



**in.RET**

Institut für  
Regenerative Energietechnik

# Szenarien zur Entwicklung des Thüringer Energiebedarfs bis 2045

## Entwicklung des Thüringer Energiebedarfs bis 2045

Eine systematische Betrachtung der Entwicklung der Energiebedarfe Thüringens in den kommenden Dekaden erfolgte zuletzt 2015 im Rahmen der Erstellung einer integrierten Energie- und Klimastrategie des Landes [1]. Nachfolgende Studien, wie beispielsweise im Rahmen des ZO.RRO I Projektes [2], bauten auf diesem Zahlenwerk auf. Sowohl die energiepolitische Diskussion als auch die technologische Entwicklung haben sich seither weiterentwickelt. Im Rahmen des ZO.RRO II Projektes wurden daher die Nutz- und Endenergiebedarfe Thüringens analysiert und hinsichtlich ihrer zukünftigen Entwicklung neu bewertet.

In diesem Bericht werden zunächst für das Jahr 2020 die sektoralen Nutzenergiebedarfe Thüringens, ihre anteilige Bereitstellung durch unterschiedliche Energiewandler sowie deren Wirkungsgrade bestimmt. Dazu werden die sektoralen Endenergieverbräuche aus der Thüringer Energiebilanz den Nutzenergiekategorien zugeordnet. Anschließend erfolgt eine Hochrechnung auf die Jahre bis 2045 sowie eine Unterscheidung hinsichtlich der betrachteten Energieszenarien.

### Energieszenarien

Im Rahmen dieser Studie wurden für den Energieverbrauch Thüringens zwei Szenarien entwickelt, die hinsichtlich der dynamischen energiepolitischen Diskussion regelmäßig überprüft und weiterentwickelt werden sollen:

- Basisszenario
- Innovatives Szenario

Bei beiden Szenarien handelt es sich um Zielszenarien, d.h. die energie- und klimapolitischen Ziele des Landes werden erreicht. Dazu wird in beiden Szenarien von einem schnellen und umfangreichen Ausbau der Erneuerbaren Energien in Thüringen ausgegangen.

Das **Basisszenario** ist ein eher konservatives Szenario, das davon ausgeht, dass Veränderungen zugunsten des Klimaschutzes sich nur langsam durchsetzen. Das betrifft sowohl die Sanierungsrate von Wohn- und Gewerbebauten, die Nutzung von Sektorkopplungstechnologien im Bereich der Raumwärme oder bei der Bereitstellung von Prozesswärme. Im Mobilitätsbereich wird von einer nur geringen Bereitschaft für Verhaltensänderungen ausgegangen. Aufgrund der langsamen Substitution von Öl- und Gasbrennern sowie Verbrennungsmotoren verbleibt in diesem Szenario auch im Jahr 2045 noch ein Bedarf an kohlenstoffbasierten Brenngasen und Kraftstoffen.

Demgegenüber ist das **Innovative Szenario** von einer hohen Bereitschaft geprägt, innovative Technologien im Sektorkopplungs- und Umwandlungsbereich einzusetzen. Eine höhere Sanierungsrate führt zu einem geringeren Raumwärmebedarf, allerdings nimmt der Strombedarf durch Gebäudeautomation und -klimatisierung zu. Im Verkehrsbereich werden Effizienzpotentiale durch Verhaltensänderungen erschlossen. Auch hier verbleibt im Jahr 2045 noch ein geringer Bedarf an kohlenstoffbasierten Brenngasen und Kraftstoffen.

## Nutzenergiekategorien

In diesem Bericht werden zunächst für das Basisjahr 2020 die sektoralen Nutzenergiebedarfe Thüringens, ihre anteilige Bereitstellung durch unterschiedliche Energiewandler sowie deren Wirkungsgrade festgelegt. Dazu werden die sektoralen Endenergieverbräuche aus der Thüringer Energiebilanz [3] mit Hilfe von Tabelle 1 und unter Berücksichtigung der Umwandlungswirkungsgrade den Nutzenergiekategorien zugeordnet.

T 1 basiert auf der Anwendungsbilanz der AG Energiebilanzen [4] [5] [6] und kann wie folgt gelesen werden: Der Sektor Industrie setzt 67 Prozent seines Endenergieverbrauchs für die Bereitstellung von Prozesswärme ein. Die innerhalb des Sektors Industrie eingesetzte Kohle dient zu 97,3 Prozent der Bereitstellung von Prozesswärme.

**Tabelle 1: Zuordnung der Endenergieverbräuche 2020 zu den Nutzenergiekategorien in %**

	Raumwärme Warmwasser	Prozess- wärme	Klima- und Prozesskälte	Stroman- wendungen	Traktion
<b>Industrie</b>	<b>6,4</b>	<b>67,0</b>	<b>2,2</b>	<b>24,4</b>	<b>0</b>
- Kohlen	2,7	97,3	0	0	0
- Mineralöle	12,6	86,0	0	1,4	0
- Gase	10,2	87,3	0	2,5	0
- Biomasse	18,3	81,7	0	0	0
- Strom	0,5	17,1	7,1	75,3	0
- Fernwärme	10,7	89,3	0	0	0
<b>Verkehr</b>	<b>0,5</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,9</b>	<b>98,5</b>
- Mineralöle	0,4	0	0,1	0,7	98,8
- Gase	0	0	0	0	100,0
- Erneuerbare	0,4	0	0,1	0,7	98,8
- Strom	5,1	0	0	10,2	84,7
<b>Haushalte</b>	<b>83,9</b>	<b>0</b>	<b>4,5</b>	<b>11,6</b>	<b>0</b>
- Kohlen	100,0	0	0	0	0
- Mineralöle	99,3	0	0	0,7	0
- Gase	100,0	0	0	0	0
- Biomasse	100,0	0	0	0	0
- Solarthermie	100,0	0	0	0	0
- Umweltwärme	100,0	0	0	0	0
- Strom	17,3	0	1,0	81,7	0
- Fernwärme	100	0	0	0	0
<b>GHD</b>	<b>50,7</b>	<b>8,4</b>	<b>5,3</b>	<b>35,6</b>	<b>0</b>
- Kohlen	100,0	0	0	0	0
- Mineralöle	53,7	4,2	0	42,1	0
- Gase	87,2	11,6	0,8	0,4	0
- Biomasse	86,3	13,7	0	0	0
- Strom	10,3	6,2	13,8	69,7	0
- Fernwärme	74,9	25,1	0	0	0

Folgende Änderungen wurden gegenüber der Anwendungsbilanz der AG Energiebilanzen für Deutschland [4] vorgenommen: Im Sektor Haushalte wurden die Prozessenergien für das Kochen sowie den Betrieb von Kühlgeräten nicht der Prozesswärme bzw. Prozesskälte sondern den Stromanwendungen zugeordnet. Für die Sektoren GHD und Industrie wurden alle Anwendungen mechanischer Energie den Stromanwendungen zugeordnet. Die im Sektor Verkehr ausgewiesenen anteiligen Energieeinsätze für Raumwärme und Stromanwendungen (z.B. für Beleuchtung) sind nur informationshalber dargestellt und werden im weiteren Verlauf nicht weiter mitgeführt.

## Sektor Haushalte

Der Sektor Private Haushalte wird durch die Nutzenergieverbräuche für Stromanwendungen, Raumwärme/Warmwasser sowie Klimakälte abgebildet. Der Stromverbrauch der Wärmepumpen, der zur Einbindung der Umweltwärme notwendig ist, wurde aus den Stromanwendungen herausgerechnet. Diese werden von unterschiedlichen Wandlern gedeckt. Die stoffliche Nutzung von Energieträgern spielt in diesem Sektor keine Rolle. Die folgenden Grafiken geben ausgehend vom den Endenergieverbräuchen des Sektors gemäß der Thüringer Energiebilanz [3] und vermittelt über die Endenergie-Jahresnutzungsgrade EER (energy efficiency ratio) der Energiewandler die Nutzenergiebedarfe des Sektors wieder. Dabei wurden für die Ermittlung der EER [7] bei der Wärmeerzeugung und [8] bei der Kälteerzeugung herangezogen. Der Wandler Festbrennstoffe fasst die Positionen Kohlen und Biomasse zusammen.

Tabelle 2: Nutzenergiebereitstellung im Sektor Haushalte für das Jahr 2020 in TWh

	EER	Raumwärme Warmwasser	Klimakälte		Stromanwendungen		
PtH (Heizstab)	0,99	0,5	4 %				
PtH (Luftwärmepumpe)	3,0	0,2	1,5 %				
PtH (Erdwärmepumpe)	3,4	0,2	1,5 %				
Solarthermie	1,0	0,2	1,5 %				
Festbrennstoffkessel	0,77	1,7	13,5 %				
Heizkessel (Gas)	0,89	6,2	49 %				
Heizkessel (Öl)	0,84	2,4	19 %				
Wärmeübergabestation	0,90	1,2	10 %				
Kompressionskälte	2,9		0,1	100 %			
Elektrogeräte	1,0				2,2	100 %	
<b>Summe Nutzenergie</b>		<b>12,6</b>	100 %	<b>0,1</b>	100 %	<b>2,2</b>	100 %

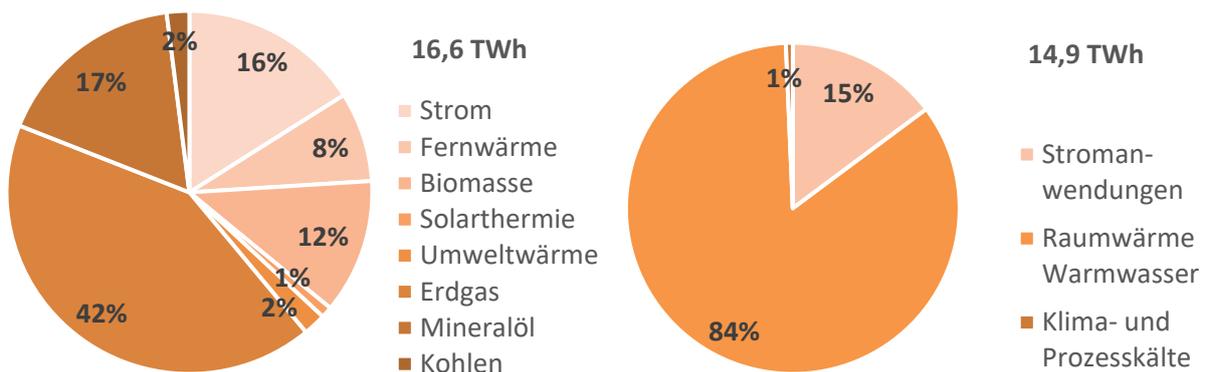


Bild 1: Endenergieverbrauch (links) und Nutzenergiebedarf (rechts) des Sektors Haushalte in Thüringen 2020

Für die Jahre bis 2045 sind einerseits Veränderungen in den Endenergie-Nutzungsgraden zu erwarten: So werden Niedertemperaturkessel bis 2045 weitgehend durch Brennwärtekessel ersetzt sein [7]. Andererseits werden Energieträger wie Kohlen oder Mineralöle eine immer geringere Rolle spielen [1]. Für die zu erwartenden Nutzenergiebedarfe werden die folgenden Annahmen für das **Innovative Szenario I** und das **Basisszenario B** zugrunde gelegt:

- Klass. Stromanwendungen: **-0,5 %/a** | **-0,7 %/a** durch Steigerung der Energieeffizienz [9]. Dabei wird in Szenario I die Steigerung der Energieeffizienz durch den vermehrten Einsatz von Stromanwendung bspw. im Bereich der Gebäudeautomatisierung und der Informations- und Kommunikationstechnik etwas abgedämpft [1].
- Kälte: **+ 4%/a** | **+2 %/a** durch erhöhten Klimatisierungsbedarf. In Anlehnung an die in [10] getroffenen Szenarien für den Wohngebäudebereich. In Szenario B wurde eine etwas konservativere Abschätzung getroffen.
- Raumwärme/Warmwasser: **-2,8 %/a** | **-2,6 %/a** durch Sanierungsmaßnahmen. Darüber hinaus wurden sowohl die prognostizierte Bevölkerungsentwicklung als auch individuelle Wohnraumbedarf in die Rechnung mit einbezogen. Die Berechnungsgrundlagen sind im folgenden Abschnitt erläutert.

Die Abschätzung des zukünftigen Wärmebedarfs des Sektors Haushalte muss eine Reihe z.T. gegenläufiger Entwicklungen berücksichtigen: Zum einen nimmt die Wohnbevölkerung in Thüringen weiter ab. Für die Bevölkerungsentwicklung wurde die Prognose *Thüringen 2040* des Thüringer Landesamt für Statistik herangezogen [11]. Die Bevölkerungsvorausberechnung wurde in Anlehnung an die 14. Koordinierte Vorausberechnung des Bundes und der Länder erstellt und zeigt, wie sich Bevölkerungszahl und Altersaufbau bis 2040 voraussichtlich verändern. Der Trend, der aus den Daten bis 2040 ableitbar ist, wurde bis 2045 extrapoliert.

Die **Wohnfläche**, die bis 2045 in Thüringen benötigt wird, wurde mithilfe der Wohnraumprognose des Bundesinstituts für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR) [12] ermittelt. In der Wohnraumprognose des BBSR wird die Wohnflächennachfrage in den verschiedenen Regionen Deutschlands bis 2030 dargestellt. Für Thüringen wird die Nachfrage pro Planungsregion ausgewiesen. Der in der Prognose des BBSR enthaltenen Trends wurden ausgehend vom Basis 2020 auf 2045 hochgerechnet.

Für die Zusammensetzung des Wohngebäudebestandes wurde in allen Szenarien von einer Neubaurate von 0,3 %/a ausgegangen [13]. Die Wohngebäudesanierungsrate beträgt im Basisszenario 1,5 %/a und im Innovativen Szenario zunächst ebenfalls 1,5 %/a und ab 2031 dann 1,75 %/a [14]. Damit ergeben sich die in Bild 2 gezeigten Entwicklungen der Wohnfläche in Thüringen.

In Tabelle 3 sind die Annahmen bzgl. des spezifischen **Raumwärmebedarfs** der Wohngebäude in Thüringen zusammengestellt. Die Werte beziehen sich auf den Bestand sowie die in der jeweiligen Periode neu errichteten bzw. sanierten Gebäude [14] [13]. Nicht enthalten ist der Warmwasserverbrauch, der pauschal mit 400 kWh pro Person und Jahr angenommen wird [6]. Dabei liegen 60% der Wohnfläche in Thüringen in Ein- bzw. Zweifamilienhäusern (EZFH) und 40% in Mehrfamilienhäuser (MFH) [13].

**Tabelle 3: Heizenergiebedarf in kWh/(m<sup>2</sup>a)**

	Neubau		Sanierung		Unsanierter Bestand	
	EZFH	MFH	EZFH	MFH	EZFH	MFH
Bestand 2020	50	40	85	65	160	105
2021-2025	35	30	70	55	160	105
2026-2030	25	25	60	45	160	105
2031-2035	25	25	60	40	160	105
2036-2040	25	25	60	40	160	105
2041-2045	25	25	60	40	160	105



**Bild 2: Entwicklung der Wohnfläche in Thüringen bis 2045 für das Basisszenario (oben) und das Innovative Szenario (unten) in 1.000 m<sup>2</sup>**

Hinsichtlich der Veränderung des **Heizungsbestandes** wird von einer jährlichen Austauschrate von 3,5 % ausgegangen [14]. Dieser Prozentsatz setzt sich zum einem Teil aus der Sanierungsrate und zum anderen Teil aus einem Austausch ohne begleitende Sanierung zusammen. Im Prozentsatz der Sanierungsrate wurden nur Öl- und Gasheizungen ersetzt, beim übrigen Teil wurde die komplette Beheizungsstruktur zur Grundlage genommen. Die Absatzstruktur für Wärmeerzeuger wurde [14] entnommen und ist in Tabelle 4 dargestellt.

Mit diesen Daten können die Veränderungen im Heizungsbestand für die Wohngebäude in Thüringen ermittelt werden. Die Szenarien unterscheiden sich dabei nur durch die unterschiedlichen Sanierungsraten ab 2031.

Tabelle 4: Absatzstruktur für den Austausch von Wärmeerzeugern, nach [14]

%	Bestand 2020	Absatz 2021-2025	Absatz 2026-2030	Absatz 2031-2040	Absatz 2041-2045
PtH (Heizstab)	4 %	0 %	0 %	0 %	0 %
PtH (Luftwärmepumpe)	1,5 %	31 %	48 %	49 %	49 %
PtH (Erdwärmepumpe)	1,5 %	15 %	24 %	24 %	24 %
Solarthermie	1,5 %	3 %	4 %	4 %	4 %
Festbrennstoffkessel	13,5 %	11 %	11 %	10 %	10 %
Heizkessel (Gas)	49 %	27,5 %	0 %	0 %	0 %
Heizkessel (Öl)	19 %	0,5 %	0 %	0 %	0 %
Wärmeübergabestation	10 %	12 %	13 %	13 %	13 %

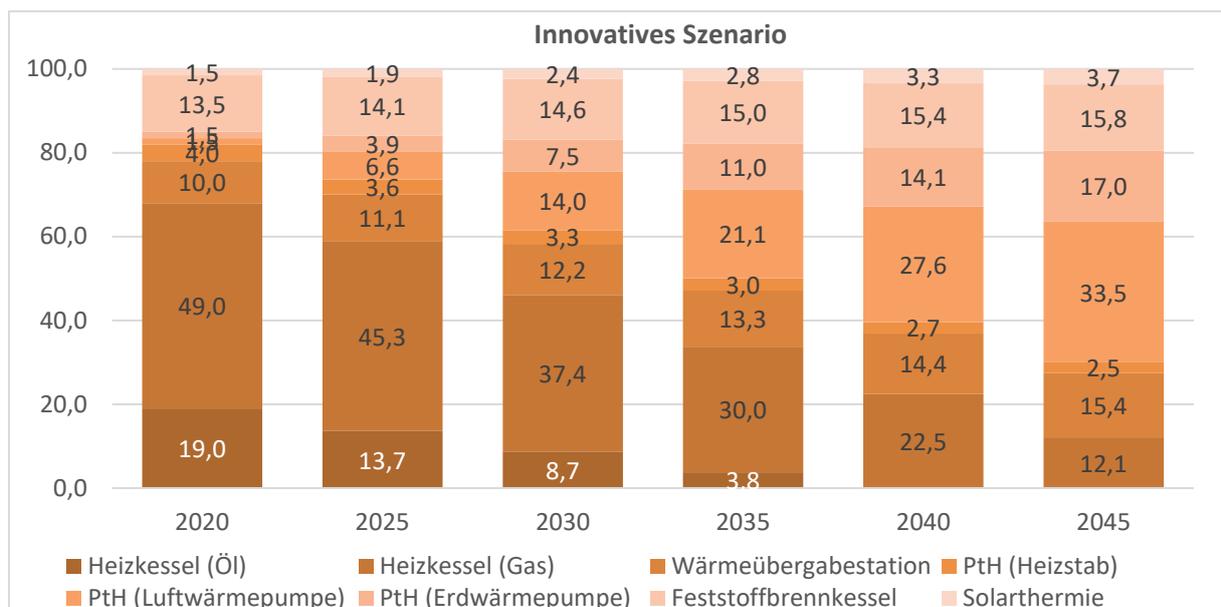
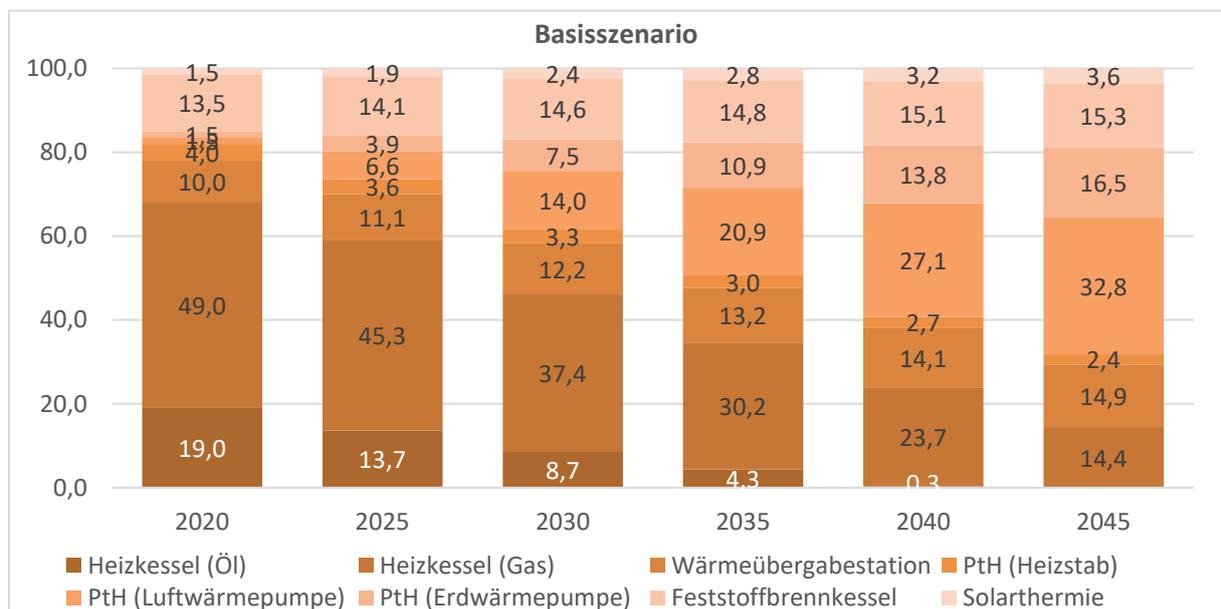
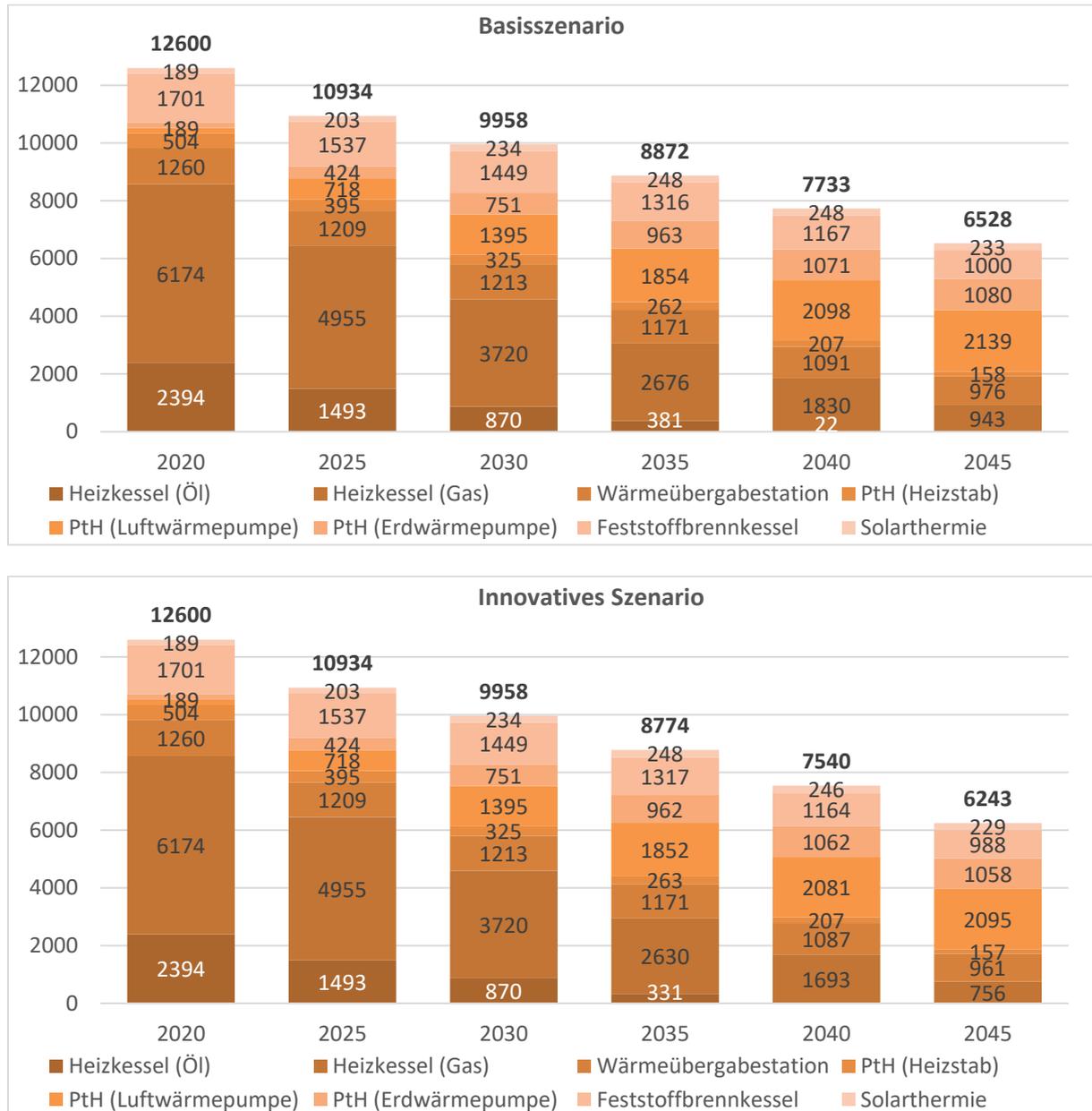


Bild 3: Entwicklung des Heizungsbestandes in Thüringen bis 2045 für das Basisszenario (oben) und das Innovative Szenario (unten) in %

Aus der Heizungsstruktur (Bild 3) kann in Verbindung mit dem Wohngebäudebestand (Bild 2) und dem spezifischen Heizenergiebedarf (Tabelle 3) der Nutzenergiebedarf für Raumwärme/Warmwasser und die Nutzenergiebereitstellung errechnet werden. Die folgende Abbildung 4 zeigt die Entwicklung bis 2045 für die Szenarien.



**Bild 4: Entwicklung des Nutzenergiebedarfs Raumwärme/Warmwasser und seine Bereitstellung im Sektor Haushalte in Thüringen bis 2045 für das Basisszenario (oben) und das Innovative Szenario (unten) in GWh**

Damit kann nun die Entwicklung der Nutzenergiebereitstellung im Sektor Haushalte für das Basisszenario **Szenario B** und das Innovative Szenario **Szenario I** angegebenen werden. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse für die Jahre 2030, 2040 und 2045 dargestellt.

Tabellen 5: Nutzenergiebereitstellung im Sektor Haushalte 2030 - 2040 - 2045 in TWh

2030	EER	Raumwärme Warmwasser		Klimakälte		Stromanwendungen	
		I	B	I	B	I	B
PtH (Heizstab)	0,99	3 %	3 %				
PtH (Luftwärmepumpe)	3,4	14 %	14 %				
PtH (Erdwärmepumpe)	3,8	8 %	8 %				
Solarthermie	1,0	2 %	2 %				
Festbrennstoffkessel	0,85	15 %	15 %				
Heizkessel (Gas)	0,93	37 %	37 %				
Heizkessel (Öl)	0,90	9 %	9 %				
Wärmeübergabestation	0,91	12 %	12 %				
Kompressionskälte	3,3			100 %	100 %		
Elektrogeräte	1,0					100 %	100 %
<b>Summe Nutzenergie</b>		<b>10,0</b>	<b>10,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>2,1</b>	<b>2,1</b>

2040	EER	Raumwärme Warmwasser		Klimakälte		Stromanwendungen	
		I	B	I	B	I	B
PtH (Heizstab)	0,99	3 %	3 %				
PtH (Luftwärmepumpe)	3,6	28 %	27 %				
PtH (Erdwärmepumpe)	4,0	14 %	14 %				
Solarthermie	1,0	3 %	3 %				
Festbrennstoffkessel	0,88	15 %	15 %				
Heizkessel (Gas)	0,96	23 %	23,5 %				
Heizkessel (Öl)	0,96	0 %	0,5 %				
Wärmeübergabestation	0,92	14 %	14 %				
Kompressionskälte	3,5			100 %	100 %		
Elektrogeräte	1,0					100 %	100 %
<b>Summe Nutzenergie</b>		<b>7,5</b>	<b>7,7</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>2,0</b>	<b>1,9</b>

2045	EER	Raumwärme Warmwasser		Klimakälte		Stromanwendungen	
		I	B	I	B	I	B
PtH (Heizstab)	0,99	3 %	2 %				
PtH (Luftwärmepumpe)	3,8	33 %	33 %				
PtH (Erdwärmepumpe)	4,2	17 %	17 %				
Solarthermie	1,0	4 %	4 %				
Festbrennstoffkessel	0,88	16 %	15 %				
Heizkessel (Gas)	0,98	12 %	14 %				
Heizkessel (Öl)	0,98	0 %	0 %				
Wärmeübergabestation	0,93	15 %	15 %				
Kompressionskälte	3,7			100 %	100 %		
Elektrogeräte	1,0					100 %	100 %
<b>Summe Nutzenergie</b>		<b>6,2</b>	<b>6,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>1,9</b>	<b>1,8</b>

Die folgenden Diagramme (Bild 5) zeigen die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Sektors Haushalte für das Basisszenario. Man erkennt zwar, dass der Stromanteil am Endenergieverbrauch sich bis 2045 verdoppelt, jedoch bleibt der absolute Wert durch gleichzeitige Effizienzgewinne annähernd gleich. Ab 2030 spielen Kohlen und ab 2045

Heizöl bei der Wärmebereitstellung keine Rolle mehr; lediglich gasbetriebene Wärmeerzeuger machen dann noch einen Anteil von 10 Prozent am Endenergiebedarf aus.

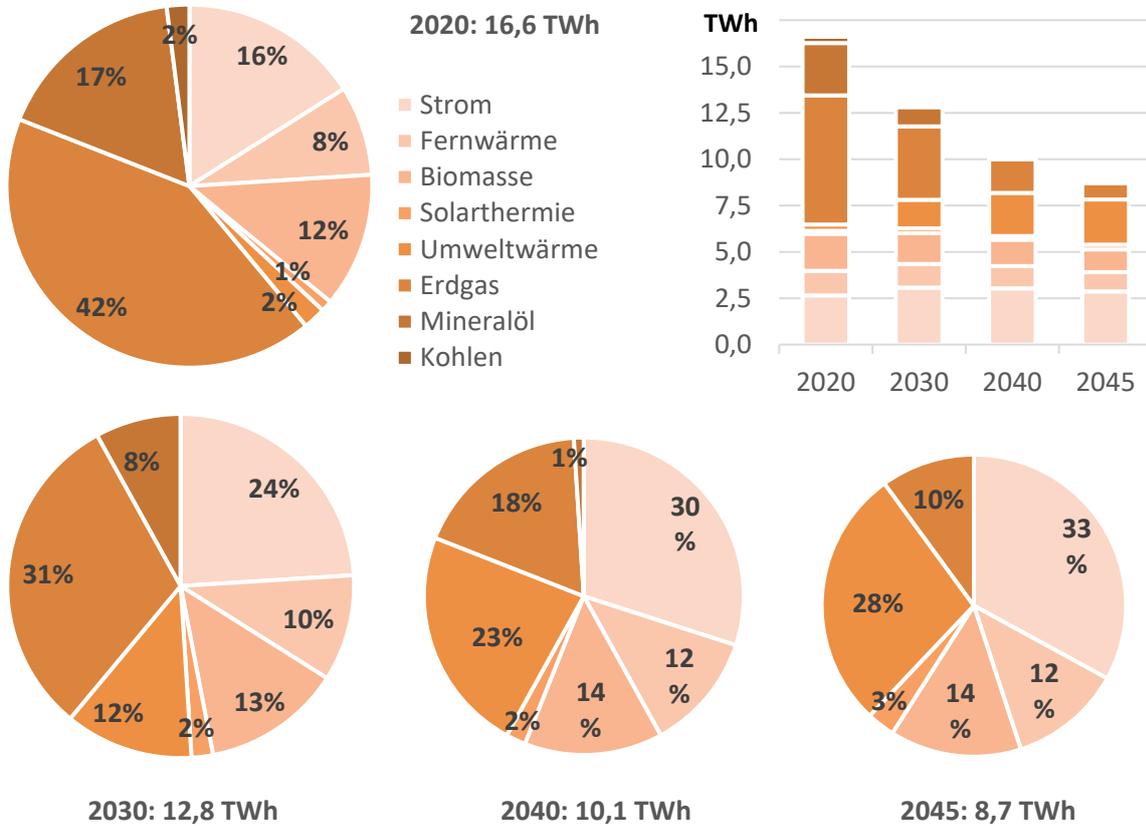


Bild 5: Endenergieverbrauch 2020 (oben) und für die Jahre 2030, 2040 und 2045 (unten) des Sektors Haushalte im Basisszenario

Zusammenfassend lässt sich für den Sektor Haushalte festhalten, dass der zukünftige Endenergiebedarf entscheidend durch die Verringerung des Nutzenergiebedarfs geprägt wird und erst in zweiter Linie durch die Wahl der Heizung.

## Sektor Industrie

Der Sektor **Industrie** wird durch die Nutzenergieverbräuche für Stromanwendungen, Raumwärme und Warmwasser, Prozesswärme, Klima- und Prozesskälte sowie die stoffliche Nutzung von Energieträgern abgebildet. Diese werden von unterschiedlichen Wandlern gedeckt. Die folgende Tabelle gibt die Endenergie-Jahresnutzungsgrade (EER: energy efficiency ratio) der Energiewandler und ihre Aufteilung bei der Bereitstellung der Nutzenergien wieder [3]. Dabei wurden für die Ermittlung der EER [7] bei der Wärmeerzeugung und [8] bei der Kälteerzeugung herangezogen.

Tabelle 6: Nutzenergiebereitstellung im Sektor Industrie für das Jahr 2020 in TWh

	EER	Raumwärme Warmwasser		Prozess- wärme		Klima- und Prozesskälte		Stroman- wendungen	
PtH (Heizstab)	0,99	0,03	2,5 %	1,33	14 %				
PtH (Wärmepumpe)	3,2	0,15	13 %						
Festbrennstoffkessel	0,77	0,28	25 %	2,35	25 %				
Heizkessel (Gas)	0,89	0,48	43 %	4,35	45 %				
Heizkessel (Öl)	0,84	0,03	2,5 %	0,23	2 %				
Wärmeübergabestation	0,90	0,16	14 %	1,36	14 %				
Kompressionskälte	2,9					1,13	100 %		
Elektrogeräte	1,0							3,7	100 %
<b>Summe</b>		<b>1,1</b>	<b>100 %</b>	<b>9,6</b>	<b>100 %</b>	<b>1,1</b>	<b>100 %</b>	<b>3,7</b>	<b>100 %</b>

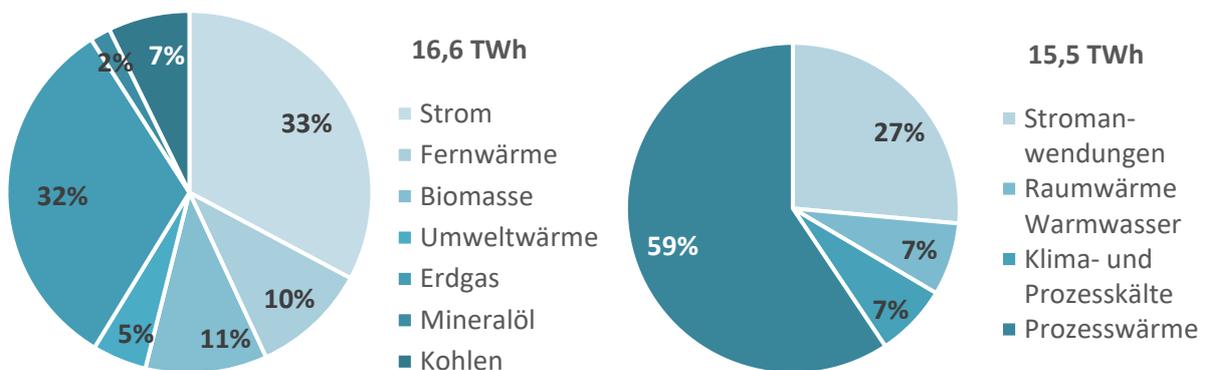


Bild 6: Endenergieverbrauch (links) und Nutzenergiebedarf (rechts) des Sektors Industrie in Thüringen 2020

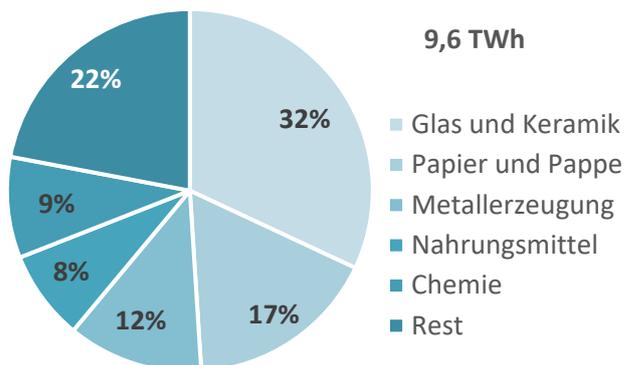
Der Wandler Festbrennstoffkessel fasst die Positionen Kohlen und Biomasse zusammen. Im Wandler Wärmeübergabestation sind sowohl der Bezug von Fernwärme aus öffentlichen Netzen als auch aus industrie-eigenen Heizwerke enthalten. Insgesamt werden 16,6 TWh Endenergie eingesetzt, um 15,5 TWh Nutzenergie bereitzustellen. Wärmepumpen spielen 2020 praktisch noch keine Rolle, Power-to-Heat wird in Form von elektrisch erzeugter Prozesswärme genutzt und deckt etwa ein Siebtel des Prozesswärmebedarfs.

Zusätzlich zu der energetischen Nutzung erfolgt im Industriesektor auch eine stoffliche Nutzung von Energieträgern (nicht in Tabelle 6 enthalten): so wurden 2020 in Thüringen 0,09 TWh Braunkohle, 0,95 TWh Mineralöl und 0,01 TWh Brenngase eingesetzt [3].

Für die Jahre bis 2045 sind einerseits Veränderungen in den Endenergie-Nutzungsgraden zu erwarten: So werden Niedertemperaturkessel bis 2045 weitgehend durch Brennwertkessel ersetzt sein [7]. Andererseits werden Energieträger wie Kohlen oder Mineralöle eine immer geringere Rolle spielen [1]. Für die zu erwartenden Nutzenergiebedarfe werden die folgenden Annahmen für das **Innovative Szenario I** und das **Basisszenario B** zugrunde gelegt:

- Klass. Stromanwendungen: **-0,5 %/a** | **-0,7 %/a** durch Steigerung der Energieeffizienz [9]. Dabei wird in Szenario I die Steigerung der Energieeffizienz durch den vermehrten Einsatz von Stromanwendung bspw. im Bereich der Automatisierungstechnik etwas abgedämpft [1].
- Kälte: **+ 4%/a** | **+2 %/a** durch erhöhten Klimatisierungsbedarf. In Anlehnung an die in [10] getroffenen Szenarien für den Wohngebäudebereich. In Szenario B wurde eine etwas konservativere Abschätzung getroffen.
- Raumwärme: **-1,75 %/a** | **-1,5 %/a** durch Sanierungsmaßnahmen.

Für den Prozesswärmebedarf soll eine branchenspezifische Betrachtung erfolgen [5]. Der industrielle Prozesswärmebedarf in Thüringen wird zu vier Fünfteln von 5 Branchen bestimmt (vgl. Bild 7).



**Bild 7: Prozesswärmebedarf des Sektors Industrie in Thüringen 2020 nach Branchen**

Den größten Anteil am Endenergieverbrauch hat die Thüringer **Glas- und Keramikindustrie**. Die dortigen Schmelz- und Brennprozesse basieren auf dem Einsatz von Brenngasen und können nicht für alle Produkte elektrifiziert werden. Vielmehr setzt die Branche für die Dekarbonisierung neben einer Elektrifizierung auf einen Wechsel des Brenngases oder die CO<sub>2</sub>-Abscheidung [15]. In allen Szenarien wird von einem jährlichen Produktionszuwachs von 0,3 Prozent und Effizienzgewinnen von 0,5 Prozent ausgegangen [16]. Hinsichtlich der Veränderungen im Einsatz der Endenergieträger folgt das **Innovative Szenario I** der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität [16] [17]; im **Basisszenario B** werden dieselben Trends bei einer insgesamt langsameren Umsetzungsgeschwindigkeit angenommen.

Im Bereich **Papier und Pappe** wird von einem jährlichen Produktionszuwachs von nur 0,1 Prozent und Effizienzgewinnen von 0,3 bis 0,4 Prozent ausgegangen [16]. Letztere resultieren u.a. aus einer weiteren Erhöhung der Recyclingquote. Hinsichtlich der Veränderungen im Einsatz der Endenergieträger, geht die Papierindustrie von einer beschleunigten Umstellung auf strombasierte Prozesse aus [18].

Tabelle 7: Prozesswärmebereitstellung im Bereich Glas und Keramik

	2020	2030		2040		2045	
		I	B	I	B	I	B
Brenngas Erdgas	95 %	55 %	65 %	25 %	55 %	5 %	25 %
Brenngas Wasserstoff	0 %	5 %	0 %	15 %	5 %	30 %	15 %
Elektrisch	5 %	40 %	35 %	60 %	40 %	65 %	60 %
Nutzenergiebedarf	100 %	98%		96%		95%	

Tabelle 8: Prozesswärmebereitstellung im Bereich Papier und Pappe

	2020	2030		2040		2045	
		I	B	I	B	I	B
Brenngas Erdgas	20 %	10 %	15 %	5 %	10 %	0 %	0 %
Biomasse	50 %	50 %	50 %	55 %	50 %	55 %	55 %
Fernwärme	25 %	25 %	25 %	25 %	25 %	25 %	25 %
Elektrisch	5 %	15 %	10 %	15 %	15 %	20 %	20 %
Nutzenergiebedarf	100 %	98%		96%		95%	

Im Bereich **Metallerzeugung** unterscheidet sich Thüringen von dem Bundesdurchschnitt [5] durch einen höheren Elektrizitätsanteil bei der Prozesswärmebereitstellung. Es wird von einem gleichbleibenden Nutzenergiebedarf ausgegangen. Hinsichtlich der Veränderungen im Einsatz der Endenergieträger folgt das **Innovative Szenario I** der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität [16] [17]; im **Basisszenario B** werden dieselben Trends bei einer insgesamt langsameren Umsetzungsgeschwindigkeit angenommen.

Tabelle 9: Prozesswärmebereitstellung im Bereich Metallerzeugung

	2020	2030		2040		2045	
		I	B	I	B	I	B
Brenngas Erdgas	45 %	30 %	35 %	10 %	15 %	0 %	0 %
Brenngas Wasserstoff	0 %	15 %	10 %	30 %	30 %	40 %	40 %
Elektrisch	55 %	55 %	55 %	60 %	55 %	60 %	60 %
Nutzenergiebedarf	100 %	100 %		100 %		100 %	

Die **Nahrungsmittelindustrie** benötigt Prozesswärme in einem vergleichsweise niedrigen Temperaturniveau von 50 bis 300 °C. Dies eröffnet der Branche Sektorkopplungstechnologien wie Hochtemperaturwärmepumpen oder auch Solarthermie. Bei gleichbleibender Produktion wird von jährlichen Effizienzgewinnen von 1 Prozent ausgegangen.

Tabelle 10: Prozesswärmebereitstellung im Bereich Nahrungsmittelindustrie

	2020	2030		2040		2045	
		I	B	I	B	I	B
Brenngas Erdgas	70 %	40 %	50 %	20 %	30 %	0 %	5 %
Fernwärme	20 %	25 %	20 %	25 %	25 %	30 %	25 %
PtH (Heizstab)	10 %	22 %	25 %	30 %	30 %	40 %	40 %
PtH (Wärmepumpe)	0 %	10 %	5 %	20 %	12 %	25 %	25 %
Solarthermie	0 %	3 %	0 %	5 %	3 %	5 %	5 %
Nutzenergiebedarf	100 %	90 %		82 %		78 %	

Die Thüringer **Chemieindustrie** ist heterogen zusammengesetzt. Ihr Energiebedarf wird derzeit überwiegend durch Erdgas gedeckt. Die Branche setzt für die Dekarbonisierung neben einer Elektrifizierung auf einen Wechsel des Brenngases, die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und

den Einsatz von fester Biomasse. Bei gleichbleibender Produktion wird von jährlichen Effizienzgewinnen von 0,2 Prozent ausgegangen.

**Tabelle 11: Prozesswärmebereitstellung im Bereich der Chemieindustrie**

	2020	2030		2040		2045	
		I	B	I	B	I	B
Brenngas Erdgas	83 %	60 %	70 %	20 %	30 %	5 %	5 %
Brenngas Wasserstoff	0 %	10 %	5 %	15 %	10 %	20 %	20 %
Biomasse	5 %	5 %	5 %	15 %	10 %	15 %	15 %
Fernwärme	2 %	2 %	2 %	5 %	5 %	5 %	5 %
Elektrisch	10 %	23 %	18 %	45 %	45 %	55 %	55 %
Nutzenergiebedarf	100 %	98%		96%		95%	

Damit kann nun die Entwicklung der Nutzenergiebereitstellung im Industriesektor für das Basisszenario **Szenario B** und das Innovative **Szenario I** angegebenen werden. In Tabelle 12 sind die Ergebnisse für die Jahre 2030, 2040 und 2045 dargestellt.

**Tabellen 12: Nutzenergiebereitstellung im Sektor Industrie 2030 - 2040 - 2045 in TWh**

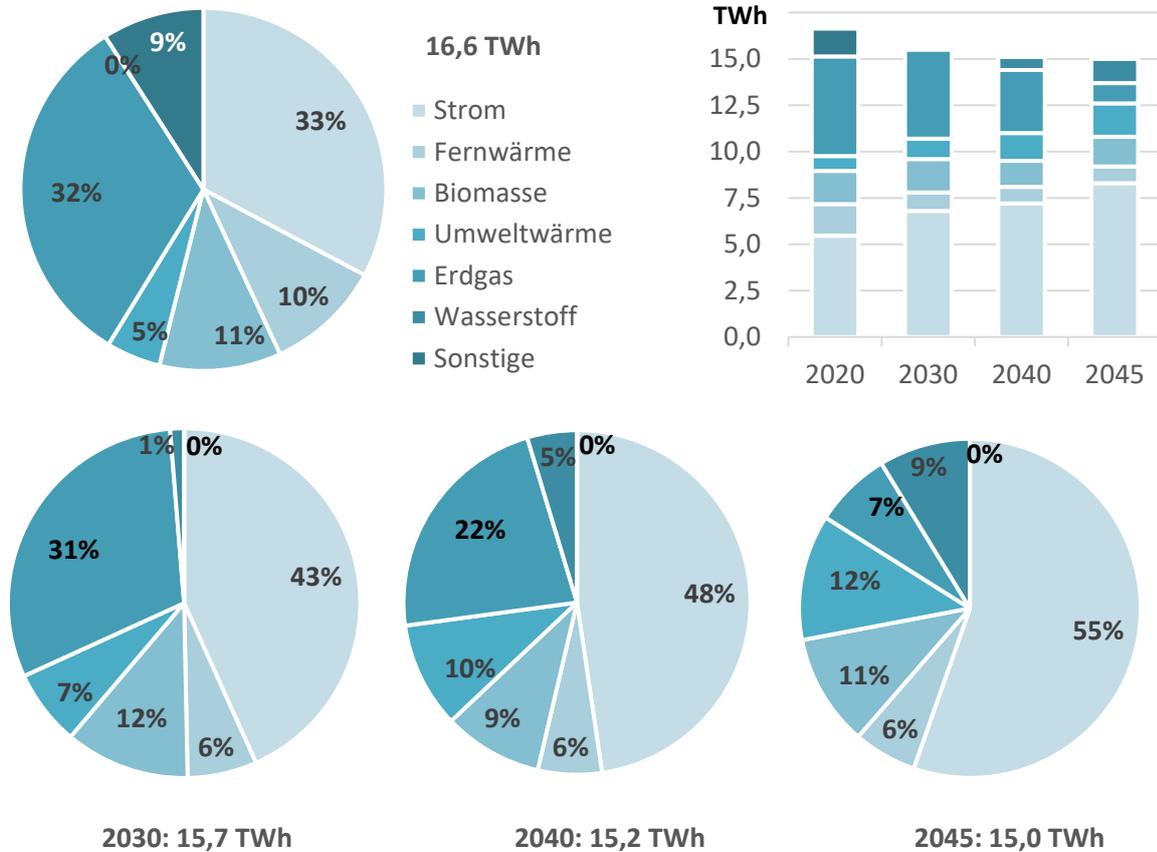
2030	EER	Raumwärme Warmwasser		Prozess- wärme		Klima- und Prozesskälte		Stroman- wendungen	
		I	B	I	B	I	B	I	B
PtH (Heizstab)	0,99	3 %	3 %	33 %	30 %				
PtH (Wärmepumpe)	3,4	24 %	24 %						
	2,0			1 %	0 %				
Solarthermie	1,0	2 %	2 %	0 %	0 %				
Festbrennstoffkessel	0,83	20 %	20 %						
	0,88			12 %	12 %				
Heizkessel (Gas)	0,91	37 %	37 %						
	0,95			40 %	48 %				
Heizkessel (Wasserstoff)	0,95			6 %	2 %				
Heizkessel (Öl)	0,88	0 %	0 %						
	0,91			0%	0 %				
Wärmeübergabestation	0,91	14 %	14 %	8 %	8 %				
Kompressionskälte	3,3					100 %	100 %		
Elektrogeräte	1,0							100 %	100 %
<b>Summe</b>		<b>0,9</b>	<b>0,9</b>	<b>9,4</b>	<b>9,4</b>	<b>1,7</b>	<b>1,4</b>	<b>3,5</b>	<b>3,4</b>



2040	EER	Raumwärme Warmwasser		Prozess- wärme		Klima- und Prozesskälte		Stroman- wendungen	
		I	B	I	B	I	B	I	B
PtH (Heizstab)	0,99	3 %	3 %	45,5 %	37 %				
PtH (Wärmepumpe)	3,6 2,2	38 %	38 %	2 %	1 %				
Solarthermie	1,0	3 %	3 %	0,5 %	0 %				
Festbrennstoffkessel	0,88	20 %	20 %	14 %	12 %				
Heizkessel (Gas)	0,96	21 %	21 %	17 %	34 %				
Heizkessel (Wasserstoff)	0,96			13 %	8 %				
Heizkessel (Öl)	0,96								
Wärmeübergabestation	0,92	15 %	15 %	8 %	8 %				
Kompressionskälte	3,5					100 %	100 %		
Elektrogeräte	1,0							100 %	100 %
<b>Summe</b>		<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>9,1</b>	<b>9,1</b>	<b>2,5</b>	<b>1,7</b>	<b>3,3</b>	<b>3,2</b>

2045	EER	Raumwärme Warmwasser		Prozess- wärme		Klima- und Prozesskälte		Stroman- wendungen	
		I	B	I	B	I	B	I	B
PtH (Heizstab)	0,99	3 %	3 %	51 %	49 %				
PtH (Wärmepumpe)	3,8 2,4	46 %	46 %	2 %	2 %				
Solarthermie	1,0	4 %	4 %	0,5 %	0,5 %				
Festbrennstoffkessel	0,88	20 %	20 %	14 %	14 %				
Heizkessel (Gas)	0,98	12 %	12 %	3 %	11,5 %				
Heizkessel (Wasserstoff)	0,98			21 %	15 %				
Heizkessel (Öl)	0,98								
Wärmeübergabestation	0,93	15 %	15 %	8,5 %	8 %				
Kompressionskälte	3,7					100 %	100 %		
Elektrogeräte	1,0							100 %	100 %
<b>Summe</b>		<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>9,0</b>	<b>9,0</b>	<b>3,0</b>	<b>1,9</b>	<b>3,3</b>	<b>3,1</b>

Die folgenden Diagramme (Bild 8) zeigen die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Industriesektors für das Basisszenario. Man erkennt, dass der Stromanteil am Endenergieverbrauch sich bis 2045 zum dominierenden Faktor entwickelt. Die Position Umweltwärme enthält auch Umweltkälte; Wärmepumpen und auch solarthermische Anlagen spielen aufgrund der Temperaturanforderungen an die Prozesswärme nur eine untergeordnete Rolle. Der Rückgang im Bereich der Fernwärme ist auf Veränderungen bei den Vorlauftemperaturen der Wärmenetze zurückzuführen. Der Bereich Sonstiges fasst Mineralöle und Kohlen zusammen; beide spielen ab 2030 keine Rolle mehr.



**Bild 8: Endenergieverbrauch 2020 (oben) und für die Jahre 2030, 2040 und 2045 (unten) des Industriesektors im Basisszenario**

Zusammenfassend lässt sich für den Sektor Industrie festhalten, dass der zukünftige Endenergiebedarf kaum mehr Spielräume für Energieeffizienz aufweist und in seiner Zusammensetzung wesentlich durch die Wahl des Endenergeträgers für die Bereitstellung von Prozesswärme beeinflusst wird.

## Sektor Gewerbe/Handel/Dienstleistungen

Der Sektor **Gewerbe/Handel/Dienstleistungen** (GHD) wird durch die Nutzenergieverbräuche für Stromanwendungen, Raumwärme/Warmwasser, Prozesswärme und Klima- und Prozesskälte abgebildet. Diese werden von unterschiedlichen Wandlern gedeckt. Die stoffliche Nutzung von Energieträgern spielt in diesem Sektor praktisch keine Rolle. Die folgende Tabelle gibt die Endenergie-Jahresnutzungsgrade (EER) der Energiewandler und ihre Aufteilung bei der Bereitstellung der Nutzenergien wieder [3]. Dabei wurden für die Ermittlung der EER [7] bei der Wärmeerzeugung und [8] bei der Kälteerzeugung herangezogen.

Tabelle 13: Nutzenergiebereitstellung im Sektor GHD für das Jahr 2020 in TWh

	EER	Raumwärme Warmwasser		Prozess- wärme		Klima- und Prozesskälte		Stroman- wendungen	
PtH (Heizstab)	0,99	0,3	6 %	0,2	18 %				
PtH (Luftwärmepumpe)	3,0	0,0	0,5 %						
PtH (Erdwärmepumpe)	3,4	0,0	0,5 %						
Festbrennstoffkessel	0,77	0,4	9 %	0,1	9 %				
Heizkessel (Gas)	0,89	2,1	45 %	0,3	32 %				
Heizkessel (Öl)	0,84	1,0	22 %	0,1	9 %				
Kraftmaschine (Öl)	0,30							0,3	13 %
Wärmeübergabestation	0,90	0,8	17 %	0,3	32 %				
Kompressionskälte	2,9					1,1	100 %		
Elektrogeräte	1,0							2,0	87 %
<b>Summe</b>		<b>4,6</b>	100 %	<b>0,9</b>	100 %	<b>1,1</b>	100 %	<b>2,3</b>	100 %

Der Wandler Festbrennstoffe fasst die Positionen Kohlen und Biomasse zusammen. Im Sektor GHD wird ein Teil der mechanischen Arbeit von stationären Kraftmaschinen in Form von Dieselmotoren verrichtet; diese wurden aus systematischen Gründen mit unter den Stromanwendungen bilanziert. Die Position Umweltwärme enthält im Unterschied zu [3] auch Umweltkälte. Insgesamt werden 2020 10,3 TWh Endenergie eingesetzt, um 8,9 TWh Nutzenergie bereitzustellen.

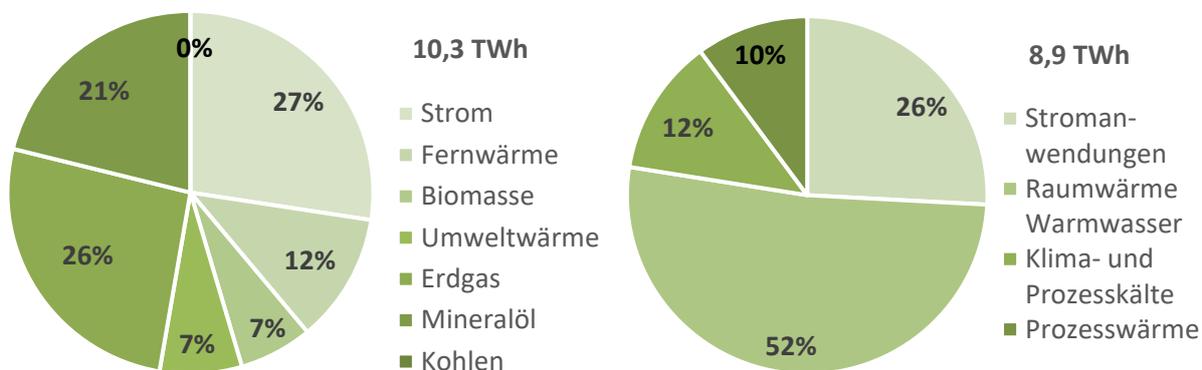


Bild 9: Endenergieverbrauch (links) und Nutzenergiebedarf (rechts) des Sektors GHD in Thüringen 2020

Für die Jahre bis 2045 sind einerseits Veränderungen in den Endenergie-Nutzungsgraden zu erwarten: So werden Niedertemperaturkessel bis 2045 weitgehend durch Brenn-

wertkessel ersetzt sein [7]. Andererseits werden Mineralöle eine immer geringere Rolle spielen und die Bereitstellung von mechanischer Arbeit schrittweise von Elektromotoren übernommen [1]. Für die zu erwartenden Nutzenergiebedarfe werden die folgenden Annahmen für das **Innovative Szenario I** und das **Basisszenario B** zugrunde gelegt:

- Klass. Stromanwendungen: **-0,8 %/a** | **-1 %/a** durch Steigerung der Energieeffizienz [9]. Dabei wird in Szenario I die Steigerung der Energieeffizienz durch den vermehrten Einsatz von Stromanwendung bspw. im Bereich der Automatisierungstechnik etwas abgedämpft [1].
- Prozesswärme: **-1 %/a** | **-1 %/a** durch Umstellung der Produktionsverfahren. Zusammen mit Effizienzsteigerungen der eingesetzten Energiewandler in der gleichen Größenordnung ergibt sich insgesamt die in [16] angenommene Steigerung der Endenergieproduktivität um 2,0 %/a.
- Kälte: **+2 %/a** | **+2 %/a** durch erhöhten Klimatisierungsbedarf. In Anlehnung an die in [10] getroffenen Szenarien für den Wohngebäudebereich wurde eine etwas konservativere Abschätzung getroffen.
- Raumwärme: **-1,75 %/a** | **-1,5 %/a** durch Sanierungsmaßnahmen.

Tabellen 14: Nutzenergiebereitstellung im Sektor GHD 2030 - 2040 - 2045 in TWh

2030	EER	Raumwärme Warmwasser		Prozesswärme		Klima- und Prozesskälte		Stromanwendungen	
		I	B	I	B	I	B	I	B
PtH (Heizstab)	0,99	5 %	5 %	20 %	20 %				
PtH (Luftwärmepumpe)	3,4	20 %	15 %	10 %	5 %				
PtH (Erdwärmepumpe)	3,8	17 %	15 %	9 %	5 %				
Solarthermie	1,0	3 %	0 %	1 %	0 %				
Festbrennstoffkessel	0,85	10 %	10 %	10 %	10 %				
Heizkessel (Gas)	0,93	20 %	25 %	15 %	20 %				
Heizkessel (Öl)	0,90	5 %	10 %	0 %	5 %				
Kraftmaschine (Öl)	0,30							5 %	9 %
Wärmeübergabestation	0,91	20 %	20 %	35 %	35 %				
Kompressionskälte	3,3					100 %	100 %		
Elektrogeräte	1,0							95 %	91 %
<b>Summe</b>		<b>3,9</b>	<b>4,0</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>2,1</b>	<b>2,1</b>

2040	EER	Raumwärme Warmwasser		Prozesswärme		Klima- und Prozesskälte		Stromanwendungen	
		I	B	I	B	I	B	I	B
PtH (Heizstab)	0,99	5 %	5 %	20 %	20 %				
PtH (Luftwärmepumpe)	3,6	25 %	22 %	10 %	10 %				
PtH (Erdwärmepumpe)	4,0	20 %	15 %	10 %	7 %				
Solarthermie	1,0	5 %	3 %	5 %	3 %				
Festbrennstoffkessel	0,88	15 %	15 %	15 %	15 %				
Heizkessel (Gas)	0,96	10 %	15 %	5 %	10 %				
Heizkessel (Öl)	0,96	0 %	5 %	0 %	0 %				
Kraftmaschine (Öl)	0,30								
Wärmeübergabestation	0,92	20 %	20 %	35 %	35 %				
Kompressionskälte	3,5					100 %	100 %		
Elektrogeräte	1,0							100 %	100 %
<b>Summe</b>		<b>3,2</b>	<b>3,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>1,6</b>	<b>1,6</b>	<b>2,0</b>	<b>1,9</b>

2045	EER	Raumwärme Warmwasser		Prozess- wärme		Klima- und Prozesskälte		Stroman- wendungen	
		I	B	I	B	I	B	I	B
PtH (Heizstab)	0,99	5 %	5 %	20 %	20 %				
PtH (Luftwärmepumpe)	3,8	35 %	35 %	10 %	10 %				
PtH (Erdwärmepumpe)	4,2	20 %	15 %	10 %	10 %				
Solarthermie	1,0	5 %	5 %	5 %	5 %				
Festbrennstoffkessel	0,88	15 %	15 %	20 %	20 %				
Heizkessel (Gas)	0,98	0 %	5 %	0 %	0 %				
Heizkessel (Öl)	0,98								
Kraftmaschine (Öl)	0,30								
Wärmeübergabestation	0,93	20 %	20 %	35 %	35 %				
Kompressionskälte	3,7					100 %	100 %		
Elektrogeräte	1,0							100 %	100 %
<b>Summe</b>		<b>3,0</b>	<b>3,2</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>1,8</b>	<b>1,8</b>	<b>1,9</b>	<b>1,8</b>

Die folgenden Diagramme (Bild 10) zeigen die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Sektors GHD für das Basisszenario. Man erkennt, dass Strom und Umweltwärme sich bis 2045 zum dominierenden Faktor entwickeln. Die Position Umweltwärme enthält dabei auch Umweltkälte.

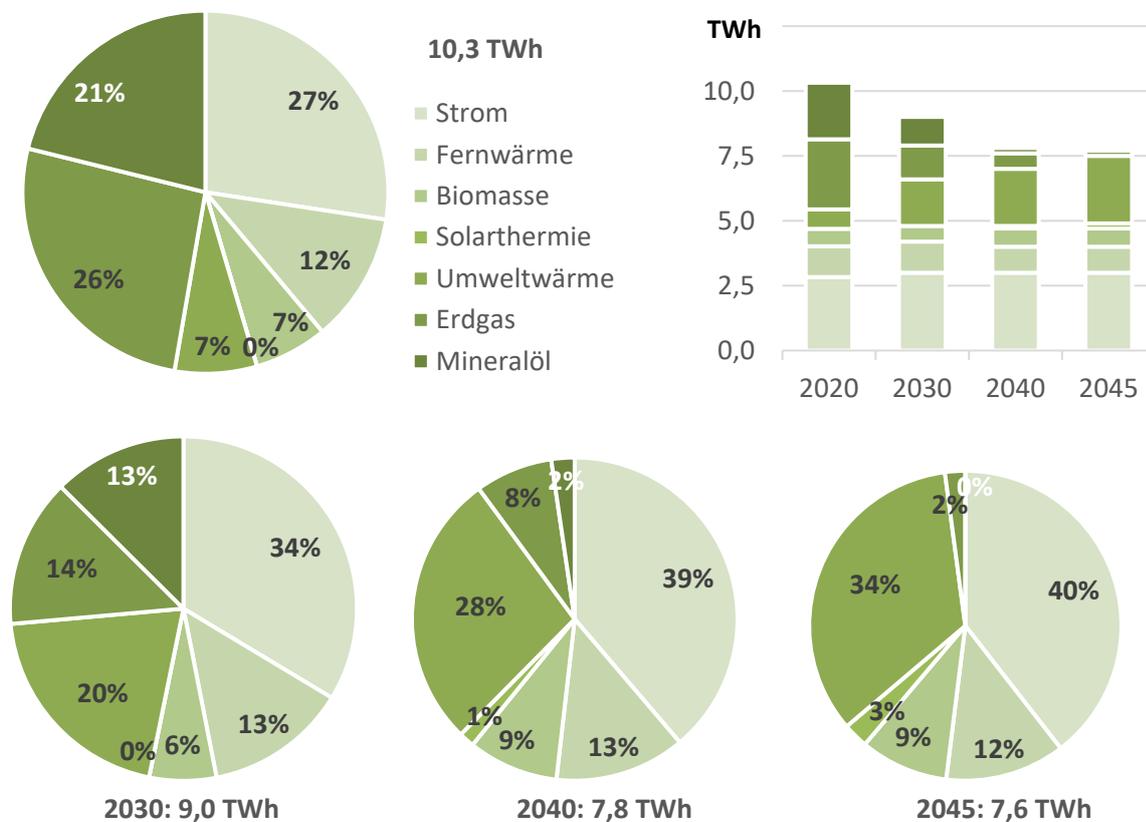
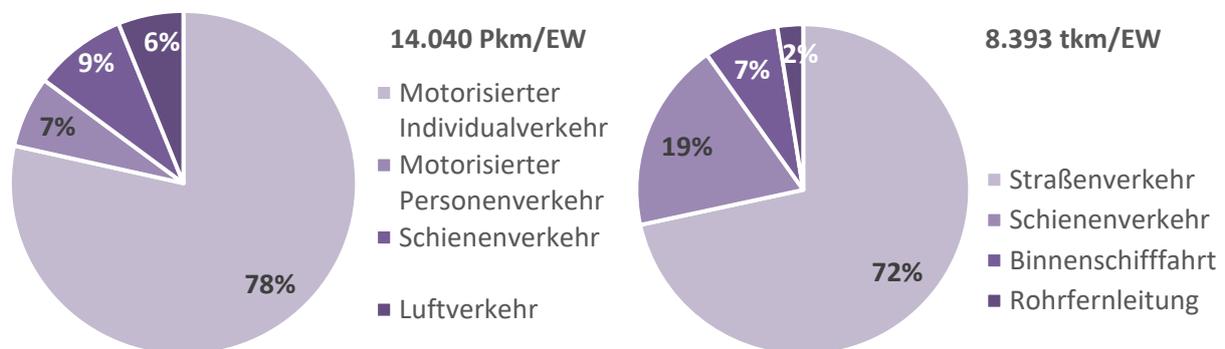


Bild 10: Endenergieverbrauch 2020 (oben) und für die Jahre 2030, 2040 und 2045 (unten) des Sektors GHD im Basisszenario

## Sektor Verkehr

Der Sektor **Verkehr** wird durch die Transportleistungen für Personen [Pkm] und Güter [tkm] jeweils differenziert nach straßen- und schienengebundenem Verkehr abgebildet. Die Transportleistungen des Flugverkehrs, des Schiffsverkehrs und der Rohrfernleitungen werden nicht betrachtet, da der Anteil sowie der Einfluss Thüringens hier nur gering sind (vgl. Abbildung 11).

Für die Transportleistung wurde das Basisjahr 2019 herangezogen, da die Werte für 2020 stark durch Corona beeinflusst wurden. Für das Basisjahr ergeben sich aus den bundesdeutschen Durchschnittswerten je Einwohner 14.040 Pkm und 8.393 tkm [19].



**Bild 11: Aufteilung der Transportleistung im Personen- (links) und Güterverkehr (rechts) auf Verkehrsmittel 2019 [19]**

Um diese Transportleistungen in Nutzenergiewerte umzurechnen wird in Anlehnung an [20] die Traktionsenergie als jeweils abgeforderte mechanische Nutzenergie bestimmt. Die Traktionsenergie errechnet sich aus dem spezifischen Energieverbrauch [21] und der in Spalte 2 von Tabelle 15 angegebenen durchschnittlichen Well-to-Wheel-Effizienz des Fahrzeugbestandes [22].

**Tabelle 15: Spezifische Traktionsenergie im Personenverkehr in kWh/Pkm bzw. im Güterverkehr in kWh/tkm**

	wtw	2020		2030		2040		2045	
		I	B	I	B	I	B		
<b>Personenverkehr</b>									
Personenkraftwagen	0,13	0,084	0,080	0,084	0,075	0,084	0,070	0,084	
Busse und Bahnen	0,20	0,055	0,052	0,055	0,050	0,055	0,050	0,055	
<b>Güterverkehr</b>									
Lastkraftwagen	0,17	0,085	0,085	0,085	0,080	0,085	0,080	0,085	
Güterzug	0,33	0,027	0,027	0,027	0,025	0,027	0,025	0,027	

Verbesserungen der spezifischen Traktionsenergie können durch Veränderungen im Modalsplit, eine bessere Ausnutzung der Verkehrsmittel und im geringeren Maße auch durch technische Veränderungen beispielsweise des Fahrzeuggewichts erreicht werden. Da erstere Maßnahmen der Verhaltensänderung zuzurechnen sind, wurden sie nur im **Innovativen Szenario I** berücksichtigt.

Transportleistung und Traktionsenergie multiplizieren sich zum Nutzenergiebedarf des Verkehrssektors. Dieser wird mithilfe unterschiedlicher Fahrzeugtypen gedeckt. Die folgende Tabelle gibt die Endenergie-Jahresnutzungsgrade EER in Form der Tank-to-Wheel-Effizienz und die Aufteilung auf die Fahrzeugtypen bzw. Verkehrsmittel bei der Bereitstellung der Nutzenergien wieder. Diese Daten wurden anhand des entstehenden Endenergiebedarfs mithilfe der Thüringer Energiebilanz 2019 [3] validiert.

**Tabelle 16: Nutzenergiebereitstellung im Sektor Verkehr 2019 (2020) in TWh**

	EER	Personen- verkehr		Güter- verkehr	
PKW - batterieelektrisch	0,75	0,01	0,5 %		
PKW - wasserstoffelektrisch	0,50				
PKW - Verbrenner CNG	0,20	0,02	1 %		
PKW - Verbrenner sonst.	0,20	1,92	87 %		
LKW - elektrisch	0,75				
LKW - wasserstoffelektrisch	0,50				
LKW - Verbrenner sonst.	0,20			1,09	92 %
Busse*) - batterieelektrisch	0,75	0,00	0 %		
Busse*) - wasserstoffelektrisch	0,50				
Busse*) - Verbrenner	0,20	0,11	5 %		
Schiene - elektrisch	0,75	0,14	6 %	0,08	7 %
Schiene - wasserstoffelektrisch	0,50				
Schiene - Verbrenner	0,30	0,01	0,5 %	0,01	1 %
<b>Summe</b>		<b>2,2</b>	<b>100 %</b>	<b>1,2</b>	<b>100 %</b>

\*) enthält auch Straßenbahnen, Sammeltaxis u.ä.

Für die Jahre bis 2045 sind nur geringfügige Veränderungen in den Endenergie-Nutzungsgraden zu erwarten. Für den Nutzenergiebedarf wird im Bereich des Personenverkehrs von einer mit 0,4 %/a nur geringfügig ansteigenden Transportleistung je Einwohner ausgegangen. Durch den zu erwartenden Bevölkerungsrückgang ergibt sich eine insgesamt sinkende Transportleistung (vgl. Tabelle 17). Im Bereich des Güterverkehrs wird auch weiterhin mit starken Zuwächsen der Transportleistung je Einwohner von rund 2 %/a gerechnet [1].

**Tabelle 17: Entwicklung der Transportleistung in Thüringen**

	2020	2030	2040	2045
Bevölkerung [1.000]	2.125	1.990	1.862	1.808
Personenverkehr [Pkm/EW]	14.040	14.612	15.207	15.514
Personenverkehr [Mrd. Pkm]	29,84	29,08	28,32	28,04
Güterverkehr [tkm/EW]	8.393	10.237	12.478	13.778
Güterverkehr [Mrd. tkm]	17,84	20,37	23,21	24,94

Wie bereits erwähnt wird im **Basisszenario B** nicht von tiefgreifenden Verhaltensänderungen in der Benutzung von Verkehrsmitteln ausgegangen. Die Entwicklung des Fahrzeugbestandes folgt dem Referenzszenario in [23] und geht von einer schnellen und umfassenden Elektrifizierung aus. Wasserstoff spielt nur im Güterverkehr sowie auf Teilen der bisher nicht elektrifizierten Bahnstrecken eine Rolle. Diese Bestandsveränderungen sind auch Grundlage des **Innovativen Szenarios I**, wo zusätzlich eine stärkere Nutzung Öffentlicher Verkehrsmittel und eine bessere Auslastung der PKW angenommen wird.

Tabellen 18: Nutzenergiebereitstellung im Sektor Verkehr 2030 - 2040 - 2045 in TWh

2030	EER	Personen- verkehr		Güter- verkehr	
		I	B	I	B
PKW - batterieelektrisch	0,75	32 %	33 %		
PKW - wasserstoffelektrisch	0,50	3 %	3 %		
PKW - Verbrenner sonst.	0,23	51 %	52 %		
LKW - elektrisch	0,75			1 %	1 %
LKW - wasserstoffelektrisch	0,50			7 %	7 %
LKW - Verbrenner sonst.	0,23			83 %	84 %
Busse*) - batterieelektrisch	0,75	2 %	1 %		
Busse*) - wasserstoffelektrisch	0,50				
Busse*) - Verbrenner	0,23	4 %	4 %		
Schiene - elektrisch	0,75	7 %	6 %	8 %	7 %
Schiene - wasserstoffelektrisch	0,50	0,5 %	0,5 %	0,5 %	0,5 %
Schiene - Verbrenner	0,30	0,5 %	0,5 %	0,5 %	0,5 %
<b>Summe</b>		<b>2,0</b>	<b>2,1</b>	<b>1,3</b>	<b>1,4</b>

2040	EER	Personen- verkehr		Güter- verkehr	
		I	B	I	B
PKW - batterieelektrisch	0,75	63 %	67 %		
PKW - wasserstoffelektrisch	0,50	13 %	14 %		
PKW - Verbrenner sonst.	0,25	7 %	7 %		
LKW - elektrisch	0,75			1 %	1 %
LKW - wasserstoffelektrisch	0,50			51 %	52 %
LKW - Verbrenner sonst.	0,25			38 %	39 %
Busse*) - batterieelektrisch	0,75	3 %	1 %		
Busse*) - wasserstoffelektrisch	0,50				
Busse*) - Verbrenner	0,25	4 %	4 %		
Schiene - elektrisch	0,75	9 %	6 %	9 %	7 %
Schiene - wasserstoffelektrisch	0,50	1 %	1 %	1 %	1 %
Schiene - Verbrenner	0,30				
<b>Summe</b>		<b>1,8</b>	<b>2,1</b>	<b>1,4</b>	<b>1,5</b>

2045	EER	Personen- verkehr		Güter- verkehr	
		I	B	I	B
PKW - batterieelektrisch	0,75	65 %	70 %		
PKW - wasserstoffelektrisch	0,50	16 %	17 %		
PKW - Verbrenner sonst.	0,25	1 %	1 %		
LKW - elektrisch	0,75			5 %	5 %
LKW - wasserstoffelektrisch	0,50			69 %	70 %
LKW - Verbrenner sonst.	0,25			16 %	17 %
Busse*) - batterieelektrisch	0,75	4 %	1 %		
Busse*) - wasserstoffelektrisch	0,50				
Busse*) - Verbrenner	0,25	4 %	4 %		
Schiene - elektrisch	0,75	9 %	6 %	9 %	7 %
Schiene - wasserstoffelektrisch	0,50	1 %	1 %	1 %	1 %
Schiene - Verbrenner	0,30				
<b>Summe</b>		<b>1,7</b>	<b>2,0</b>	<b>1,5</b>	<b>1,6</b>

\*) enthält auch Straßenbahnen, Sammeltaxis u.ä.

Die folgenden Diagramme (Bild 12) zeigen die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrssektors für das Basisszenario. Man erkennt die dramatischen Effizienzgewinne, die durch den Umstieg auf Elektromobilität erzielt werden können. Der energetische Beitrag von flüssigen Kraftstoffen geht bis 2045 um über 90 Prozent zurück; inwieweit diese dann durch synthetische Kraftstoffe substituiert werden, hängt u.a. von dem noch zur Verfügung stehenden CO<sub>2</sub>-Budget ab.

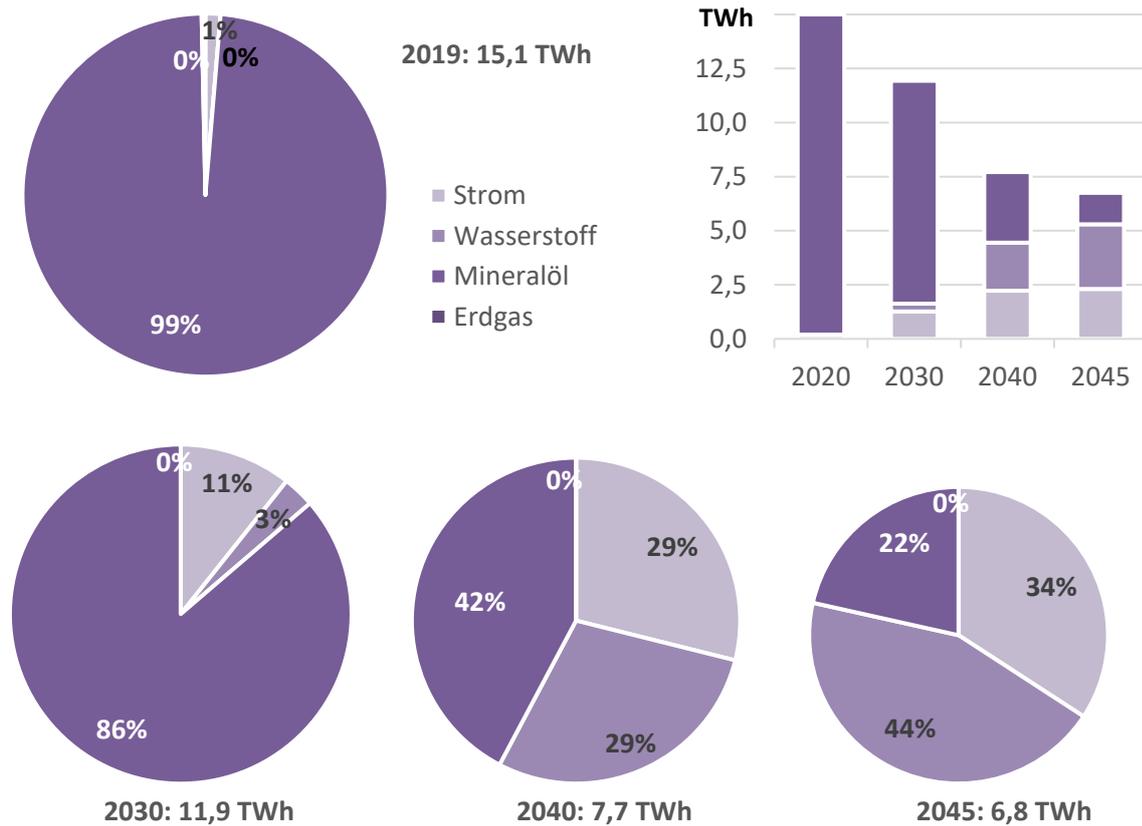


Bild 12: Endenergieverbrauch 2019 (oben) und für die Jahre 2030, 2040 und 2045 (unten) des Verkehrssektors im Basisszenario

## Zusammenfassung

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs in den einzelnen Sektoren hängt im starken Maße von den über eine Elektrifizierung erschließbaren Effizienzpotentialen ab. Abbildung 13 (oben) fasst die sektoralen Endenergieverbräuche zunächst für das **Basisszenario** zusammen. Man erkennt, dass der Endenergieverbrauch bis 2045 um etwa ein Drittel zurückgeht; bei einem annähernd gleichbleibenden Bedarf der Industrie wird diese zum dominierenden Faktor.

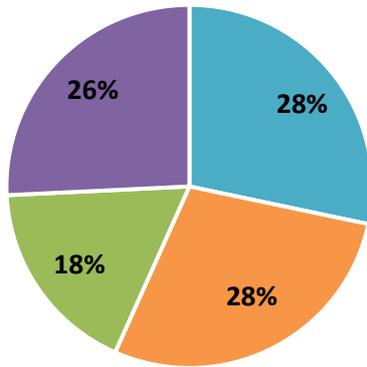
In Abbildung 13 (unten) ist die Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern dargestellt. Wenig überraschend avanciert Strom zum wichtigsten Energieträger: sein Anteil am Endenergieverbrauch hat sich mehr als verdoppelt, absolut ergibt sich bis 2045 ein Zuwachs von gut 50 Prozent.

Abbildung 14 zeigt die entsprechenden Endenergieverbräuche im **Innovativen Szenario**. Man erkennt nur geringfügige Unterschiede zum Basisszenario: 2045 ist die starke Rolle des Industriesektors noch etwas ausgeprägter und die Endenergieträger Strom und Wasserstoff machen zusammen etwa 56 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs aus. Der 2045 verbleibende Bedarf an kohlenstoffbasierten gasförmigen bzw. flüssigen Energieträgern hat sich gegenüber dem Basisszenario noch einmal halbiert.

Gegenüber den bisher in Thüringen herangezogenen Energiebedarfsszenarien [1] [2] ergeben sich eine Reihe von Änderungen. Zum einen werden in der Darstellung des Endenergieverbrauchs jetzt der Beitrag der Umweltwärme bzw. -kälte mitbilanziert. Zum anderen erfolgte eine grundlegende Analyse der sektoralen Energieverbräuche und ihrer möglichen Entwicklung bis 2045. Dies führt gegenüber den genannten Vorgängerstudien zu einer veränderten Rolle von Strom und Wasserstoff innerhalb des Energiesystems Thüringen sowie zu einer Neubewertung von Erdgas als Brückenenergieträger innerhalb des Transformationsprozesses.

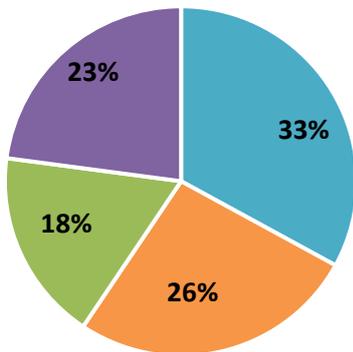
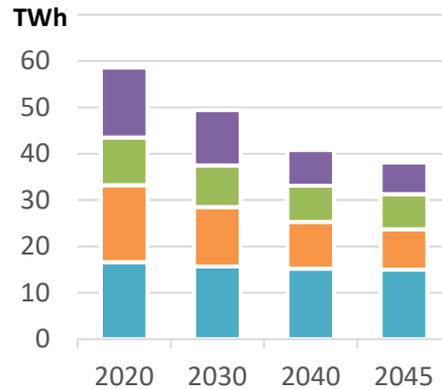
## Ausblick

Die vorliegenden Berechnungen entstanden im Rahmen des durch das Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz geförderten Forschungsprojekts ZO.RRO II. Sie stellen die Grundlage für eine Neuparametrierung des Energiesystemmodells Thüringen [2] dar. Mit ersten Ergebnissen ist Mitte 2024 zurechnen.

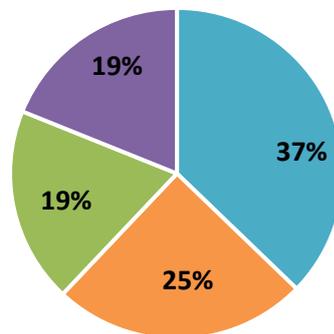


2020: 58,6 TWh

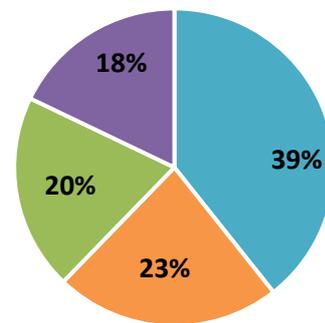
- Industrie
- Haushalte
- GHD
- Verkehr



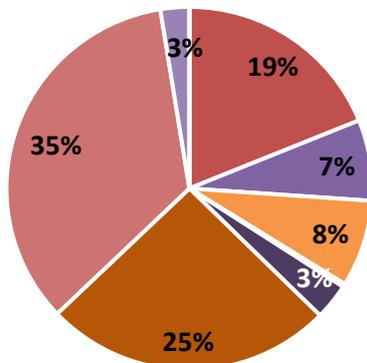
2030: 49,4 TWh



2040: 40,8 TWh

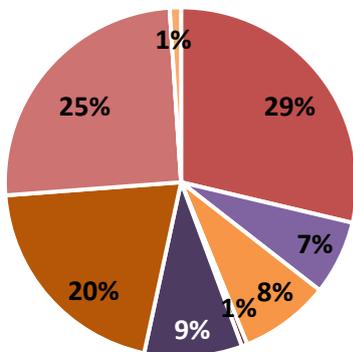
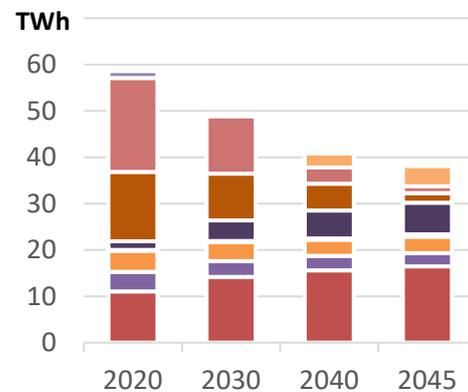


2045: 38,1 TWh

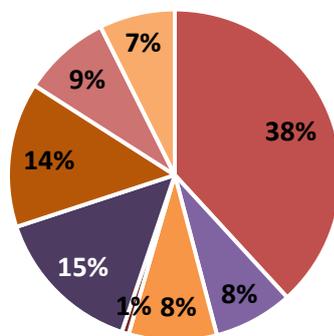


2020: 58,6 TWh

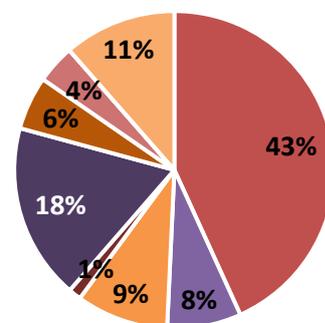
- Strom
- Fernwärme
- Biomasse
- Solarthermie
- Umweltwärme
- Erdgas
- Mineralöl
- Kohlen
- Wasserstoff



2030: 49,4 TWh



2040: 40,8 TWh



2045: 38,1 TWh

Bild 13: Endenergieverbrauch Thüringens nach Sektoren (oben) und Energieträgern (unten) für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2045 im **Basisszenario**. Abweichungen zur Thüringer Energiebilanz 2020 resultieren aus dem Bezugsjahr 2019 für den Verkehrsbereich.

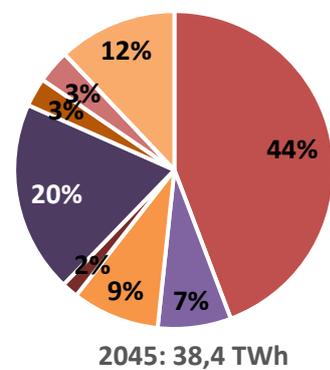
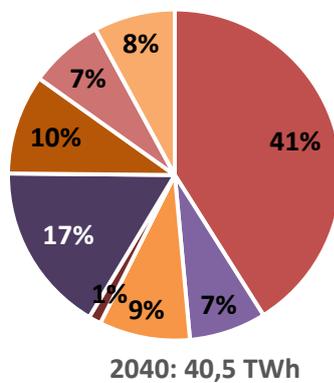
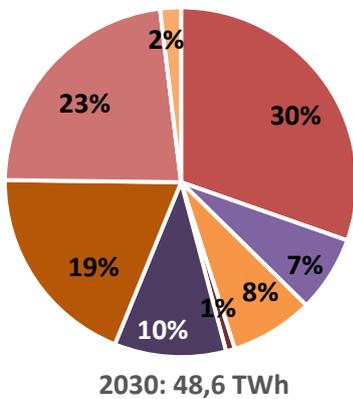
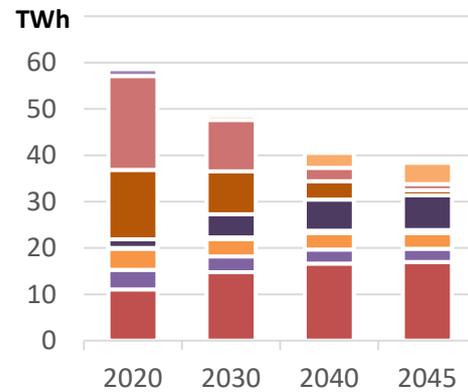
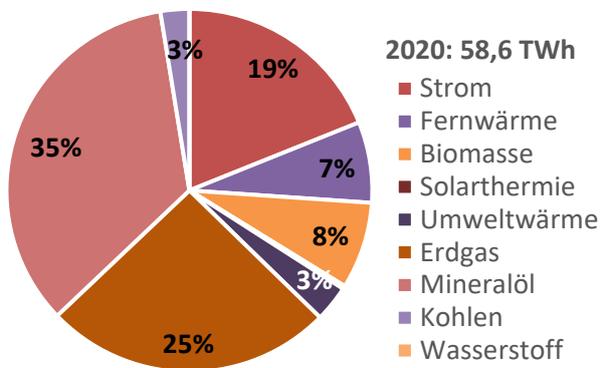
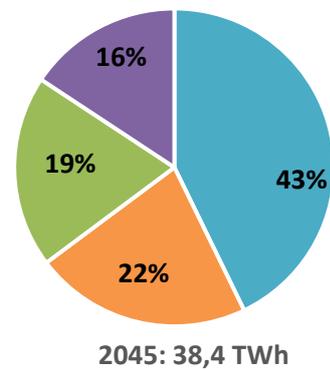
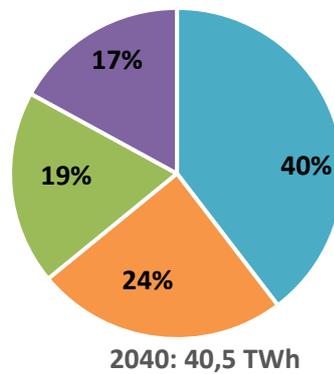
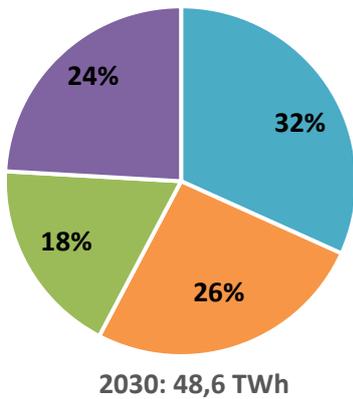
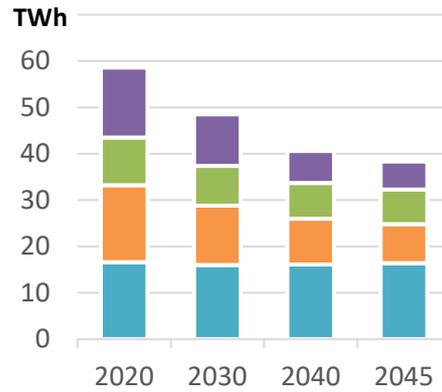
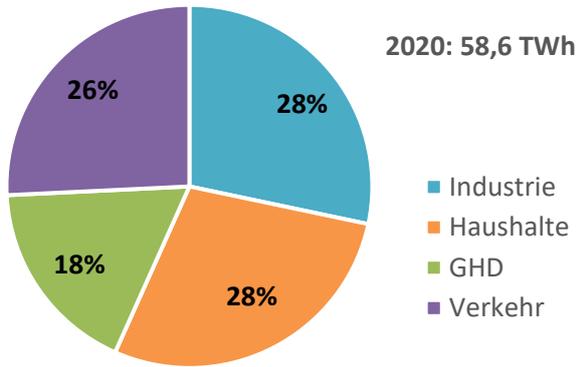


Bild 14: Endenergieverbrauch Thüringens nach Sektoren (oben) und Energieträgern (unten) für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2045 im **Innovativen Szenario**. Abweichungen zur Thüringer Energiebilanz 2020 resultieren aus dem Bezugsjahr 2019 für den Verkehrsbereich.

## Literatur

- [1] Leipziger Institut für Energie (IE), „Gutachten zur Vorbereitung einer Energie- und Klimaschutzstrategie für Thüringen,“ Leipzig, 2016.
- [2] in.RET (Hg.), „So geht's - wie Thüringen klimaneutral wird,“ Nordhausen, 2021.
- [3] Thüringer Landesamt für Statistik (Hg.), „Thüringer Energiebilanz mit Satellitenbilanz "Erneuerbare Energieträger",“ Erfurt, o.J..
- [4] AG Energiebilanzen, „Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2017,“ Berlin, 2018.
- [5] Fraunhofer ISI (Hg.), „Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für Sektoren Industrie und GHD,“ Karlsruhe, 2021.
- [6] RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung (Hg.), „Erstellung der Anwendungsbilanzen 2020 für den Sektor der Privaten Haushalte und den Verkehrssektor in Deutschland,“ Essen, 2021.
- [7] Deutsche Energieagentur (Hg.), dena-Leitstudie Integrierte Energiewende, Berlin, 2018.
- [8] Fraunhofer ISE (Hg.), „Planungsleitfaden Solar Kühlung V1.2,“ Freiburg, 2013.
- [9] Die Bundesregierung (Hg.), „Das Energiekonzept 2050,“ Berlin, 2010.
- [10] T. Kenkmann, I. Stieß, C. Winger, B. Birzle-Harder und G. Sunderer, „Entwicklung des Energiebedarfs für die Wohngebäudeklimatisierung in Deutschland 2030/2050,“ in *11. Internationale Energiewirtschaftstagung*, Wien, 2019.
- [11] Thüringer Landesamt für Statistik, „Thüringen 2040,“ [Online]. Available: [https://www.statistik.thueringen.de/th\\_2040/](https://www.statistik.thueringen.de/th_2040/). [Zugriff am 23 03 2022].
- [12] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), „Wohnungsmarktprognose 2030,“ Juli 2015. [Online]. Available: [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2015/DL\\_07\\_2015.pdf](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2015/DL_07_2015.pdf). [Zugriff am 7 Dezember 2021].
- [13] A. H. Hermelink, S. Lindner, S. Schimschar, B. von Manteuffel, „Potenzial nutzen, Effizienz schaffen; der Gebäudereport Thüringen,“ 8 April 2012. [Online]. Available: [https://www.db-thueringen.de/receive/dbt\\_mods\\_00021953](https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00021953). [Zugriff am 15 März 2022].
- [14] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, „Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann (Langfassung),“ Juni 2021. [Online]. Available: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045-langfassung/>. [Zugriff am 26 Januar 2022].
- [15] C. Nelles, „Glasindustrie 2021 - Herausforderungen für die Unternehmen der Glasindustrie,“ in *13. Niedersächsische Energietag 2021*, Hannover, 2021.
- [16] Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, „dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität - Datenanhang Parameter,“ 25 03 2022. [Online]. Available: [https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2022/03/220325\\_EWI\\_Datenanhang\\_Ergebnisse\\_dena-Leitstudie\\_Aufbruch-Klimaneutralitaet.xlsx](https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2022/03/220325_EWI_Datenanhang_Ergebnisse_dena-Leitstudie_Aufbruch-Klimaneutralitaet.xlsx).

- [17] Deutsche Energieagentur (Hg.), „dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität,“ Berlin, 2021.
- [18] Die Papierindustrie, „Reset in der Energiepolitik,“ 2022. [Online]. Available: [www.papierindustrie.de](http://www.papierindustrie.de).
- [19] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (hg.), „Verkehr in Zahlen 2021/2022,“ Flensburg, 2021.
- [20] H. Henning und A. Palzer, „Energiesystem Deutschland 2050,“ Freiburg, 2013.
- [21] Umweltbundesamt (Hg.), „Energieverbrauch und Kraftstoffe,“ 27 April 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs>.
- [22] Umweltbundesamt (Hg.), „Texte 156/2020 - Ökologische Bewertung von Verkehrsarten,“ Dessau, 2020.
- [23] Fraunhofer ISE (Hg.), „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen – Update Klimaneutralität 2045,“ Freiburg, 2021.

#### Herausgeber

Institut für Regenerative Energietechnik  
Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak  
Hochschule Nordhausen  
Weinberghof 4, 99734 Nordhausen  
[viktor.wesselak@hs-nordhausen.de](mailto:viktor.wesselak@hs-nordhausen.de)

#### Mitwirkende

R. Bala Krishnan | H. Hauer-Berghuis | L. Hofmann  
A. Lubojanski | S. Neldner | A. Oberdorfer  
T. Reinhardt | C. Rothe | C. Schmidt | V. Wesselak

Stand: Oktober 2023