8 TWh) - Varmepumper for resterende rumvarmebehov (3,5 PJ) - El erstatter fossil (17 PJ inkl. varmepumper) - 300 MW offshore vind erstatter 3,5 TWh Naturgas på boreplatformene	- Benzin og diesel til biler reduceres fra nu 102 PJ til 59 PJ svarende til at antallet reduceres fra 2,6 til 1,5 -2 millioner biler (afhængigt af hvor meget de kører). - 1,3 mio. el-biler eller plug-in-hybridbiler i 2030. - 35 pct. af busser og 30 pct. af varevogne på batteridrift eller plug-in-hybrid. - 20 pct. af brændselsforbruget i motorcykler og i forsvaret på el i 2030. - 5 pct. lastbiler på batteridrift eller plug-in-hybrid - 5 pct. af lastbiler direkte el i 2030 (e-roads) - 20 pct. elektrofuels (DME/metanol) til lastbiler og varevogne (9,8 PJ) i 2030 - 10 pct. elektrofuels (ammoniak) til skibe i 2030 (0,6 PJ). - 2 pct. eletrofuels (jetfuel) til nationale fly (0,3 PJ). - 1.200 MW elektrolyse - CO_2-capture til elektrofuels fra en kombination af punktkilder	- Indregulering af vind, sol og bølgekraft med varmepumper og elektrolyseanlæg fra de andre sektorer - Nedlæggelse af kulkraftværker - Fokus på nedregulering af eksisterende biomasseværker når der er overskud af elproduktion fra vind-, sol- og bølgekraft - Bevarelse af decentrale gasfyrede kraftvarmeværker samt opførelse af nye gasfyrede kraftvarmeværker for at sikre effekt
Biomasse (holdes på et bæredygtigt niveau)	- Træ, affald og biogas i kraft/varmeværker - Træflis og halm i fjernvarmekedler	- 23 PJ Biomasse erstatter fossile brændsler - 8 PJ Biogas erstatter fossilt fossile brændsler	- 200 MW forgasning af træflis (syngas og CO_2 til elektrofuels)	- Biogasproduktionen forøges til 35 PJ i 2030 - Træflis og halm i kraftvarmeværker og fjernvarmekedler

Affald reduceres til fordel for genbrug/genanvendelse	- Træpiller til et mindre antal individuelle fyr			
Vedvarende energi	- 800 MW vindmøller til individuelle varmepumper - 8-9 PJ solvarme til individuelle boliger til supplement af varmepumper - 500 MW / 13-14 PJ geotermi til fjernvarme - 500-600 MW vindmøller til store varmepumper i fjernvarmen - 6-7 PJ solvarme til fjernvarme	- 300 MW vindmøller til boreplatforme	- 2.700 MW Vindmøller til el køretøjer, CO_2-capture og elektrolyse	- 130 MW bølgekraft - 5.000 MW solceller på store tage (nu 1000 MW) - Mindst 4.800 MW onshore vindkraft onshore (nu 4.200 MW) - 6.630 MW vindkraft offshore (nu 2.000 MW)
Teknologiske udfordringer	- Store sæson varmelagre, særligt i fjernvarmeforsyningen - Geotermi - Overgang til 4G fjernvarme systemer - Overskudsvarme fra datacentre og elektrolyseanlæg til fjernvarme	- Integration af datacentre i fjernvarmesystemet - Produktionsomlægninger i industrien til el, biomasse og biogas	- Storskala intelligent opladning af elkøretøjer - E-roads til lastbiler med delvis batteridrift - Fra simpel årlig roadpricing til avanceret GPS baseret roadpricing - Elektrolyseanlæg med fleksibel drift (fuldlasttid på cirka 50 pct.), herunder mere effektiv elektrolyse (SOEC) - Integrerede fleksible elektrofuelsproduktioner med, store brintlagre, Carbon Capture anlæg, CO_2-lagre og kemisk syntese (DME, Metanol, Ammoniak), herunder opskalering - Storskala forgasning af biomasse, pyrolyse og HTL	- Fleksibel drift af eksisterende biomasse kraftvarmeværker - Bølgekraft (vindmøller som alternativ) - Intelligent integration af vind og sol i el-nettet (herunder placering af nye anlæg og undgå unødigt udbygning af el-nettet) - Anvendelse af halm til biogas

5 Varme

Varmesektoren omfatter opvarmning af bygninger i Danmark. Det nuværende nettovarmebehov er opgjort til 181 PJ (50,38 TWh) i 2020. Frem mod 2030 forventes en forøgelse af nettovarmebehov på lidt over 8 PJ (2,35 TWh) som følge af nybyggeri. Hertil kommer yderligere et mindre behov i forbindelse med udvidelser af fjernvarmenettet fra varmebehov, der i 2020 er medtaget under industri, som bliver tilsluttet fjernvarmen.

5.1 Energieffektivitet og varme

Som redegjort for i IDAs tidligere energiplaner og bekræftet af en række rapporter (Henrik Lund *et al.*, 2014; Mathiesen *et al.*, 2016; EA Energianalyse, 2018) er det samfundsøkonomisk fordelagtigt at nedbringe varmeforbruget i forbindelse med renovering af eksisterende boliger. Konkret foreslås her en 30 pct. besparelse frem mod 2045. Den bedste og billigste måde at gennemføre disse besparelser på er løbende i forbindelse med renoveringer. IDAs Klimasvar regner derfor med en besparelse på 1,2 pct. årligt, svarende til 12 pct. i 2030.

Energirenovering er afgørende ikke kun for at nedbringe varmebehovet, men også for at forberede bygningerne til lavtemperatur fjernvarme og dermed overgangen til 4. generations (4G) fjernvarmeforsyning (H. Lund *et al.*, 2014). 4G fjernvarme sparer på grund af lavere temperatur nettab i fjernvarmeledningerne, men endnu vigtigere gør dette tiltag, at fjernvarmeforsyningen bliver markant mere effektiv. Lavere temperaturer øger effektiviteten på de fremtidige kilder til grøn varme som: Solvarme, varmepumper, kraft/varme, geotermi samt overskudsvarme fra industri og datacentre. I den forbindelse er det derfor afgørende, at man ved energirenovering af boligerne har fokus på såvel at nedbringe varmebehovet som at sænke kravet til, hvilken temperatur fjernvarmevandet eller varmepumpen skal forsyne med (Mathiesen *et al.*, 2016).

Konkrete tiltag
- Besparelser i alle bygninger (12 pct. i 2030 og 30 pct. i 2045).
- Gradvis omlægning til 4G fjernvarme (halvt i 2030, helt i 2045).
- Anvendelse af bygningsreglementets renoveringsklasser som mål for renovering.

5.2 Sektorintegration og varme

IDAs tidligere energiplaner. samt øvrige analyser og rapporter (bl.a. varmeplan Danmark) (Dyrelund *et al.*, 2008), peger på det samfundsøkonomisk hensigtsmæssige i at omlægge Danmarks ca. 500.000 huse med individuelle olie- eller naturgasfyr til enten fjernvarme eller individuelle varmepumper. Samt i den forbindelse at udvide fjernvarmeområdet med henblik på dels at kunne anvende mere overskuds varme og dels at kunne tilføre det samlede system bedre fleksibilitet ift. indregulering af el-sektoren. I forbindelse med såvel udnyttelsen af overskudsvarme som tilvejebringelse af fleksibilitet er store varmelagre et afgørende (og i systemsammenhæng en meget omkostningseffektivt) element.

Konkrete tiltag
- Olie- og gasfyr afvikles inden 2030 og erstattes med fjernvarme og individuelle varmepumper.
- Fjernvarme udvides til 63 pct. af varmebehovet, primært på bekostning af naturgasområder.
- Individuelle varmepumper, primært udenfor eksisterende naturgasområder.
- Overskudsvarme fra industri og datacentre.
- Overskudsvarme fra elektrolyse anlæg.
- Fjernvarme til biogasanlæg og industri.
- Store varmelagre, særligt i større fjernvarmenet.

5.3 Biomasse og varme

IDA foreslår de eksisterende biomasse kraft/varmeværker videreført til 2030 (Se afsnittet om el) men gradvist suppleret af store varmepumper, geotermi mv. Desuden anvendes der biomasse (halm og træflis) i fjernvarmekedler og lignende.

Fjernvarmebidraget fra affaldsafbrænding regnes som halveret, så energiudnyttelse ikke står i vejen for mere genbrug og genanvendelse.

Konkrete tiltag
- Træ, affald og biogas i kraft/varmeværker.
- Træflis og halm i fjernvarmekedler.
- Træpiller til et mindre antal individuelle fyr.

5.4 Vedvarende energi og varme

Generelt foreslås der en grøn varmeforsyning. Det betyder dels, at der bør etableres vindkraft svarende til elforbruget i de individuelle såvel som de store varmepumper, og dels at fjernvarme baseres på enten overskudsvarme eller vedvarende energi.

Konkrete tiltag
- 800 MW vindmøller til individuelle varmepumper.
- 8-9 PJ solvarme til individuelle boliger til supplement af varmepumper.
- 500 MW / 13-14 PJ geotermi til fjernvarme.
- 500-600 MW vindmøller til store varmepumper i fjernvarmen.
- 6-7 PJ solvarme til fjernvarme.

5.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af varmesektoren

Generelt er varmesektoren karakteriseret ved, at de fleste teknologier er velkendte og afprøvede. De største udfordringer, og dermed behov for forskning og udvikling, forventes at være i forbindelse storskala udnyttelsen af følgende teknologier:

- Store sæson varmelagre, særligt i fjernvarmeforsyningen.
- Geotermi.
- Overgang til 4G fjernvarme systemer.
- Overskudsvarme fra datacentre og elektrolyseanlæg til fjernvarme.

5.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af varmesektoren

- Kravene til klimaskærmen i BR2018 er tilstrækkeligt mht. mål for klimaskærmen til nybyggeri. Der er brug for mere fokus på de eksisterende bygninger, bl.a. på, at de ved renoveringer overholder kravene i BR2018.

- Bygningsreglementet skal adskille produktion og forbrug fremover, så VE eller varmepumper ikke kan tælle med som forbedringer i klimaskærmen. Der er behov for en adskilt politik for klimaskærmen (BR), for solceller og for udbredelse af fjernvarme/varmepumper. Fremtidige stramninger af BR skal også have fokus på indlejret energi og CO_2 i bygningsmaterialer og på at bygningen understøtter god adfærd.

- Udvidelse af begrebet "energieffektiv bygning" så der stilles krav til såvel varmeforbrug (kWh/m^2) som lavtemperatur forsyning (55 frem/25 retur) som opvarmningsform (fjernvarme hvis muligt ellers varmepumpe).

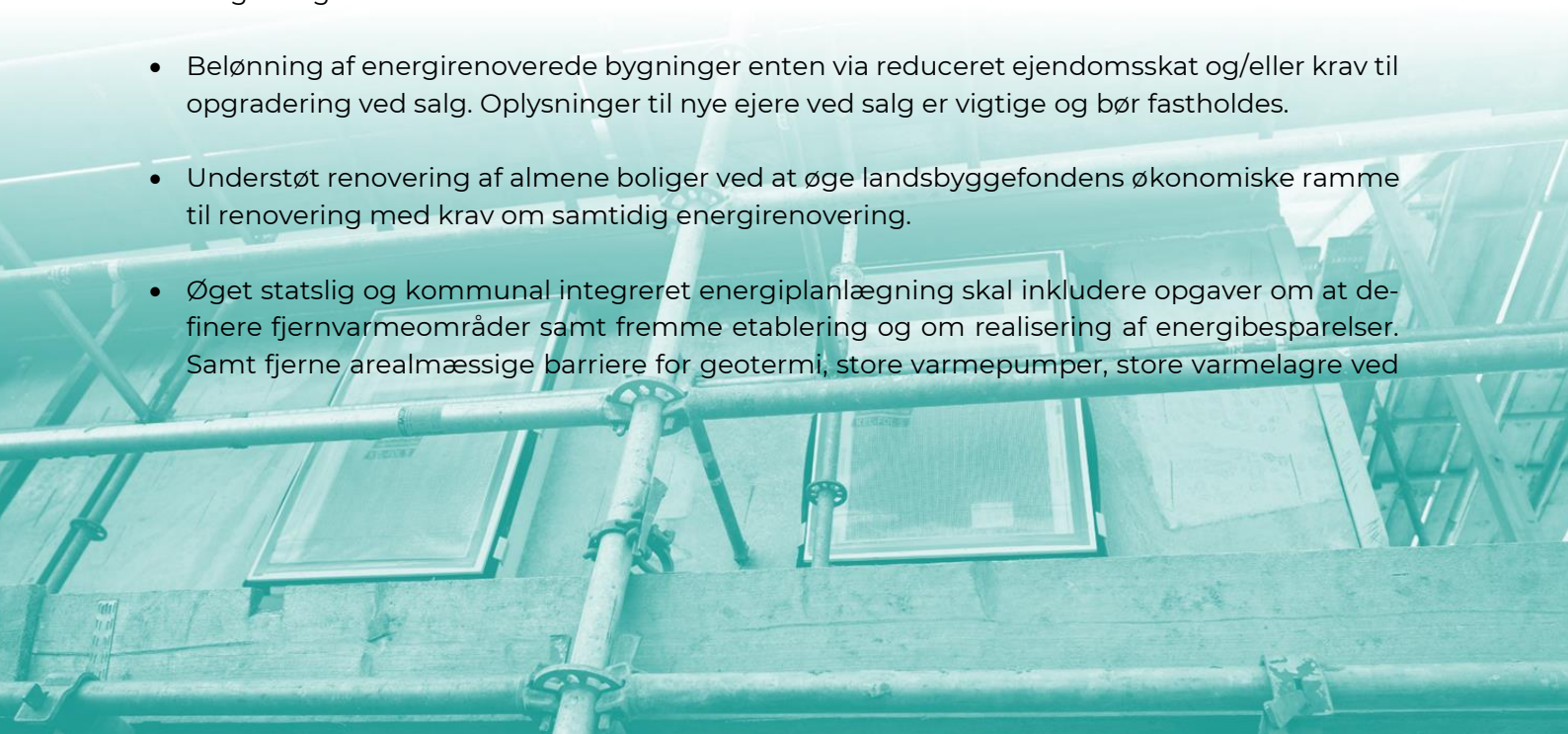
- Et mål om 12-15 pct. besparelser i 2030 kræver at danskerne har meget højere opmærksomhed på bygningernes energiforbrug ved planlagte generelle renoveringer. Forbruget i bygninger skal reduceres med over 1,5 pct. pr år (mod en stigning pr. m^2 de seneste 5 år). Indsatser og virkemidler skal have særlig fokus på bygninger fra før 1980. Man kan overveje gratis rådgivning til bygninger før 1980 samt i landområder.

- Tilskud til energirådgivning i kombination med offentlig kaution for langfristede lavt forrentede energirenoveringslån samt retskrav her på 100 pct. variable tariffer (ingen fast del på fjernvarme). Kautionen skal også gælde for huse i landområderne og kan betinges af energirådgivning.

- Belønning af energirenoverede bygninger enten via reduceret ejendomsskat og/eller krav til opgradering ved salg. Oplysninger til nye ejere ved salg er vigtige og bør fastholdes.

- Understøt renovering af almene boliger ved at øge landsbyggefondens økonomiske ramme til renovering med krav om samtidig energirenovering.

- Øget statslig og kommunal integreret energiplanlægning skal inkludere opgaver om at definere fjernvarmeområder samt fremme etablering og om realisering af energibesparelser. Samt fjerne arealmæssige barriere for geotermi, store varmepumper, store varmelagre ved



kommunal prioritering af arealer til nye energianlæg –særligt ved byudvikling af nye byområder.

- Fjernelse af barrierer for udnyttelse af overskudsvarme fra industri og datacentre til fjernvarmen. Fjernelse af barrierer for udbygning med store varmepumper i fjernvarmesystemerne (afgifter, elnettariffer og kraft/varme-krav).

- Forbud mod olie- og gasfyr fra 2029. Forbud nye fyr fra 2021, evt. med dispensationsmulighed hvis der er lavet en konkrakt om tilslutning af fjernvarme.

- Justering af de samfundsøkonomiske beregningsforudsætninger, så de indeholder en højere eksternalitetsomkostning for CO_2 i tråd med Klimaloven.

5.7 Samfundsøkonomi og varme

Varmesektorens tiltag kræver betydelige investeringer. De største er vist i tabellen herunder. Omkostningerne til vindkraft er regnet ud fra den andel, der svarer til det samlede el-behov til individuelle og store varmepumper.

Tabel 2. Investeringer i varmesektoren i hovedtal

	Investeringsbehov	**Årlige afskrivning og rente i 2030**
	Milliarder DKK	*Millioner DKK/år*
Bygningsrenovering	123,9	5.360
Individuelle varmepumper	70,3	5.114
Fjernvarmeudvidelser og 4G fjernvarme	29,6	1.467
Vindmøller	15,6	829
Store varmepumper	8,7	499
Geotermi	8,3	440
Solvarme, overskudsvarme og varmelagre	3,4	176
Sum	**260**	**13.885**

De fleste investeringer er regnet med udgangspunkt i Teknologikataloget, dog undtagen:

- Investeringerne til energirenovering er sat til 124 mia. kr. Dette er baseret på projekt om IDAs Energivision (Mathiesen *et al.*, 2015) samt analyser lavet i forbindelse med net zero buildings projektet (NZEB) (Henrik Lund *et al.*, 2014). Her er omkostninger øget med 20 pct. for at tage højde for dels en fremskydning og dels en vis rebound-effekt.

- Investeringer i 4.G fjernvarme er fundet med udgangspunkt i resultaterne af 4DH projektet (Lund *et al.*, 2018). Her regnes det med at halvdelen af fjernvarmen er omlagt til 4G fjernvarme. Det giver en investering på 4,9 mia. kroner.

- Investeringer i fjernvarmeudvidelser er fundet i varmeplan Danmark (Dyrelund *et al.*, 2008). Her regnes det med at omkostning fra et nettovarmebehov på 27,9 MWh/år til 37,6 MWh/år

(63 pct.) på 33 Mia.kr. i 2006 priser svarende til 40 mia.kr. i 2020 priser. Da en del af denne omlægning allerede er sket, regnes der med, at der i perioden 2020 til 2030 samlet skal investeres 20 mia. kroner i udvidelse af fjernvarmenettet. Hertil kommer, at der skal investeres i nye fjernvarmeenheder til bygninger der skal tilsluttes fjernvarme. Baseret på Energistyrelses teknologikatalog vil disse enheder samlet have en investering på 4.7 mia. kroner.

- For at estimere effekten af varmetiltagene sammenlignes IDAs Klimasvar med en reference situation, hvor tiltagene ikke gennemføres, men hvor varmebehovet stiger som forudsat frem til 2030. Hovedtal for denne sammenligning er vist i tabel 3. Generelt spares der omkostninger til brændsel til gengæld for øgede investeringer. Dog spares der også investeringer til fx individuelle olie- og gasfyr, som der ikke er behov for i IDAs Klimasvar

Tabel 3. Hovedtal for varmesektoren sammenlignet med en reference hvor tiltagene ikke gennemføres

	IDAs Klimasvar	**IDAs Klimasvar uden varmetiltag**	**Difference**
	Millioner DKK/år i 2030	*Millioner DKK/år i 2030*	*Millioner DKK/år i 2030*
Brændsel	25.058	35.865	-10.808
Elbalance	83	53	30
Variable drift og vedligehold	315	398	-83
Fast drift og vedligehold	27.368	28.103	-735
Investering	110.085	98.903	11.183
Sum	**162.908**	**163.320**	**-413**
	Mton	*Mton*	*Mton*
CO_2-emission	11,52	14,52	-3,00
Gennemsnitlig CO_2-reduktionsomkostning		DKK/ton CO_2	-138

Varmesektorens CO_2-emission er udregnet til 3,0 Mt i 2020. I referencen ville emissionen stige til 3,6 Mt. I IDAs Klimasvar reduceres CO_2-emissionen med 3,0 Mt til 0,6 Mt i 2030. Den resterende CO_2-emission på 0,75 Mt hidrører primært fra, at kraftvarmeværker og fjernvarmekedler delvist fyres med naturgas.

CO_2-reduktionsomkostningen for varme lander på -138 kr/t CO_2 (tabel 3). Det skal dog fremhæves, at dette tal er udregnet med **stor usikkerhed.** De samfundsøkonomiske omkostninger til investeringer øges med lidt over 11 milliarder kr., som opvejes af en tilsvarende besparelse på brændsler og drift og vedligeholdelse. Resultatet er en mindre besparelse på 413 millioner kr., men i sagens natur skal der kun ændres ganske lidt ved forudsætningerne, før dette tal bliver en udgift i samme størrelsesorden.

Størrelsen af CO_2-reduktionen samt selve det forhold, at investeringerne nogenlunde opvejes af besparelserne, vurderes at være robust. Men om man lander på 0 eller et lille plus eller minus er meget usikkert, derfor skal CO_2-reduktions omkostningstallet tages med store forbehold.

6 Industri

Industri omfatter industri, service og erhverv samt Nordsøen. Desuden er den forventede vækst i elforbruget til datacentre også medtaget under dette punkt.

For Nordsøen regnes der jf. basisfremskrivning 2019 (Energistyrelsen, 2019b) med et naturgasforbrug på 4 TWh i 2020 stigende til 5 TWh i 2030 ekskl. flagring, som jf. CO_2-emissions afsnittet er medtaget under industrielle processer. De 5 TWh er naturgas anvendt i gasturbiner på Nordsøen til dækning af egetforbrug på boreplatformene (Energistyrelsen, 2019c).

For industri samt service og erhverv (i det følgende kaldet industri) er der taget udgangspunkt i IDAs Energivision fra 2015. Heri er industriens samlede energiforbrug opgjort til 194 PJ (54 TWh) i 2015 med en forventet vækst i referencefremskrivningen til 274 PJ (75 TWh) i 2050. I det følgende er dette forslag tilpasset 2030, hvor der regnes med et referenceenergiforbrug på 199 PJ, samt 2045 hvor der regnes med 229 PJ. Disse tal indeholder i udgangspunktet et elforbrug, som er medtaget som en del af det "klassiske elforbrug" under elsektoren. Ændringerne i elforbruget som følge af hhv. energieffektiviseringer og elektrificering er dog behandlet her som en del af industrisektoren.

IDAs forslag omfatter formuleringen af følgende prioriterings hierarki fra IDAs Energivision

1. Besparelser.
2. Forsyning fra fjernvarme og fjernkøling til industri samt bidrag af overskudsvarme den anden vej.
3. Varmepumper til at dække resterende lavtemperatur forbrug.
4. Erstatte fossile brændsler med el.
5. Erstatte fossile brændsler med fast biomasse.
6. Erstatte fossile brændsler med biogas.

Hertil kommer et øget elforbrug til nye store datacentre på forventet 7 TWh i 2030, hvoraf en væsentlig del går til køling af datacentrene. Nye og planlagte datacentre udgør et meget stort potentiale for fjernvarme, hvis overskudsvarmen kan udnyttes. Hvis fx blot halvdelen (3,5 TWh) kan udnyttes, svarer det til at kunne dække i størrelsesordenen 10 pct. af det nuværende fjernvarmebehov. Da der ikke kun bygges datacentre i Danmark, men mange andre steder i Europa og i resten af verden vurderes det, at en bedre afkølingsteknologi, som kan muliggøre udnyttelsen af overskudsvarmen til fjernvarme, har et meget stort eksportpotentiale. Samtidig vil det kunne skubbe på udvikling af fjernvarme andre steder i Europa og dermed også en væsentlig parameter i eksport af dansk fjernvarme-teknologi.

6.1 Energieffektivitet og industri

Under henvisning til rapporten *Kortlægning af energibesparelser i erhvervslivet* (Kromann, Kragerup & Dalsgaard, 2015) foreslås i 2045 gennemført de besparelser, der har en tilbagebetalingstid under 10 år svarende til en reduktion på 32 pct. i energiforbruget eksklusiv. transport. I 2030 forudsættes disse besparelser delvist gennemført, dvs. besparelser svarende til 24 PJ eller ca. 12 pct.

Yderligere, foreslår IDA at sætte fokus på datacentrenes køling, som her er indregnet som dels en besparelse på elforbruget på 5 pct. og dels under sektorintegration som et overskudsvarmepotentiale på 3,5 TWh.

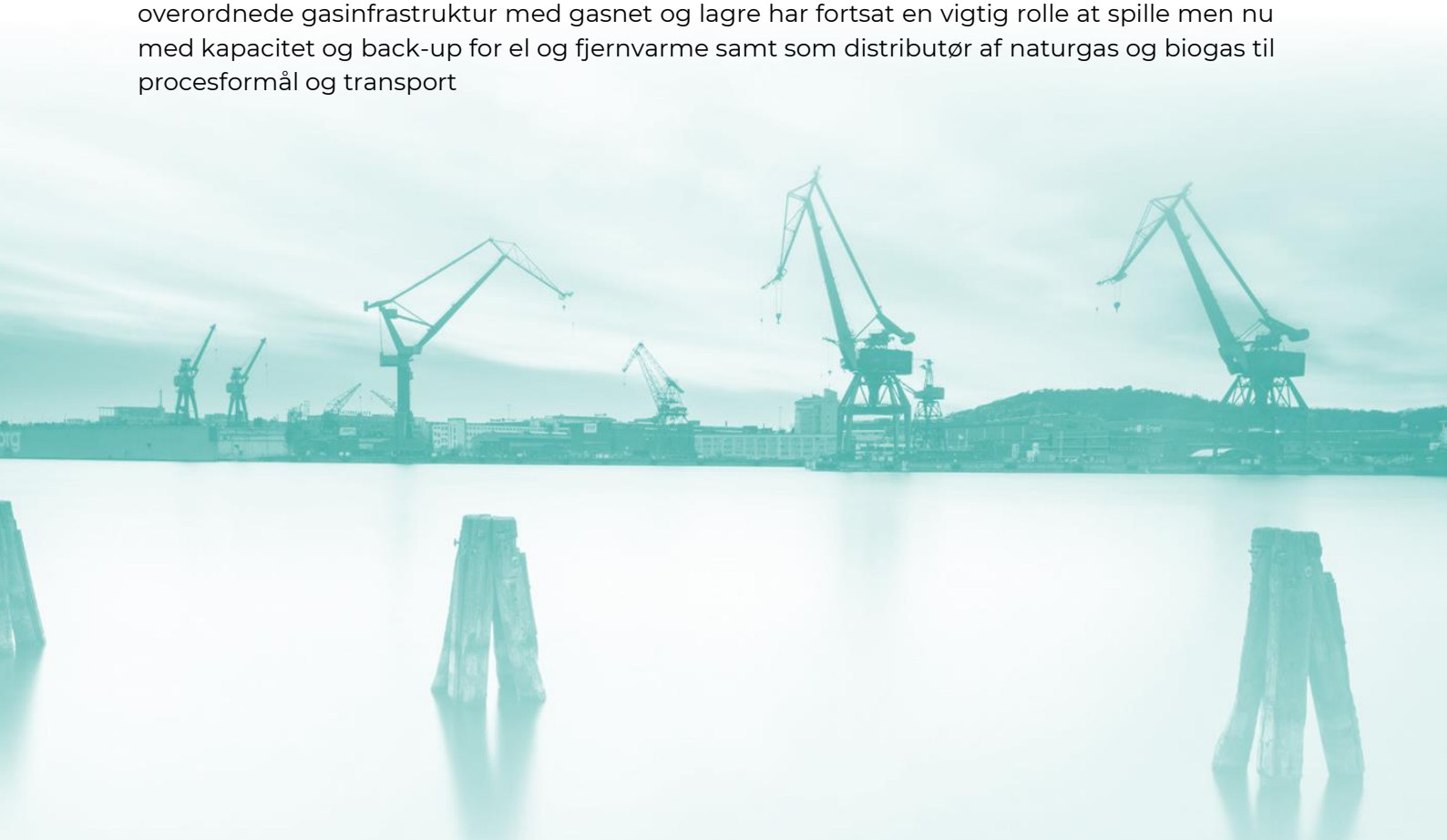
Konkrete forslag

- Besparelser og effektiviseringer (24 PJ inkl. effektiviseringer i el, varmepumper, fjernvarme og fjernkøling).
- Besparelser i datacentre (5 pct. af el).

6.2 Sektorintegration og industri

I IDAs Energivision fra 2015 vurderes der at være et potentiale for øget fjernvarmeforsyning af industrien på 12 PJ i 2050. I klimasvaret foreslås 7 PJ implementeret i 2030. Hertil kommer et fjernkølingspotentiale (5 PJ), hvor 3 PJ foreslås implementeret i 2030. Endelig er der et potentiale på 7 PJ, hvor rumvarme kan forsynes med en varmepumpe, og hvoraf IDAs Klimasvar realiserer halvdelen i 2030 og resten i 2045.

Når disse omlægninger er gennemført, er der til rest i industrien et forventet forbrug af fossile brændsler på 64 PJ i 2030. I IDAs Energivision fra 2015 erstattes disse med el, fast biomasse og biogas i 2050 og delvist implementeret i 2030. Her i IDAs Klimasvar er implementeringen fremrykket for at kunne opnå 70 pct. reduktionen allerede i 2030 således, at andelen af kul, olie og naturgas i væsentligt omfang er erstattet med elektrificering, biomasse og biogas i 2030. Den overordnede gasinfrastruktur med gasnet og lagre har fortsat en vigtig rolle at spille men nu med kapacitet og back-up for el og fjernvarme samt som distributør af naturgas og biogas til procesformål og transport



Tabel 4. Før implementering af varmescenariet

	IDAs Energivision 2050 (2015) *				IDAs klimasvar (2020)			
					Approksimation		Fremskyndet	
TWh/år	*2015*	*2020*	*2035*	*2050*	*2030*	*2045*	*2030*	*2045*
Kul	1,5	1,3	0,6		0,8	0,2	0,4	
Olie	11,2	9,6	4,8		6,4	1,6	1,4	
Naturgas	10,8	9,3	4,6		6,2	1,5	2,1	
Biomasse	3,3	3,3	3,4	3,4	3,4	3,4	6,3	3,4
Biogas	0	0,5	1,9	3,4	1,4	2,9	2,1	3,4
Sum Brændsler	**26,8**	**24**	**15,3**	**6,8**	**18,2**	**9,6**	**12,3**	**6,8**
El	20,3	20,8	22,3	23,8	21,8	23,3	25,7	23,8
Fjernvarme	0	0,5	2	3,4	1,5	2,9	2,0	3,4
Fjernkøling	0	0,2	0,8	1,3	0,6	1,1	0,8	1,3
Sum (TWh/år)	**47,1**	**45,5**	**40,4**	**35,3**	**42,1**	**37,0**	**40,8**	**35,3**
Sum (PJ/år)	**169,6**	**163,8**	**145,4**	**127,1**	**151,6**	**133,2**	**146,8**	**127,1**

Kilde: *Fra tabel 34, side 100 i IDAs Energivision 2050.
Note: Fremskyndet 2030: Fjernvarme øges og erstatter Ngas med faktor 1/0,9, fjernkøling erstatter el med faktor 2. 0,4 TWh kul erstattes med biomasse, og 5 TWh olie med el og biomasse. Ngas delvist med elektrificering og ved erstatning med el indregnes en effektivisering på 20 pct. Fordelingen mellem biogas og naturgas afspejler fordelingen i det samlede energisystem.

De konkrete tal fremgår af IDAs Energivision fra 2015 side 100, hvor resultaterne er angivet for årene 2015, 2020, 2035 og 2050. Heraf er tilsvarende tal fundet for 2030 og 2045 ved approksimation. Realiseringen af den tidligere omlægning i 2050 regnes fremskyndet til 2045 og dele af denne udvikling regnes fremskyndet til 2030 på følgende måde: Ift. IDAs Energivision erstattes 0,4 TWh kul med fast biomasse, og 5 TWh olie med hhv. 2,5 TWh biomasse og 2 TWh el (idet der forudsættes en effektivitetsfordel på 20 pct. ved omlægning til el). Tilsvarende for naturgas, hvor 6,2 TWh først reduceres med 0,5 TWh fjernvarme hvorefter halvdelen af den resterende mængde omlægges til 2,28 TWh el. Den resterende mængde gas på 2,8 TWh erstattes delvist af biogas, som forklaret herunder. Hertil kommer, at 0,2 TWh fjernkøling erstatter 0,4 TWh el.

Omlægningen ender med et forbrug af naturgas eller biogas i industrien på i alt 15 PJ (4,2 TWh). Det flugter med, at klimapartnerskabet for tung industri (Thomsen, 2020) kommer frem til at "*Energiintensiv industri har brug for 14 PJ biogas i 2030 til processer, der ikke kan elektrificeres*". Gasforbruget på de 4,2 TWh er fordelt mellem biogas og naturgas, så det afspejler fordelingen i det samlede system, dvs. ca. halvt af hver.

I Nordsøen foreslås det, at det forventede eget forbrug af naturgas til drift af platformene delvist erstattes med offshore vind. Der er regnet med udgangspunkt i en effektivitet på de nuværende værker på 30 pct. svarende til, at 5 GWh naturgas kan erstattes med 1,5 TWh el. Der er lavet timesimuleringer af to alternativer:

1. I det ene alternativ anlægges en 300 MW offshore vindmøllepark, som vil kunne producere 1,45 TWh el. Heraf vil 1,06 TWh kunne erstatte el og naturgas, og resten vil ikke have et tidsmæssigt sammenfald med forbruget.
2. I det andet alternativ anlægges 400 MW vind plus 200 MW elektrolyse/FC + 40 GWh brintlager. Dette alternativ vil kunne erstatte 1,4 TWh.

Konkrete tiltag
- Omlægning til fjernvarme (2 TWh).
- Fjernkøling med kølelagre (0,8 TWh).
- Varmepumper for resterende rumvarmebehov (3,5 PJ).
- El erstatter fossil (17 PJ inkl. varmepumper).
- 300 MW offshore vind erstatter 3,5 TWh naturgas på boreplatformene.

6.3 Biomasse og industri

Som nævnt ovenfor under sektorintegration erstattes en del af de eksisterede forbrug af fossile brændsler med biomasse og biogas.

Konkrete tiltag
- 23 PJ Biomasse erstatter fossile brændsler.
- 8 PJ Biogas erstatter fossilt fossile brændsler.

6.4 Vedvarende energi og industri

Generelt foreslås der en grøn industrisektor. Det betyder, at der bør etableres vindkraft svarende til elforbruget af elektrificeringen, og at der bør etableres vindkraft til erstatning af naturgas i Nordsøen. Det viser sig dog, at effektiviseringen i el-behovet i industrien modsvarer den øgede elektrificering, hvorfor der kun etables nye vindmøller til boreplatforme.

Konkrete tiltag
- 300 MW vind til boreplatforme.

6.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af industrisektoren

De største udfordringer og dermed de største behov for forskning og udvikling forventes at være i forbindelse storskala udnyttelsen af følgende teknologier:

- Integration af datacentre i fjernvarmesystemet.
- Produktionsomlægninger i industrien til el, biomasse og biogas.

6.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af industrisektoren

- Afgiftsreform, der understøtter energieffektivitet samtidigt med elektrificering og evt. fleksibelt elforbrug. Dette omfatter både elafgifter og brændselsafgifter. Forhøjelsen af afgifterne bør suppleres med en aftaleordning, som vi kender den.

- I samarbejde med pensionskasserne etableres en finansieringsordning, hvor virksomhederne kan få lavt forrentede lån til investeringer i større projekter, fx varmepumper.

- Der bør udpeges arealer til datacentre, hvor datakapacitet el og varmeudnyttelse er planlagt nøje. Dette vil sammen med fjernelse af barriere for udnyttelse af overskudsvarmen for datacentre sikre, at vi kan bruge overskudsvarmen i det danske energisystem.

- Fjernelse af de økonomiske barrierer for udnyttelse af overskudsvarme fra industri og datacentre.

- Forsknings og udviklingsmidler, der retter sig mod høj-temperaturprocesser, elektrificering og intern transport (traktorer mv. med dieselmotorer).

- Målrettet rådgivning til industrien om konvertering/omstilling fra fossile brændsler til elektrificering og grønne brændsler – rådgivning fx rejsehold – som en del af offentlig energispare ordninger.

- Flere midler til energirådgivning suppleret med tilskud, der reducerer tilbagebetalingstider. Tilskud kan evt. finansieret af el- og CO_2-afgifter på industrien. CO_2-afgift på naturgas på Nordsøen til fremme af energieffektivitet og vedvarende energi.

6.7 Samfundsøkonomi og industri

Industrisektorens tiltag kræver betydelige investeringer. De største er vist i tabellen herunder. Omkostningerne til vindkraft er regnet ud fra den andel, der svarer til det samlede el-behov til elektrificering minus el-besparelser.

Tabel 5. Investeringer i industrisektoren i hovedtal

	Investeringsbehov	**Årlige afskrivning og rente i 2030**
	Milliarder DKK	*Millioner DKK/år*
El besparelser	13,0	1.089
Brændselsbesparelser	15,0	1.008
Nordsøen	0,2	14
Elektrificering	6,0	345
Erstatning af biomasse med olie	2,0	115
Fjernkøling	1,6	89
Gasnet	1,5	89
Sum	**39,3**	**2.748**

De fleste investeringer er regnet med udgangspunkt i Teknologikataloget, dog undtagen:

- Investeringerne i ***el-besparelser*** er foretaget med udgangspunkt i IDAs Energivision, som bygger på rapporten *Kortlægning af energibesparelser i erhvervslivet* (Kromann, Kragerup & Dalsgaard, 2015): El-besparelser med en tilbagebetalingstid under 10 år er i 2015 vurderet til en omkostning på 2500 Mio. kr. per TWh sparet. (336 million EUR/TWh) med en gennemsnitlig levetid på 15 år. Denne pris er skrevet op til dagens priser, skønsmæssigt forhøjet som følge af fremskydning og rundet af til 3000 Mio. kr. per TWh sparet. (400 million EUR/TWh). Den fulde besparelse på 8,8 TWh i 2050 svarende til en investering på 26 mia.kr. forudsættes fremrykket til 2045, og heraf forudsættes 4,4 realiseret i 2030 svarende til en investering på 13 mia.kr.

- Investeringerne i ***brændselsbesparelser*** er foretaget med udgangspunkt i de samme rapporter: Brændselsbesparelser med en tilbagebetalingstid under 10 år er i 2015 vurderet til en omkostning på 6500 Mio. kr. per TWh sparet. (870 million EUR/TWh) med en gennemsnitlig levetid på 20 år. Denne pris er skrevet op til dagens priser, skønsmæssigt forhøjet som følge af fremskydning og rundet af til 7500 Mio. kr. per TWh sparet. (1000 million EUR/TWh). Den fulde besparelse på 4 TWh 2050 svarende til en investering på 30 mia.kr. forudsættes fremrykket til 2045 og heraf forudsættes 2 realiseret i 2030 svarende til en investering på 15 mia.kr.

- Omkostninger til **fjernvarme udvidelser** er inkluderet under varmesektoren. Selve tilslutningen til fjernvarme samt varmepumper er forudsat omkostningsneutral idet, der spares kedler og lignende. Varmepumper er lidt dyrere end kedler, men fjernvarmeunits er tilsvarende lidt billigere.

- Investeringerne i **elektrificering** ("El erstatter olie (2,5 TWh) og naturgas (2,9 TWh)") svarende til en CO_2-emission på 1,25 Mt er opgjort med udgangspunkt i klimapartnerskabet for tung industri (Michael Lundgaard Thomsen, 2020). Heri angives investeringen i en elektrificering med en CO_2-fortrængning på 0,1 Mt CO_2 til 0,5 mia.kr. Der regnes således her med en omkostning på 6 mia.kr. Levetiden er sat til 25 år.

- Iflg. klimapartnerskabet for tung industri kan "*Skift fra kul og petrokoks til alternative brændsler (biomasse og affald) … reducere 0,4 mio. tons CO_2 e i 2030, samt have en økonomisk positiv fortrængningsomkostning.*". Omkostningen til at **erstatte kul med biomasse** (0,4 TWh) er her således alene indregnet som den øgede samfundsøkonomiske omkostning, der er til biomassen. Mht. **biomasse der erstatter olie** (2,5 TWh), er der indregnet en investering på det halve af elektrificeringen og afrundet til 2 mia.kr. Levetiden er sat til 25 år. Den samfundsøkonomiske brændselsomkostning incl. håndtering er stort set den samme for fuelolie som for biomasse.

- **Biogas erstatter naturgas** (2,1 TWh). Dette kræver ikke øgede investeringsomkostninger i industrien. Omkostningerne til biogas medtages andetsteds.

- **Udvidelse af gasnettet**. For at kunne erstatte olie og kul i industrien med naturgas og biogas vil det være nødvendigt at foretage en vis udvidelse af gasnettet og/eller supplere med lokale biogas net. I klimapartnerskabet for energitung industri (Michael Lundgaard Thomsen, 2020) er en sådan omkostning vurderet til 1-1,5 milliarder kroner. Der er her medtaget en omkostning på 1,5 milliarder kroner med en levetid på 40 år.

For at estimere effekten af omlægningerne i industrisektoren, sammenlignes IDAs Klimasvar med en reference situation, hvor tiltagene ikke gennemføres. Hovedtal for denne sammenligning er vist i tabel 5. Generelt spares der omkostninger til brændsel til gengæld for øgede investeringer

Tabel 6. Hovedtal for industrisektoren sammenlignet med en reference hvor tiltagene ikke gennemføres

	IDAs Klimasvar	**IDAs Klimasvar uden industritiltag**	**Difference**
	Millioner DKK/år i 2030	*Millioner DKK/år i 2030*	*Millioner DKK/år i 2030*
Brændsel	25.058	27.750	-2.693
Elbalance	83	90	-8
Variable drift og vedligehold	315	315	0
Fast drift og vedligehold	27.368	27.225	113
Investering	110.085	107.108	2.978
Sum	**162.908**	**162.518**	**390**
	Mton	*Mton*	*Mton*
CO_2 emission	11,52	14,84	-3,33

Gennemsnitlig CO_2 Reduktionsomkostning	DKK/ton CO_2	117

Industrisektorens energirelaterede CO_2-emission er udregnet til 7,8 Mt i 2020. I referencen ville emissionen falde til 5,7 Mt. I IDAs Klimasvar reduceres CO_2-emissionen med 3,3 Mt til 2,4 Mt i 2030.

CO_2-reduktionsomkostning for industri (tabel 6) lander på 117 kr./t CO_2. Det skal dog fremhæves, at dette tal er udregnet med stor usikkerhed. De samfundsøkonomiske omkostninger øges til investeringer med knap 3 milliarder kr., som opvejes af en besparelse på brændsler og drift og vedligeholdelse i samme størrelsesorden.

Resultatet er en stigning i de årlige omkostninger på 390 millioner kr., men tilsvarende som for varmesektoren skal der kun ændres lidt ved forudsætningerne før dette tal ændres meget. Det skal også bemærkes, at omkostningerne til biogas ikke er medtaget under industri, men under el-sektoren.

Størrelsen af CO_2-reduktionen samt selve det forhold, at investeringerne nogenlunde opvejes af besparelserne, vurderes at være robust. Om man lander på 0 eller et lille plus eller minus er i sagens natur meget usikkert, derfor skal CO_2-reduktions omkostningstallet tages med store forbehold.

7 Transport

Transport står for næsten en tredjedel af udledninger af drivhusgasserne i Danmark og for næsten halvdelen af udledningerne i energisektoren. Det samlede transportenergibehov forventes i Basisfremskrivningen at være 179 PJ i 2030 foruden international luft- og skibstransport. I Energistyrelsens basisfremskrivning (Energistyrelsen, 2019b) forventes en kraftig stigning i mobilitetsbehovet frem mod 2030 svarende til en stigning fra i dag cirka 2,5 mio. biler til 3,3 mio. biler i 2030. En mindre del af væksten modsvares af forventning til mere effektive biler og fly. Når transportens CO_2-emission opgøres efter FN metoden er international fly- og skibstransport ikke medregnet. IDAs Klimasvar medtager dog også virkemidler til denne del af transportsektoren, som bliver helt afgørende af forholde sig til nu såvel som på den længere bane.

7.1 Energieffektivitet og transport

IDAs Klimasvar foreslår fortsat mere vejtransport, men også at der kommer fokus på at dæmpe væksten i især personbiltransporten. IDAs Klimasvar peger således på, dels indførelse af roadpricing mhp. at omlægge dele af afgifterne væk fra registrerings- og vægtafgifter og over på kørselsafgifter evt. med forskellige priser i forskellige zoner. Dels en gradvis indførelse af zoner i de større byområder, hvor der kun må bruges el-køretøjer. Disse to virkemidler har sigte på en samtidig opfyldelse af følgende fire mål:

- at afdæmpe væksten i personbil-km, selv om der er flere køretøjer end i dag,
- at fremme overgangen til el-køretøjer,
- at fremme omlægning til kollektiv trafik, og
- at mindste forurening og trængsel i de større byområder, uden at mindske mobiliteten i landområderne.

Roadpricing kan gennemføres på mange måder, men her foreslås det at starte med et simpelt princip, som er frivilligt og henvender sig til nye bilejere. Man kan tilskynde til registrering/selvangivelse af kørte km med modregning i registreringsafgift og vægtafgift, som også benyttet af forsikringsselskaber. GPS er allerede standard i mange biler, og kan danne grundlag for frivillig overgang til realtids roadpricing, hvor der kan differentieres i tid og sted. Gradvist kan roadpricing indføres på denne måde med lave omkostninger. Da det er frivilligt, men for de fleste økonomisk attraktivt, at betale bilskatter i form af roadpricing, undgår man en lang række af de kontrol- og datasikkerhedsproblemer, som hidtidige forslag har været 'belastet' økonomisk af.

En transportsektor der er dækket af 100 pct. vedvarende energi i 2045 kræver, at vi allerede nu har fokus på, at investeringer i infrastruktur underbygger mobilitet og vedvarende energi. IDAs Klimasvar, at de første skridt tages inden 2030, hvilket blandt andet betyder en lidt mindre vækst i udgifter til nye veje, og lidt flere investeringer i kollektiv transport og supplerende midler til cyklisme.

I IDAs Klimasvar forslår at afdæmpe væksten i international flytransport, så brændstofforbruget er 10 pct. lavere end i basisfremskrivningen. Dette kan opnås med en kombination af en brændsels- og passagerafgift, men det kræver, at Danmark går i dialog med andre lande om tiltag. Det kan være nødvendigt, at EU eller en gruppe af lande i EU går foran på området. IDAs Klimasvar arbejder ikke med færre rejser end i dag, men med en lavere vækst. Samlet set bruges derfor omtrent den samme mængde brændsel som i dag til international transport.

Konkrete forslag
- Afdæmpning af vækst i personbil km ift. vækst i basisfremskrivningen (1,6 pct./år i stedet for 2 pct./år), men stadig flere køretøjer end i dag.
- Omlægning af personkm fra biltransport (2 pct.) og fly (10 pct.) til tog og kollektiv trafik nationalt.
- Omlægning af personkm fra biltransport (2 pct.) til cykler.
- Afdæmpe væksten i brændselsforbrug med 10 pct. i national og internationale fly.

7.2 Sektorintegration og transport

En afgørende faktor i IDAs Klimasvar er at begrænse brugen af benzin og diesel til biler, så det reduceres fra 102 PJ i 2020 til 59 PJ i 2030. Afhængigt af hvor meget den enkelte bil kører, svarer det til, at antallet af benzin og dieselbiler skal reduceres fra nu 2,6 til 1,5-2 millioner biler i 2030. Det er ikke antallet af biler, der er afgørende for de danske udledninger. Det er hvor meget, der køres i bilerne, og dermed hvor stor CO_2-belastningen bliver.

Afhængigt af hvor meget transportarbejdet stiger, og hvor meget der køres i den enkelte bil, vil resten af personbilstransporten så kræve en betydelig stigning i antallet af el-biler. Med udgangspunkt i de nævnte tiltag til at begrænse væksten er antallet af el-biler udregnet på følgende måde:

I Basisfremskrivningen 2019 forventes en væsentlig stigning i biler til 3.3 mio. i 2030, hvoraf cirka 300.000 forventes at være elbiler eller plug-in-hybridbiler. IDAs Klimasvar foreslår yderligere 1 mio. el- og plug-in hybridbiler således, at der i 2030 er 1.3 mio. el- og plug-in hybridbiler.

Flere og flere virksomheder laver fuldt ud elektriske køretøjer til tung transport og specielle køretøjer. Det må forventes, at denne udvikling fortsætter. Konkret foreslås i IDAs Klimasvar, at 35 pct. af busserne og 30 pct. af varevognene samt 20 pct. af motorcyklerne og forsvarets brændselsforbrug er på el- eller plug-in hybrid i 2030.

For lastbiler foreslås, at vi gradvist kommer op på mindst 5 pct. lastbiler på batteridrift, enten i form af el-lastbiler eller som plug-in hybrid. For lastbiler foreslås endvidere, at 5 pct. benytter e-roads. E-Roads er en tung infrastrukturinvestering, som kan vise sig at være en meget effektiv måde at få de fossile brændsler ud af den tunge transport, da energieffektiviteten er meget høj sammenlignet med både traditionelle 1. og 2. generations biobrændsler samt elektrofuels.

Det er en væsentlig udfordring at få omstillet den tunge transport. Biobrændsler og biomasse er en knap ressource, men elektrofuels kan afhjælpe presset på biobrændselsressourcen og på

sigt også blive billigere end biobrændsler. I IDAs Klimasvar er der ingen traditionelle biobrændsler. For at nå i mål mht. 100 pct. vedvarende energi på længere sigt, er det afgørende, at vi er i gang med Power-2-X og elektrofuels i 2030. Produktion af elektrofuels kræver elektrolyse og vil resultere i et stort nyt elforbrug. Det er afgørende, at disse forbrug er fleksible og også, at disse anlæg så vidt muligt er placeret tæt på fluktuerende vedvarende energi. Elektrolyseanlæg skal derfor have en driftstid på 40-60 pct. afhængig af placering og kontekst.

Elektrofuels kræver en CO_2-kilde. I IDAs Klimasvar forslås en kombination af CO_2 fra punktkilder som cementproduktion, biogas og andre kraftværker. Der anvendes ikke air-capture til CO_2-fangst, grundet de forventede omkostninger og teknologiens modenhed, men dette kan være en vigtig teknologi mht. elektrofuels samt CO_2-behovet generelt frem mod 2045. Udover ovennævnte er der yderligere i IDAs Klimasvar indregnet en produktion af elektrofuels til international flytransport på 2 pct. Dette initiativ er afgørende for at starte op og få erfaringer med denne type brændstofproduktion. Efter 2030 vil den skulle udbygges markant for, at Danmark kan blive 100 pct. forsynet i 2045.

Tilsvarende er produktionen af ammoniak til skibe (her indenlands) afgørende. Denne produktion vil også skulle udbygges markant efter 2030.

Konkrete tiltag
- Benzin og diesel til biler reduceres fra nu 102 PJ til 59 PJ svarende til at antallet reduceres fra 2,6 til 1,5 -2 millioner biler (afhængigt af hvor meget de kører).
- 1,3 mio. el-biler eller plug-in-hybridbiler i 2030.
- 35 pct. af busser og 30 pct. af varevogne på batteridrift eller plug-in-hybrid.
- 20 pct. af brændselsforbruget i motorcykler og i forsvaret på el i 2030.
- 5 pct. lastbiler på batteridrift eller plug-in-hybrid
- 5 pct. af lastbiler direkte el i 2030 (e-roads)
- 20 pct. elektrofuels (DME/metanol) til lastbiler og varevogne (9,8 PJ) i 2030
- 10 pct. elektrofuels (ammoniak) til skibe i 2030 (0,6 PJ).
- 2 pct. eletrofuels (jetfuel) til nationale fly (0,3 PJ).
- 1.200 MW elektrolyse
- CO_2-capture til elektrofuels fra en kombination af punktkilder.

7.3 Biomasse og transport

I IDAs Klimasvar anvendes forgasning af biomassse og CO_2-punkt kilder til at fremstille elektrofuels. Dette kan evt. suppleres med Hydrothermal liquefaction (HTL).

Konkrete tiltag
- 200 MW forgasning af træflis.

7.4 Vedvarende energi og transport

Konkrete tiltag
- 2.700 MW til el køretøjer samt elforbrug ved CO_2-capture og elektrolyse.

7.5 Teknologiske udfordringer i omstilling af transportsektoren

Transporten udgør en stor udfordring for at nå klimamålet i 2030, men måske en endnu større udfordring frem mod et 100 pct. vedvarende energimål. Det er derfor afgørende, at de teknologier vi skal anvende fra 2030 allerede frem mod 2030 udvikles og modnes. For transport handler disse om:

- Storskala intelligent opladning af elkøretøjer.
- E-roads til lastbiler med delvis batteridrift.
- Fra simpel årlig roadpricing til avanceret GPS baseret roadpricing.
- Elektrolyseanlæg med fleksibel drift (fuldlasttid på cirka 50 pct.), herunder mere effektiv elektrolyse (SOEC).
- Integrerede fleksible elektrofuelsproduktioner med, store brintlagre, Carbon Capture anlæg, CO_2-lagre og kemisk syntese (DME, Metanol, Ammoniak), herunder opskalering.
- Storskala forgasning af biomasse, pyrolyse og HTL.

7.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af transportsektoren

- Indførelse af roadpricing med henblik på at omlægge (alle eller dele af) danske bilafgifter væk fra registrerings- og vægtafgifter over på kørselsafgifter med forskellige priser i forskellige zoner.

- Roadpricing foreslås indført i første omgang frivilligt for nye bilejere, som en simpel årlig selvangivelse til en start med mulighed for også at benytte GPS i nyere biler. GPS muliggør differentiering mellem tid og sted. Gradvist udvides ordningen baseret på en økonomisk gulerod ved at skifte afgiftsmodel fra registrerings- og vægtafgifter. Som supplement kan overvejes en gradvis indfasning af ændringer i kørselsfradraget, som tilgodeser mobilitet i kollektiv transport og samkørselsordninger.

- Udfasning af salg af fossile biler og indfasnings af elbiler kan hjælpes på vej med en kørselsafgift evt. kombineret med en registreringsafgift. Samlet set skal afgiftssystemet indrettes med øje for den fiskale balance.

- Gradvist (tid og sted) indførelse af zoner i de større byområder, hvor der kun må bruges elkøretøjer.

- Udarbejdelse af national plan for styrkelse af energieffektive transportformer som tog, metro, cykeltransport mv.

- Sikre en balance i nye infrastrukturinvesteringer mht. vej og kollektiv transport, så der anvendes flest midler til at øge mobilitet i energieffektive transportformer som tog, metro, cykelstier mv.

- Stille krav om el i udbud af busruter og sætte krav i offentlige udbud om elektrificering af varebiler og andre køretøjer til erhverv.

- Mål for udfasning af fossile brændsler for små køretøjer og for lastbiler, skibe og fly bør være opdelte på transportformer.

- Udfasning af fossile anlægsmaskiner på danske byggepladser inden 2030.

- Nationale mål for elektrificering af personbiler og varebiler. I blandingskrav af elektrofuels for lastbiler (20 pct.), skibe (10 pct.) og fly (2 pct.), gerne med mulighed for målopfyldelse med elektrificering (EU's direktiv om vedvarende energi (RED II) kræver at medlemslandene selv definerer, hvilke CO_2-kilder tæller med i VE-målet for transport).

- Danske investeringer i udvikling og demonstrations projekter for E-roads. E-roads inkluderer forskellige teknologier, der leverer strøm til el-køretøjer såsom busser, lastbiler og personbiler imens de kører. Det kræver et øget internationalt fokus på teknologien, og at de forsøg som foregår i Sverige og Tyskland fortsætter. Danmark kan iværksætte forsøg baseret på erfaringer fra andre lande i et afgrænset område.

- En dansk strategi for elektrolyse og elektrofuels, der indeholder en handlingsplan og et innovationsmarked (tilskud, tarifsystemer mv.) og forskning og udviklingsmidler til området.

International skibs- og flytransport

- Danmark skal arbejde for en fælles europæiske aftale om flyafgifter. Det kan indledes med at den danske regering optager kontakt med vores nabolande – i første omgang dem, der har indført en passagerafgift evt. kombineret med en brændselsafgift – med henblik på at koordinere afgifternes størrelser og principperne bag fastlæggelsen af afgifterne. Der sigtes imod at få flere europæiske lande med og at påvirke EU til at være mere aktiv.

- Den danske regering tager problematikken med non-CO_2-emissioner op med EU med henblik på at gøde jorden for en regulering af flyhøjder – i første omgang på europæisk plan og derpå internationalt.

- Danmark får en national strategi for elektrofuels og sørger for at være i den internationale frontlinje med henblik på at udvikle elektrofuels (Power-to-X) der er velegnede til fly og skibstransport.

7.7 Samfundsøkonomi og transport

Transportsektorens tiltag kræver betydelige investeringer. De største er vist i tabellen herunder. Omkostningerne til vindkraft er regnet ud fra den andel, der svarer til det samlede el-behov til elektrificering minus el-besparelser.

Tabel 7. Investeringer i transportsektoren i hovedtal

	Investeringsbehov	**Årlige afskrivning og rente i 2030**
	Milliarder DKK	Millioner DKK/år
Forskel i investeringer i køretøjer	73,3	6.896
Landestandere	2,4	277
Andet infrastruktur	2,0	1.975
Elektrolyse	5,5	370
Brintlager	2,3	131
Biomasse forgasning	2,5	165
CO_2-hydrogonering	0,5	32
Biomasse hydrogonering	2,1	120
Vindmøller	33,7	1.798
Sum	**124,2**	**11.762**

De fleste investeringer er regnet med udgangspunkt i Teknologikataloget, dog med følgende kommentarer og tilføjelser:

- Den afdæmpede vækst i personbil km ift. vækst i basisfremskrivningen er konkret beregnet ved, at der er det samme antal køretøjer i IDAs Klimasvar som i basisfremskrivning (3,3 mio. mod 2,5 i dag), men at disse kører lidt færre km pr. bil. I praksis kan en afdæmpet vækst opnås ved en kombination af færre km pr bil og færre biler. Hvis en afdæmpet vækst opnås ved færre biler, bliver omkostningerne til det samlede system lavere.

- Der er beregnet 5 elbiler pr. ladestander. Omkostningerne til e-roads er antaget den samme som el-lastbiler. Omkostningerne til køretøjer og ladestandere er beregnet med udgangspunkt i Energistyrelsens rapport "Alternative Drivmidler" (Danish Energy Agency & Cowi, 2013) .

- For køretøjer medtages merinvesteringerne samlet set for el- og plug-in-hybridkøretøjerne i forhold til diesel og benzin køretøjer for biler, lastbiler, busser og varevogne.

- Ved hjælp af tidligere analyser af infrastrukturomkostninger til vej og jernbane er de marginale ekstraomkostningerne til den øgede mobilitet på jernbane og cykeltransport taget med i IDAs Klimasvar (Mathiesen et al., 2014).

- For roadpricing har der taget udgangspunkts i Trængselskommissionens rapport om landsdækkende roadpricing (Trængselskommissionen, 2013), dog foreslås her en gradvis overgang med start i en mere lavteknologisk model, som er frivilligt. I alt anslås at udgifterne over

tid mod 2030 maksimalt kan blive 0,5 mia. kroner/år til drift, investeringer og administration. Udgifterne vil sandsynligvis være lavere grundet den gradvise frivillige overgang.

- En del af det øgede mobilitetsbehov flyttes fra vej og fly til togtransport og cyklisme. Der spares derfor marginale omkostninger i nogle dele, som giver penge til investeringer i andre dele. Marginalt skal der investeres mere som følge af omlægningen af mobiliteten til en mere effektiv transport.

- Investeringerne i vindmøller, elektrolyseanlæg, hydrogenisering for at fremstille elektrofuels er medtaget samlet. Der er regnet med 20 pct. tab ved fremstilling af flybrændstof og dermed 20 pct. ekstra omkostninger. For energisystemet er Energistyrelsens Teknologikatalag anvendt dog undtaget Carbon capture fra punkt kilder hvor et gennemsnit er anvendt fra fx cement produktion, biogas og kraftværker på 60 M€/Mt fra (Brynolf *et al.*, 2018).

For at estimere effekten af omlægningerne i transportsektoren, sammenlignes IDAs Klimasvar med en reference situation, hvor tiltagene ikke gennemføres. Hovedtal for denne sammenligning er vist i tabel 8. Generelt spares der omkostninger til brændsel til gengæld for øgede investeringer.

Tabel 8. Hovedtal for transportsektoren sammenlignet med en reference hvor tiltagene ikke gennemføres

	IDAs Klimasvar	**IDAs Klimasvar uden transporttiltag**	**Difference**
	Millioner DKK/år i 2030	*Millioner DKK/år i 2030*	*Millioner DKK/år i 2030*
Brændsel	25.058	34.373	-9.315
Elbalance	83	53	30
Variable drift og vedligehold	315	330	-15
Fast drift og vedligehold	27.368	28.080	-703
Investering	110.085	98.333	11.753
Sum	**162.908**	**161.168**	**1.740**
	Mton	*Mton*	*Mton*
CO_2-emission	11,52	16,99	-5,48

Gennemsnitlig CO_2 Reduktionsomkostning	DKK/ton CO_2	318

Transportsektorens CO_2 emission er udregnet til 12,4 Mt i 2020. I referencen ville emissionen stige til 13,3 Mt i 2030. I forhold til referencen reduceres CO_2-emissionen i IDAs Klimasvar med 5,5 Mt til 7,8 Mt i 2030.

CO_2-reduktionsomkostning for transport lander på 318 kr./t CO_2 (tabel 8). Det skal dog fremhæves, at dette tal er udregnet med ***stor usikkerhed***. De samfundsøkonomiske omkostninger til investering øges med knap 12 milliarder kr., som opvejes af en besparelse på brændsler og drift og vedligeholdelse i samme størrelsesorden. Resultatet er en øget omkostning på 1,7 milliard kr./år, men i sagens natur skal der kun ændres lidt ved forudsætningerne, før dette tal ændres meget.

Størrelsen af CO_2-reduktionen samt selve det forhold, at investeringerne nogenlunde opvejes af besparelserne, dog med en tendens til en øget omkostning vurderes at være robust, men CO_2-reduktions omkostningstallet tages med store forbehold.

8 El

El-sektoren omfatter det "klassiske elforbrug", dvs. elforbruget inden det suppleres med elektrificering af varme-, industri- og transportsektorerne. Elektrificeringen er medtaget under de respektive sektorer i form af hvor mange vindmøller, der skal bygges for at dække det øgede behov. Indreguleringen af hele sektoren behandles dog samlet i det følgende som en del af elsektoren. Punktet omfatter også anlæg af de biogasanlæg, der skal til for at omlægge fra naturgas til biogas.

I udgangspunktet er mange af de oprindelige danske kraft- og kraft/varmeværker allerede erstattet af produktion af el fra vindmøller og solceller. Hertil kommer, at store dele af kulbruget i kraft/varmeværkerne er erstattet af importeret biomasse samt af, at 10-15 pct. af naturgasforbruget er erstattet med opgraderet biogas.

Frem mod 2030 foreslås de resterende kulkraftværker lukket og elproduktionen erstattet med vindkraft og solceller samt en mindre andel bølgekraft. Desuden forudsættes de nuværende biomasse og gasfyrede kraft/varmeværker opretholdt, og der foreslås tilført ekstra gasbaseret kraftværkskapacitet, så Danmark bidrager med sin andel af, hvad der behøves i den Europæiske elforsyning.

8.1 Energieffektivitet og el

Det klassiske el-forbrug er ikke blot forbundet med omkostningen til vind eller sol. Der er også omkostninger til opretholdelse af forsyningssikkerheden, når vinden ikke blæser, og når solen ikke skinner. Det er derfor fortsat en god idé at reducere forbruget gennem energieffektivitet.

Konkrete tiltag
- 10 pct. besparelser i det "klassiske elforbrug" i 2030 (20 pct. i 2045).

8.2 Sektorintegration og el

En afgørende fremtidig udfordring for elsektoren bliver at sikre indreguleringen af el fra vind og sol (og evt. bølgekraft). Udfordringen kan opdeles i to dele: Den ene er at udnytte vind og sol, når der er et overskud. Her bliver det billigste og bedste tiltag at sikre fleksibilitet i sektorintegration til elektrificeringen af de andre sektorer, som allerede beskrevet. Den anden udfordring bliver at sikre produktion af el (eller fleksibelt elforbrug), når der er et underskud af produktion af el fra vind og sol. Den nuværende timespidslast i det klassiske elforbrug har de sidste 10 år ligget på ca. 6.000 MW. Med de forudsatte el-besparelser forventes den også at ligge på dette niveau frem til 2030. Elektrificeringen af de øvrige sektorer forventes i høj grad at kunne foregå uden at bidrage til en forøgelse af kapacitetskravet idet, der vil være tale om fleksibelt elforbrug, der vil kunne undgås på de kritiske tidspunkter.

I analyserne er der taget udgangspunkt i Energistyrelsens analyseforudsætninger AF2019 (Energistyrelsen, 2019a). Her forventes kraftværkskapaciteten at falde fra de nuværende små 6.000 MW i 2020 til lidt over 4.000 MW i 2030. Denne udvikling er ikke enestående for Danmark, men er generel for Europæiske lande, idet kapaciteten falder i takt med at kraftværker erstattes med vedvarende energi. De enkelte lande vil kunne hjælpe hinanden gennem udveksling af el, hvor forskelle i vind og sol og forskelle i forbrugsmønstre og tidspunkter delvist vil kunne afhjælpe problemet. Hertil kommer, at man vil kunne mindske problemet ved at gøre brug af fleksibelt forbrug. Tilbage står dog, at der i det samlede europæiske system vil være behov for spids- og reservelast til et vist niveau for at kunne opretholde en sikker elforsyning.

IDA foreslår, at Danmark planlægger efter princippet, at Danmark bidrager med vores andel af den kraftværkskapacitet, der skal være i Europa for at sikre en sikker elforsyning.

Et sådant princip medfører samtidigt, at når der skal stå en vis kapacitet et eller andet sted i Europa, så kan den del, der er baseret på kraft/varmeværker gerne stå i Danmark, hvor overskudsvarmen kan udnyttes til fjernvarme. Det skal dog fremhæves, at sådanne fremtidige værker vil have betydeligt lavere benyttelsestider end hidtil. Man vil især skulle satse på kraftværkskapacitet med lave anlægsinvesteringer. Til gengæld er effektiviteten ikke så afgørende.

Præcist hvor meget Danmark skal stile mod, og hvorvidt der er behov for det allerede i 2030, eller behovet først kommer herefter er svært at sige præcist. Det afhænger af udviklingen i resten af Europa.

I IDAs forslag er der indregnet dels, at vi bevarer kapaciteten i de nuværende decentrale kraft/varmeværker og dels, at der bygges 1.400 MW ny kapacitet baseret på fleksible gasfyrede kraftværker.

Konkrete tiltag
- Indregulering af vind, sol og bølgekraft med varmepumper og elektrolyseanlæg fra de andre sektorer.
- Nedlæggelse af kulkraft-værker.
- Fokus på nedregulering af eksisterende biomasseværker når der er overskud af el-produktion fra vind-, sol- og bølgekraft.
- Bevarelse af decentrale gasfyrede kraftvarmeværker samt opførelse af nye gasfyrede kraftvarmeværker for at sikre effekt.

8.3 Biomasse og el

De eksisterende biomasse kraft/varmeværker videreføres og er i drift i 2030, men producerer mindre, idet der er fokus på at regulere produktionen ned, når der er overskud af strøm fra vindkraft mv. Det betyder dels et mindre forbrug af fast biomasse og dels et mindre forbrug af naturgas i de decentrale værker. Til gengæld kommer der et øget forbrug af naturgas i de ny spids- og reservelast kraft- og varmeværker.

I det samlede system (alle sektorer inklusive) reduceres naturgasforbruget fra 90 PJ i 2020 til 43 PJ i 2030. IDAs Klimasvar foreslår biogasproduktionen udvidet til 35 PJ/år. Dette forudsætter, at der anvendes en vis mængde halm som supplement.

Konkrete tiltag
- Biogasproduktionen forøges til 35 PJ i 2030.
- Træflis og halm i kraftvarmeværker og fjernvarmekedler.

8.4 Vedvarende energi og el

IDAs Klimasvar foreslår, at der primært satses på vindkraft, men at der suppleres med solceller og i mindre omfang bølgekraft.

Mht. bølgekraft er det tidligere forslag fra IDAs Energivision fra 2015 indregnet, dvs. 132 MW bølgekraft svarende til en el-produktion på 0,46 TWh/år. Dette forslag har primært som formål at sætte fokus på at udvikle denne teknologi, som på den lange bane vil kunne være et godt supplement til sol- og vindkraft. Hvis måltallet ikke opfyldes i 2030, bør man bygge yderligere en tilsvarende vindkraft kapacitet.

Teknisk og økonomisk set ift. indregulering og indpasning er det bedste forhold, at vind bidrager med 80 pct. og sol med 20 pct. af el-produktionen. Pga. forskelle i benyttelsestider svarer det nogenlunde til, at der installeres den samme kapacitet. Her er det imidlertid valgt at have mindre sol end vind.

Det skyldes, at solcellernes andel er vurderet ud fra et hensyn til arealanvendelsen, og derfor begrænset til et mål om 5000 MW i 2030 stigende til 10.000 MW i 2045. Der er dog forsat tale om en tydelige forøgelse sammenlignet med den nuværende kapacitet på ca. 1000 MW. Arealanvendelse og indpasning i el-systemet bliver en større og større udfordring i fremtiden. Både hvad angår el-produktions- og elforbrugsanlæg. I det udstræk vi bruger markanlæg til etablering af 10.000 MW solceller skal vi bruge 150-160 km^2. Det er et areal, som svarer til 2 gange Ærø eller 2 gange arealet af Københavns Kommune. Arealet på store tage over 500 m^2 omkring de større byer og i alle kommuner rundt omkring i landet har et potentiale på op mod 20.000 MW og tælles tage på over 200 m2 med er potentialet 50.000 MW (Mathiesen *et al.*, 2017). Potentialet er således langt større end det, der er plads til i det danske elsystem. Ikke alle store tage er egnede til solceller, omvendt er potentialet meget stort. Her regnes med omkostninger svarende til store tage, hvilket er marginalt dyrere end markanlæg i omkostninger, men stadig langt billigere end husstandsanlæg. Desuden har anlæg på industritage den fordel, at de kan placeres på tage tæt på de konkrete forbrug og i forbindelse med det nuværende el-net.

Konkrete tiltag
- 130 MW bølgekraft.
- 5.000 MW solceller på store tage (nu 1.000 MW).
- Mindst 4.800 MW onshore vindkraft onshore (nu 4.200 MW).
- 6.630 MW vindkraft offshore (nu 2.000 MW).

8.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af el-sektoren

Vindkraft og solceller må betegnes som velkendte og afprøvede teknologier. De største udfordringer, hvor der især er behov for forskning og udvikling forventes at være i forbindelse med bølgekraft og intelligent integration af de vedvarende energiformer i el-nettet samt fleksibel drift af biomasse kraft/varmeværkerne.

- Fleksibel drift af eksisterende biomasse kraftvarmeværker.
- Bølgekraft (vindmøller som alternativ).
- Intelligent integration af vind og sol i el-nettet (herunder placering af nye anlæg og undgå unødigt udbygning af el-nettet).
- Anvendelse af halm til biogas.

8.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af el-sektoren

- Udarbejdelse af national plan for hensigtsmæssig udbredelse af solceller.

- Omlægning af elafgifter på private forbrug, så rabatten på elvarme og varmepumper ikke gør, at de sidst brugte kWh har lave afgifter. Konkret forslås, at afgift-rabatten for elforbrug over 4.000 timer erstattes af, at afgiftslettelsen til varmepumper gøres afhængig af, at der opsættes en særskilt måler til varmepumpen. At der stilles krav til effektiviteten af varmepumper, herunder at afgiftslettelsen ikke gælder for direkte brug af elvarme. Evt. kan ordningen også gøres betinget af, at der investeres i en vindmølleandel svarende til forbruget i varmepumpen.

- Ordningen skitseret overfor kan udvides til også at gælde el til el-biler.

- Lokalt ejerskab af land-vindmøller fremmes blandt andet ved at tilbyde, at fjernvarmeværker kan købe andele af lokale vindmøller og opnå en afgift-lettelse (evt. ligestilling med individuelle varmepumper som nævnt overfor) og evt. en tariffordel svarende til den mængde el, der bruges i en varmepumpe på fjernvarmeværket. Allerede i dag står der over 2.000 MW vindkraft inden for en radius af 3 km fra eksisterende fjernvarmeforsyninger. Ordningen skal dog især bruges til at øge kapaciteten indenlands på en positiv måde for lokalsamfundene.

- Investeringerne i de mange offshore vindkraftanlæg gøres til en folkesag, hvor borgere i Danmark kan blive medejere. Landvind har også uudnyttede muligheder for folkeligt ejerskab.

- Udbredelse af intelligent styring og måling af elforbrug kombineres med identifikation af elslugere og rådgivning om at nedbringe elforbruget.

- En revision af markeder for el-handel har fokus på, hvordan der sikres rentabilitet i såvel udbygning med mere vedvarende energi som sikring af spids- og reservelast på den lange bane.

- Tarifomlægning, der fremmer fleksibilitet og lokal udnyttelse af vedvarende energi, så investeringer i el-nettet optimeres og unødvendige udbygninger undgås.

8.7 Samfundsøkonomi og el

Elsektorens tiltag kræver betydelige investeringer i især vindkraft og solceller. De største er vist i tabellen herunder.

Tabel 9. Investeringer i elsektoren i hovedtal

	Investeringsbehov	**Årlige afskrivning og rente i 2030**
	Milliarder DKK	*Millioner DKK/år*
Bølgekraft	4,8	303
Vindkraft – onshore ift. 2020 niveau	3,3	174
Vindkraft – offshore ift. 2020 niveau	75,0	3.999
Solceller ift. 2020 niveau	21,1	937
Fleksibel elbehov	3,5	235
Nye gasfyrede værker	15,6	897
Biogasanlæg	18,2	1.223
Sum	**141,5**	**7.768**

Alle investeringer er regnet med udgangspunkt i Teknologikataloget, dog undtagen:

- Fleksibelt elbehov. Her antages fremrykning af omkostningerne identificeret i IDAs Energivision for 2035.

For at estimere effekten af investeringerne i elsektoren, sammenlignes IDAs Klimasvar med en reference situation, hvor tiltagene ikke gennemføres. Hovedtal for denne sammenligning er vist i tabel 10. Generelt spares der omkostninger til brændsel til gengæld for øgede investeringer.

Tabel 10. Hovedtal for elsektoren sammenlignet med en reference hvor tiltagene ikke gennemføres

	IDAs klima-svar	**Reference uden eltiltag**	**Difference**
	Millioner DKK/år i 2030	*Millioner DKK/år i 2030*	*Millioner DKK/år i 2030*
Brændsel	25.058	36.323	-11.265
Elbalance	83	90	-8
Variable drift og vedligehold	315	788	-473
Fast drift og vedligehold	27.368	24.923	2.445
Investering	110.085	105.405	4.680
Sum	**162.908**	**167.528**	**-4.620**
	Mton	*Mton*	*Mton*
CO_2-emission	11,52	19,57	-8,06
Gennemsnitlig CO_2-reduktionsomkostning		DKK/ton CO_2	-573

Elsektorens CO_2-emission er udregnet til 6,5 Mt i 2020. I referencen ville emissionen være steget til 8,6 Mt. I IDAs Klimasvar reduceres CO_2-emissionen med 8,0 Mt til 0,6 Mt i 2030. Den resterende CO_2-emission på 0,57 Mt hidrører primært fra, at kraft- og kraft/varme-værker delvist fyres med naturgas.

CO_2-reduktionsomkostning for el lander på -573 kr./t CO_2 (tabel10). Det skal dog fremhæves, at dette tal tilsvarende for de andre sektorer er udregnet med ***en vis usikkerhed***. Det skal også nævnes at regnestykket i den viste form omfatter alle vindmøller, også de der er nævnt under de andre sektorer.

9 Energieffektivitet

I IDAs Klimasvar er de samlede tiltag vedr. energieffektivitet som udgangspunkt formuleret ud fra, hvad der passer bedst ind i det samlede energisystem og ud fra, hvad der samfundsøkonomisk er bedst. Der er imidlertid også taget hensyn til, at Danmark vil kunne opfylde vores forpligtigelser iht. EU's energieffektiviseringsdirektiv (EED).

I henhold til det reviderede EED skal medlemsstaterne i 2021-2030 opnå kumulative energibesparelser i slutanvendelserne svarende til mindst nye besparelser hvert år fra den 1. januar 2021 til den 31. december 2030 på 0,8 pct. af det årlige endelige energiforbrug målt i gennemsnit over den seneste treårsperiode forud for den 1. januar 2019, dvs. for perioden 2016-2018.

Direktivet giver en række muligheder for at medregne besparelser i forsyningen og for at opnå reduktioner i forpligtelsen, men en anvendelse af disse muligheder ændrer ikke ved, at der skal opnås besparelser i slutforbruget svarende til 0,8 pct. af det endelige forbrug. Hvis besparelser i forsyningen mv. skal medregnes, skal målet dermed øges tilsvarende. Det betyder, at direktivet reelt ikke indeholder nogle incitamenter til at anvende energieffektivisering i produktionen til opfyldelse af forpligtelsen.

Ud fra tal for Eurostat-tal for det endelige energiforbrug i 2016-2018 kan det danske årlige mål beregnes til 4,96 PJ, og det akkumulerede mål over perioden er dermed 272,8 PJ.

De vigtige punkter er:

- At der for perioden 2021-2030 reelt kun kan medregnes energibesparelser i slutforbruget, dvs. ude hos forbrugerne (husholdninger, virksomheder, transport).
- At der skal være tale om nye besparelser, og at besparelserne skal være kumulative.
- At der kun kan medregnes effekter af virkemidler.

IDAs Klimasvar indeholder følgende tiltag i slutforbruget, som må betegnes som nye og kumulative:

- Varmebesparelser - 2,2 PJ/år.
- Elbesparelse - 1 PJ/år.
- Energibesparelser i industri - 2,4 PJ/år.
- Omlægning til fjernvarme og individuelle varmepumper - 0,24 PJ/år.
- Reduktion i personbil km og flyrejser - 0,8 PJ/år.

Sammenlagt giver disse besparelser et tal der er større end 4,96. Det afgørende punkt bliver således, om der kan argumenteres for, at disse besparelser skyldes nye konkrete virkemidler. IDAs forslag om virkemidler til at opnå øget energieffektivitet er derfor centrale.

10 Sektorintegration

En vigtig erfaring fratidligere arbejde i IDA-regi er, at det er når man har fokus på, hvordan de forskellige sektorer kan hjælpe hinanden og hvor der er synergi, at man kan finde frem til de bedste og de billigste løsninger - også italesat som "det smarte energisystem". Sektorintegrationen er derfor centralt for IDAs Klimasvar.

En omstilling til 100 pct. vedvarende energi og CO_2-neutralitet i varme- og industri- og transportsektorerne kræver et input fra el-sektoren i form at elektricitet fra bølge- sol- og vindkraft. Omvendt kan elsektoren spare store omkostninger til energilagring, som er betydeligt billigere i de andre sektorer, end det er internt i el-sektoren.

I IDAs Klimasvar er der fokus på at udnytte denne synergi. Således er der indregnet el fra vindkraft til elektrificeringen af de øvrige sektorer, og der er indregnet følgende energilagre samt overkapaciteter i anlæg for at øge fleksibiliteten af:

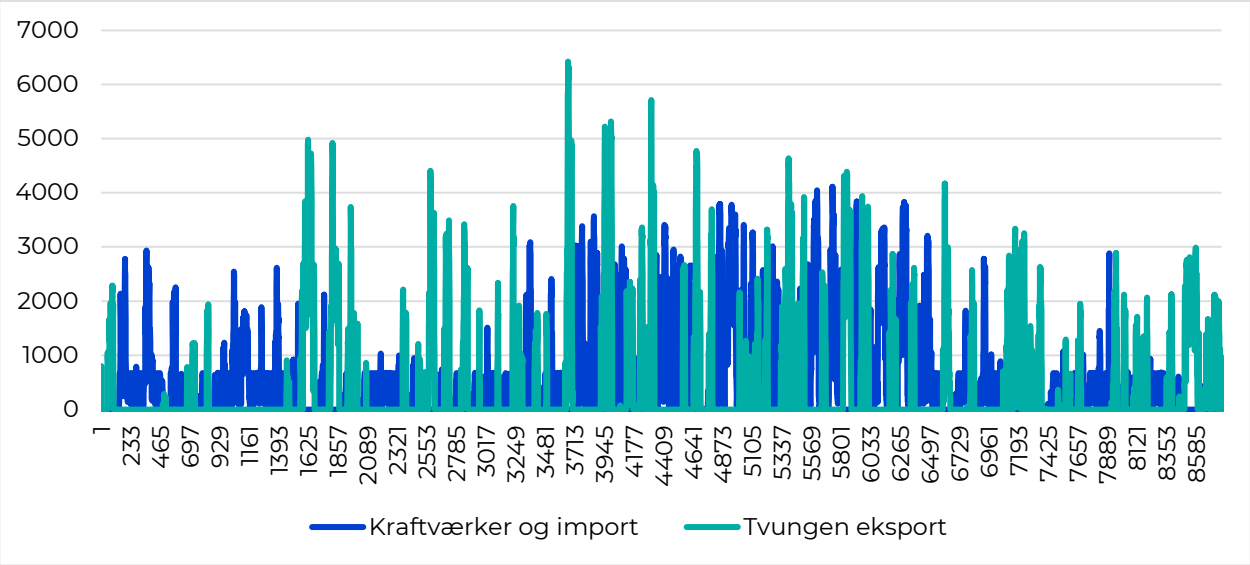
- Store varmelagre på i alt 112 GWh.
- Udnyttelse af de eksisterende naturgaslagre og etablering af brintlagre på i alt 40 GWh.
- Overkapacitet på elektrolyseanlæg svarende til en 50 pct. udnyttelse.
- Udnyttelse af sæsonafhængig overkapacitet på varmepumper samt el-kedler for 700 MW.
- Udnyttelse af batterier (14 GWh) i el-køretøjer vha. intelligent opladning.
- Fleksibelt elforbrug (primært indenfor døgn) på ca. 2,5 TWh ud af et klassisk el-forbrug på 30 TWh.

Energisystem-analyserne i IDAs Klimasvar viser, at disse tiltag bringer ubalancerne mellem produktion og forbrug af el i det samlede system ned på et niveau, der kan udtrykkes ved følgende:

- En tvungen el-eksport hhv. stop af vindmøller på 3,60 TWh/år svarende til 6 pct. af den samlede el-produktion.
- En produktion af el på spids- og reservelast kraftværker eller fra import også på 3,65 TWh/år svarende 6 pct. af det samlede elforbrug.

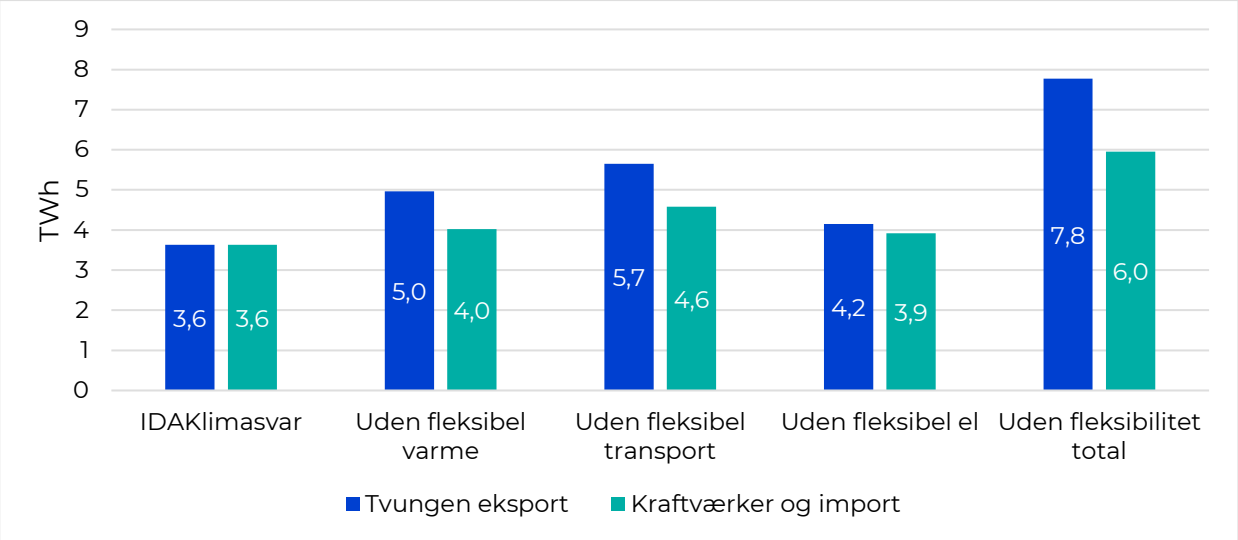
Figur 9 viser den tidsmæssige fordeling af disse ubalancer i form af resultatet af en timesimulering af energisystemet i 2030.

Figur 9. Ubalancer mellem elforbrug og produktion i 2030 i en timesimulering af det samlede energisystem.



Hvis der ikke investeres i og gennemføres omlægninger, der sikrer fleksibilitet og sektorintegration, ville ubalancerne være væsentligt større. I figur 10 er vist hvordan den tvungne el-eksport ville stige fra 3,6 TWh til næsten 8 TWh. Figuren viser også, hvordan det især er bidrag til fleksibilitet fra varme- og transportsektoren, der betyder noget. Ud over tvungen eksport og øget behov for kraftværker og import, har mangel på fleksibilitet også betydning for CO_2-emissionen og presset på biomasse. Uden fleksibilitet stiger CO_2-emissionen således fra 11,5 til knap 12,2 Mt og biomasseforbruget (inkl. affald) fra 150 til 162 PJ i 2030.

Figur 10. Ubalancer i energisystemet i 2030 med og uden sektorintegration og fleksibilitet.



IDAs Klimasvar stiler efter, at Danmark skal kunne leve op til princippet om, at vi skal bidrage med vores andel af fleksibilitet og reservekapacitet på el-nettet i en Europæisk sammenhæng. Med dette princip vil en del af ubalancen kunne afhjælpes til gensidig fordel ved udveksling med vores nabolande. Ift. opgørelsen af CO_2-reduktioner er det forudsat, at halvdelen af denne ubalance kan udveksles med nabolande til gensidig fordel. Dvs. forskelle i vind og sol mellem landene samt lagermuligheder i især den norske vandkraft forudsættes at udligne hinanden uden at dansk import fører til øget kraftværksproduktion.

Herved lander den samlede CO_2-emission for transport og energi på lidt under 11 Mt i 2030.

11 Biomasse

Det nuværende forbrug af biomasse inkl. affald er i Danmark vokset fra ca. 20 PJ i 1980 til knap 170 PJ i 2018, hvoraf 75 PJ (primært træflis) er importeret.

I IDAs Klimasvar bringes det samlede biomasseforbrug ned på ca. 150 PJ, hvoraf 35 PJ er biogas og 13 PJ er affald. Anvendelse af affald indregnes som halveret for at sikre at energisystemets behov ikke kommer til at stå i vejen for øget genbrug og genanvendelse, og mængden af importeret træflis reduceres til ca. 50 PJ. Ved en aktiv satsning på anvendelse af danske træressourcer burde importen af træpiller yderligere kunne reduceres til ca. 20 PJ.

Målt per capita bringes biomasseforbruget ned fra ca. 29 GJ/capita til ca. 26 GJ/capita.
Herved er Danmark godt på vej til at bringe sig i en situation, hvor vi holder os indenfor vores andel af et globalt bæredygtige biomasseforbrug.

Tabel 11. Udfordringer ved biomasseforbrug i Danmark og globalt

	Biomasseforbrug pr. person
I dag i DK (166 PJ)	29 GJ/capita
Seneste forskning for EU (8500 PJ) (Hamelin *et al.*, 2019)	17 GJ/capita
EU 2050 scenarioer (A Clean Planet for all)	14 - 21 GJ/capita
IDA 100 pct. VE i 2050 (200 PJ – Dansk andel)	32 GJ/capita
Energistyrelsens scenarioer fra 2014	35 – 45 GJ/capita

12 Vedvarende energi

Ud over biomassen skal der for at realisere IDAs Klimasvar investeres og udbygges med følgende vedvarende energi ressourcer:

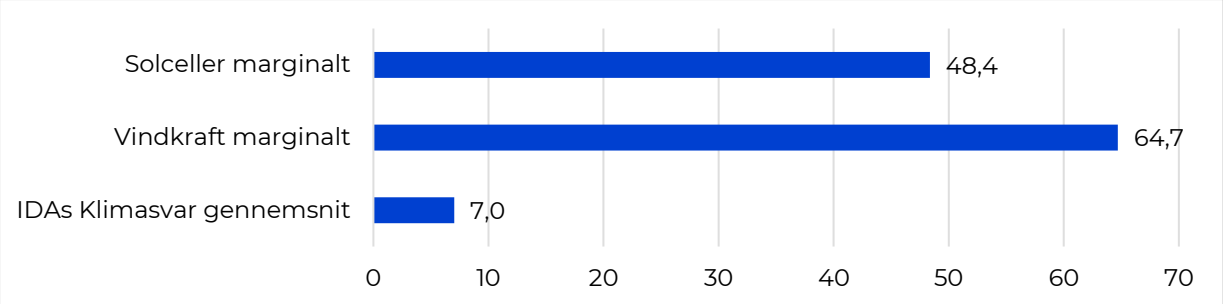
- Solvarme i fjernvarmen svarende til 6-7 PJ.
- Solvarme i individuelle boliger til supplement af varmepumper svarende til 8-9 PJ.
- 500 MW geotermi med en fjernvarme produktion på 13-14 PJ.
- Solceller på store tage udbygges fra ca. 1.000 MW i 2020 til 5.000 MW i 2030.
- Vindkraft onshore udbygges fra ca. 4.200 MW i 2020 til mindst 4.800 i 2030.
- Vindkraft offshore udbygges fra ca. 2.000 MW i 2020 til 6.630 i 2030.
- Bølgekraft (132 MW) (dog med vind som alternativ).

Som det fremgår, er der tale om en markant udbygning med især vind og sol. I IDAs Klimasvar er der regnet med en moderat udbygning med onshore vind. Det anbefales at undersøge mulighederne for en større andel af vindmøller på land, da dette vil reducere de samlede omkostninger til udbygning af vind.

Udbygningen er afstemt med dels el-behov og dels fleksibiliteten i systemet jf. afsnittet om sektorintegration. Således er el-ubalancen udtrykt i den tvungne el-eksport og i behovet for kraftværks-produktion eller import reduceret til 3,6 TWh ud af en el-produktion fra vind, sol og bølgekraft på i alt over 50 TWh - svarende til en ubalance på ca. 7 pct. af VE-produktionen.

Imidlertid er den marginale ubalance langt større, hvis fx vindkraften øges marginalt vil i størrelsesordenen 65 pct. gå direkte til tvungen eksport. For solceller er tallet lidt lavere, her vil ca. 50 pct. gå til tvungen eksport. Se figur 11. Disse tal viser, at IDAs Klimasvar har den rigtige balance i udbygningen med vind og sol. Hvis mængderne øges yderligere, vil den største del af produktionen gå til tvungen eksport.

Figur 11. Den marginale ubalance ved mere vindkraft eller solceller sammenlignet med den gennemsnitlige i IDAs Klimasvar 2030



13 Teknologiske udfordringer

IDAs Klimasvar sætter fokus på dels at identificere de teknologier, som vil kunne opfylde 70 pct. målsætningen i 2030 på en samfundsøkonomisk god måde, og dels på hvilke nye teknologier, som vi får brug for frem mod målet om klimaneutralitet, også selvom de ikke nødvendigvis bidrager væsentligt i 2030.

Velkendte teknologier som er bærende for at opfylde 70 pct. målsætningen

- Opfyldelse af bygningsreglement for nye og eksisterende bygninger
- Energirenovering af eksisterende bygninger
- Udnyttelse af overskudsvarme fra industri
- Udbygning med fjernkøling med kølelagre samt anvendelse af grundvandkøling
- Udvidelse af fjernvarme-områder
- Erstatning af olie- og naturgasfyr med fjernvarme og individuelle varmepumpe
- Onshore og offshore vindmøller
- Solceller primært opsat på store tage i industrien omkring store byer eller på parkeringspladser mv.
- Bevarelse af decentrale gasfyrede kraftvarmeværker samt opførelse af nye gasfyrede kraftvarmeværker
- Udbygning med biogas til industri og kraft- og kraftvarmeværker
- Biomasse; træ, affald, biogas mv. til kraftvarme og kraftværker og træflis, halm til fjernvarmekedler
- Solvarme til fjernvarme og individuel opvarmning
- Udbygning af den kollektive transport, cykelinfrastruktur, anvendelse af byplanlægning
- Udbredelse af elbiler og plug-in-hybridbiler, varebiler og busser på batteridrift eller plug-in hybrid, delvis elektrificering af tung transport (lastbiler, færger, strømkabler ved havne, elektrificering af motorcykler og små køretøjer samt specialkøretøjer
- Intelligent integration af vind og sol i elnettet, herunder placering i det eksisterende elnet tæt på store eksisterende forbrugscentre og nye store forbrug, med henblik på at undgå unødigt udbygning af elnettet

Delvist velkendte, delvist nye teknologier, som vi skal udvikle og som også får betydning i 2030

- Store varmepumper i fjernvarmen i samspil med industriel overskudsvarme, fjernkøling og omgivelsesvarme fra bl.a. drænvand og spildevand mv.
- Store sæsonvarmelagre, særligt i fjernvarmeforsyningen
- Geotermi
- Omlægning til 4. generations lavtemperatur fjernvarme
- Udnyttelse af overskudsvarme fra datacentre og elektrolyseanlæg til fjernvarme
- Intensiv energieffektivisering i industrien
- Erstatning af kul og olie med el og biomasse i industrien
- Elektrolyseanlæg med fleksibel drift i forhold til el fra vedvarende energikilder og elnet-belastning (fuldlasttid på cirka 50 pct.)

- Store brintlagre som anvendes fleksibelt i samspil med elektrolyseanlæg og elektrofuelsproduktion
- Integrerede elektrofuelsproduktioner med Carbon Capture anlæg, CO_2-lagre og kemisk syntese (DME, Metanol, Ammoniak)
- Fleksibel drift af eksisterende biomassefyrede kraftvarmeværker
- Roadpricing systemer med GPS, kontrolfunktioner og opkrævning
- Storskala intelligent opladning af elkøretøjer

Nye teknologier vi skal udvikle på nu, fordi vi skal bruge dem efter 2030

- E-roads til lastbiler med delvis batteridrift
- Mere effektive elektrolyseanlæg (SOEC)
- Videreudvikling af stor-skala elektrolyseanlæg og integrerede løsninger til elektrofuelsproduktion, herunder carbon capture og kemisk syntese
- Storskala elektrolyse og elektrofuels inkl. Carbon Capture (vigtigt teknologi for både CCU og CCS)
- Storskala termisk forgasning af biomasse, pyrolyse og HTL samt evt. andre teknologier der kan konvertere biomasse til gas eller flydende brændsler
- Storskala forsøg med halm i biogasanlæg
- Kraftig opskallering af elektrofuelsproduktion til fly
- Bølgekraft (dog med vindmøller som alternativ)

Appendiks A: Forudsætninger for Økonomiberegning

Investeringsomkostninger, levetider og drift- og vedligeholdelse er baseret på Energistyrelsen og Energinets pt nyeste Teknologikataloger (Energistyrelsen, 2020). Hvor der er forskel til forventningerne til omkostninger for den enkelte teknologi i 2030 sammenlignet med 2020 er generelt anvendt en gennemsnitsomkostning, i det investeringerne forventes fortaget jævnt i perioden mellem 2020 og 2030. I omkostningsopgørelsen er investeringsomkostninger omregnet til en årlig udgift baseret på en samfundsøkonomisk kalkulationsrente på 3 pct. Hvor omkostninger ikke foreligger i Teknologikatalogerne, eller hvor andre omkostninger er mere relevante, er det angivet under de enkelte afsnit.

Mht. brændselspriser er anvendt Energistyrelsens seneste fremskrivning fra "Samfundsøkonomiske beregningsforudsætninger 2019" fra oktober 2019 (Energistyrelsen, 2019d). Som udgangspunkt er brugt brændselspriser for 2030 for vurderingen af klimasvaret enkelte tiltag. Dog er der brugt 2020 priser for opgørelsen af de nuværende omkostninger, hvor der er sammenlignet med 2020.

Tabel 12. Import/verdensmarkedspriser

[2019-EURGJ]	Kul	Brændselsolie	Diesel/ gasolie	Petrol/ JP	Ngas	Biomasse	Tør biomasse
2019	3,1	8,0	12,5	12,5	7,2	6,1	8,8
2030	2,9	10,4	15,0	14,9	6,6	6,6	8,8

Biomasse er defineret som 50 pct. Træflis import og 50 pct. træflis af DK-producent. Tør Biomasse er sat ift. træpiller (industri).

Tabel 13. Håndteringsomkostninger

[2019-EURGJ]	An kraftværk	An værk	An forbruger
Kul	0,18		
Fuelolie	0,30		
Gasolie	0,30	1,18	3,30
Diesel			3,30
Benzin			3,76
JP1			0,30
Træflis	4,85	3,95	
Træpiller	0,30	0,91	4,27
Biomasse	3,66	3,95	6,45

Energistyrelsen tager udgangspunkt i IEAs World Energy Outlook fra 2018 (International Energy Agency, 2018), hvor de bruger "New policies" scenariet. IEA forventer en lavere kulpris i 2025 ift 2017, men ca. den samme kulpris i 2040 som i 2017. Ved olie forventer IEA mere end en fordobling af olieprisen i 2040 ift 2017, hvor den stiger mest fra 2017 til 2025 fra 61,3 kr/GJ til 103,1 kr/GJ (132,3 kr/GJ i 2040). IEA forventer, at naturgasprisen for Europa stiger ift. 2017 , hvor Energistyrelsen forventer et fald i naturgasprisen i de kommende år (Energistyrelsen, 2019d).

Appendiks B: International fly og skibs-trafik

Formålet med dette appendiks er at lave et estimat over Danmarks andel af den internationale fly og skibsfart.

International Flytransport
I de internationale opgørelser udregnes for hvert land det brændstofforbrug og den CO_2-emission, der knytter sig alle fly der starter i det pågældende land og frem til første destination. Tallet sammenholdes ofte med optankningen i det pågældende land, og der er typisk overensstemmelse mellem disse tal.

De tal, der findes i statistikkerne, opgør således hvor meget, der er tanket i det enkelte land, men ikke hvor meget det enkelte lands indbyggere har rejst. Hvis man regner for hele verden er disse tal i sagens natur ens og forbruget er ca. 2 GJ per indbygger per år (FN, 2015). Danskere må imidlertid forventes at have en højere andel end verdensgennemsnittet. I tabellen herunder er udregnet en række tal for forskellige geografiske områder.

Tabel 14. Håndteringsomkostninger

	Befolkning	**Jet Petrol (tanket)**			**Per capita**	**DK-andel**	**CO_2-emission**	**Kilde**
Geografi	Millioner	k ton	M liter	PJ	GJ/indb.	PJ/år	Mt/år	
Verden	7.600	300.000		15.938	2,1	12	1.148	[1]
Europa	741	50.000		2.656	3,6	20	191	[1]
Norden	27,3		4.540	170	6,2	35	12,2	[2]
Sverige	10,1		1.000	37	3,7	21	2,7	[2]
Danmark	5,6		1.200	45	8,0	45	3,2	[2]
Omsætningsfaktorer		704 kg/liter		37,4 GJ/liter		72 kg CO_2/GJ		

Kilde [1]: https://unstats.un.org/unsd/energystats/pubs/yearbook/2015/t20.pdf
Kilde [2]: https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2016/09/FULLTEXT_Sustainable_Jet_Fuel_for_Aviation.pdf

Tabellen viser, at hvis danskerne rejser som verdens gennemsnittet er Danmarks andel ca. 12 PJ/år, mens der i Danmark bliver tanket op for, hvad der svarer til 45 PJ/år (Wormslev *et al.*, 2016). Opgjort på den sidste måde er tallet for en svensker under det halve af, hvad det er for en dansker. Det er formodentligt et udtryk for, at både svenskere og danskere i stort omfang bruger Kastrup lufthavn som fælles udrejsested. Det danske tal er derfor formodentligt for højt, mens det svenske er for lavt. Et godt bud kunne være det nordiske gennemsnit, hvoraf den danske andel udgør 35 PJ/år.

En anden måde at anskue opgørelsen på, er at se på rejsetal for Kastrup lufthavn. Iflg. årsopgørelsen fra Kastrup for 2018 (Københavns Lufthavn, 2018) var 38 procent af de rejsende danskere, mens 62 pct. var fra udlandet. Under halvdelen af de rejsende er danskere og sydsvenskere. *"I dag er det udenlandske rejsende på besøg i Danmark og udenlandske transferpassager, der*

flyver via CPH, der fylder mest i terminalerne" lyder det i opgørelsen. Ud fra disse tal kan man lave et estimat baseret på, at 38 pct. af forbruget er dansk for udrejsens vedkommende. Imidlertid skal de samme passagerer hjem igen, hvor flyet tankes i udlandet. Tallet bør derfor ganges med 2. Tallet er for højt hvad angår den del af danskerne, der rejser indenlands, for her tankes retur-flyet i Danmark. Til gengæld er det for lavt, hvis det medregnes at danskere på lange rejser bruger yderligere mellemlandinger end Kastrup. Disse to forhold vægter i hver sin retning, men udligner ikke nødvendigvis hinanden. Med denne metode er et estimat at sige 2 gange 38 pct. af 45 PJ = 34 PJ.

Begge metoder peger således på et tal for det samlede flyarbejde for danskere på 34-35 PJ/år. Dette tal kan så opdeles på indenlands 1,4 PJ/år (iflg. Statistikken) og international flytransport 33 PJ/år.

I andre studier har man forsøgt sig med andre opgørelsesmetoder. I (Teknologirådet, 2012) opgøres international fly på samme måde som ovenfor med udgangspunkt i rejsestatistik fra Kastrup lufthavn, idet international lufttransport *"er blevet reduceret med 35 pct. og 25 pct. (40 pct. af det totale er tilbage) for at tage forbehold for den del af transporten, der er relateret til henholdsvis udenlandske borgere og transit"*. Med denne opgørelsesmetode fremkommer et tal i størrelsesordenen 15-20 PJ.

I (Christensen, 2016) er lavet en opgørelse for 2010 baseret på en verdensomspændende billetdatabase , som viser antallet af billetter på hver enkelt rute fordelt på bl.a. nationaliteter. Desuden er anvendt en database over flyruter og typen af fly på hver rute samt data for emissioner for hver flytype. Denne metode kommer frem til en CO_2-emission på 3,7 Mt/år i 2010, hvoraf de 2,7 Mt/år svarende til 37,5 PJ kan henføres til danske rejsende ud af Danmark. Resten er danskernes rejser videre ude i verden. Fremskrevet med en tilsvarende stigning som udviklingen i Energistatistikkens tal for udenrigsfart svarer det for udrejserne til i størrelsesordenen 45-50 PJ/år i 2020.

I (Olesen, 2015) er lavet en opgørelse baseret på forskellig statistik og antagelser om transport af gods og danske rejsende, som kommer frem til at de *"samlede udledninger for danskeres og danske varers internationale flytransport skønnes derfor til at være i alt mindst 30 pct. større end udledninger fra brug af flybrændstof solgt i Danmark til internationale flyvninger"*. Dette svarer til et tal i størrelsesordenen 50-55 PJ.

Konklusion: Her er det valgt at anvende Energistatistikkens tal for udenrigsluftfart, som i seneste opgørelse for 2018 var 42,9 PJ og (før corona-krisen) i Energistyrelsens Basisfremskrivning 2019 (Energistyrelsen, 2019b) var forventet 41,6 PJ i 2020 stigende til 44,1 PJ i 2030. Tallet har den fordel, at det opgøres og indmeldes i FN systemet, og når alle landes tilsvarende opgørelser, lægges sammen fås det fulde billede. Efter alt at dømme er tallet også i den rigtige størrelsesorden. Dog tyder de mere detaljerede undersøgelser på, at det reelle tal for danske rejsenes brændselsforbrug er højere end energistatistikkens opgørelse.

International skibstransport

Brændselsforbrug og CO_2-emissoner for skibsfart opgøres efter samme princip som for fly. CO_2-udledningen fra danske skibe, der sejler i international fart – dvs. mellem havne i to forskellige lande – tæller således ikke med i de danske opgørelser. De danske opgørelser bygger på brændstofsalget i Danmark til skibe, der sejler mellem to danske havne (national søfart), og skibe, der sejler fra en dansk havn til en udenlandsk havn (international søfart). International skibsfart reguleres af FN's internationale søfartsorganisation, IMO. Hvert femte år udgiver IMO et 'Greenhouse Gas Study', der opgør udledningerne af CO_2 og andre drivhusgasser fra international skibsfart.

I den seneste rapport fra 2014 (International Maritime Organization (IMO), 2014) er emissionerne fra den globale skibstransport opgjort til 796 million ton i 2012. Næste opgørelse er planlagt til at udkomme i efteråret 2020 og indeholder også scenarier for udledningen frem mod 2050.

Fordelt efter befolkning svarer Danmarks andel til ca. 8 PJ/år. Samme år blev der i Danmark tanket ca. 21,7 PJ til skibe i udenrigsfart.

I (Olesen, 2015) er der lavet estimat baseret på vareimport og skøn over fragtlængder, der kommer til et tal i størrelsesordenen 5 Mt CO_2 per år, hvor de 33 PJ kun svarer til ca. det halve.

Konklusion: Her er det valgt at anvende Energistatistikkens tal for udenrigs bunkring, som i seneste opgørelse for 2018 var 24,9 PJ. Tallet har den fordel, 1) at det er opgjort på samme måde som for international luftfart, 2) at det opgøres og indmeldes i FN systemet, og 3) når alle landes tilsvarende opgørelser lægges sammen fås det fulde billede.

Referencer

1. Brynolf, S. *et al.* (2018): 'Electrofuels for the transport sector: A review of production costs', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon, 81, pp. 1887–1905. doi: 10.1016/J.RSER.2017.05.288.

2. Christensen, L. (2016): 'Environmental Impact of Long Distance Travel', *Transportation Research Procedia*, 14, pp. 850–859. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.033.

3. Danish Energy Agency & Cowi (2013): *Alternative drivmidler*.

4. Dyrelund, A. *et al.* (2008): *Varmeplan Danmark*.

5. EA Energianalyse (2018): *Samfundsøkonomisk værdi af varmebesparelser*.

6. Energistyrelsen (2019a): *Analyseforudsætninger til energinet*.

7. Energistyrelsen (2019b): *Basisfremskrivning 2019*. Available at: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/bf19.pdf.

8. Energistyrelsen (2019c): *Fremskrivning af olie og gas*. Available at: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/b12_oliegas.pdf.

9. Energistyrelsen (2019d): *Samfundsøkonomiske beregningsforudsætninger for energipriser og emissioner*.

10. Energistyrelsen (2020): *Teknologikataloger*. Available at: https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/teknologikataloger.

11. FN (2015): *Production, trade and supply of jet fuels*. doi: 10.18356/bf40f6d8-en.

12. Hamelin, L. & M. Borzęcka & M. Kozak & R. Pudełko (2019): *A spatial approach to bioeconomy: Quantifying the residual biomass potential in the EU-27*, Renew. Sustain. Energy Rev. 100 (2019) 127–142. doi:10.1016/j.rser.2018.10.017. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307214

13. International Energy Agency (2018): *World Energy Outlook*. Available at: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018.

14. International Maritime Organization (IMO) (2014): *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014*, *International Maritime Organization (IMO)*. doi: 10.1007/s10584-013-0912-3.

15. Københavns Lufthavn (2018): 'Årsrapport'. Available at: https://www.cph.dk/om-cph/investorer/trafikstatistik/2019/1/rekord-i-cph-303-millioner-rejsende-i-2018.

16. Kromann, M. & H. Kragerup & M. Dalsgaard (2015): *ENERGISPAREPOTENTIAL*.

17. Lund, H. & B. V. Mathiesen (2006): *IDAs Energy Plan 2030.* Danish Society of Engineers. IDA. Copenhagen.

18. Lund, Henrik. *et al.* (2014): '4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems.', *Energy*, 68. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.

19. Lund, Henrik *et al.* (2014): 'Heat Saving Strategies in Sustainable Smart Energy Systems', *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 04, pp. 3–16. doi: 10.5278/ijsepm.2014.4.2.

20. Lund, H. *et al.* (2018): 'The status of 4th generation district heating: Research and results', *Energy*, 164, pp. 147–159. doi: 10.1016/j.energy.2018.08.206.

21. Lund, Henrik & Jakob Zinck Thellufsen (2019): EnergyPLAN Advanced Energy Systems Analysis Computer Model Documentation Version 15", Sustainable Energy Planning Research Group, Aalborg University, Denmark, September 2019. Published online at www.EnergyPLAN.eu. https://www.energyplan.eu/wp-content/uploads/2019/09/EnergyPLAN-Documentation-Version15.pdf

22. Mathiesen, B. *et al.* (2014): *CEESA 100% renewable energy transport scenarios towards 2050 : coherent energy and environmental system analysis : technical background report part 2*. Available at: https://vbn.aau.dk/da/publications/ceesa-100-renewable-energy-transport-scenarios-towards-2050(8f59ea50-514a-4a6c-aaf8-ddc949612129).html.

23. Mathiesen, B. V. *et al.* (2015): *IDA's Energy Vision 2050. A Smart Energy System strategy for 100% renewable Denmark*. Aalborg.

24. Mathiesen, B. V. *et al.* (2016): *FUTURE GREEN BUILDINGS A KEY TO COST-EFFECTIVE SUSTAINABLE ENERGY SYSTEMS*. Copenhagen.

25. Mathiesen, B. V. *et al.* (2017): *The role of Photovoltaics towards 100 % Renewable energy systems*.

26. Mathiesen, B. V. & H. Lund & K. Karlsson (2009): *IDA ´s Climate Plan 2050.* Danish Society of Engineers. IDA. Copenhagen.

27. Olesen, Gunnar Boye (2015): *Drivhuseffekter fra (dansk) international transport*. Available at: https://ve.dk/wp-content/uploads/2013/01/energivision_2014_international-dansk-transport.pdf.

28. SDU & COWI. (2014): *Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system*. Available at: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Bioenergi/carbon_footprint_of_bioeneergy_pathways_for_the_future_danish_energy_system_-_final_210314_l.pdf.

29. Thomsen, Michael Lundgaard, formand A. P. (2020): *Regeringens Klimapartnerskaber. Partnerskab for Energitung Industri. AFRAPPORTERING, 13. MARTS 2020*.

30. Teknologirådet (2012): *Dansk transport uden kul og olie - hvordan?*, *Research Report*. Available at: papers://ef64220a-a077-48ec-ae81-be13b32d2073/Paper/p1037.

31. Trængselskommissionen (2013): *Afrapportering om landsdækkende roadpricing Arbejdsgruppen*.

32. Wormslev, Erik C. & Jakob Louis Pedersen, *et al.* (2016): *Sustainable Jet Fuel for Aviation*. doi: http://dx.doi.org/10.6027/TN2016-538.