



**Universität Stuttgart**

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle  
Energieanwendung (IER)

# BERECHNUNGSMODELL ZUR QUANTIFIZIERUNG DES STROM- VERBRAUCHS VON ELEKTROMOTOREN- SYSTEMEN

Am Beispiel der Druckluft

Ulf Lindner, Peter Radgen

# Relevanz und Problemstellung

## Stromverbrauch der Druckluft bietet Einsparpotentiale

Stromverbrauch Industrie Deutschland:  
228 TWh (Rohde 2019)

68 % Elektromotoren (Sauer und Bauernhansl 2016, S. 127)  
→ 155, 04 TWh

15,4 TWh \*  
Druckluft  
→ 9,9% / 6,7%



• Einsparpotentiale Strom 12,7 % (Fleiter 2013)



• Stromverbrauch Industrie Deutschland um 2 TWh gestiegen (Rohde 2019)



• Stromverbrauch Industrie Österreich um 1,4 TWh gestiegen (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2018, 2019)



• Strombedarf der Druckluft zwischen 2001 und 2019 um 0,3 % gesunken (Radgen 2001, Rohde 2019)

\*(Rohde 2019)

## Relevanz und Problemstellung

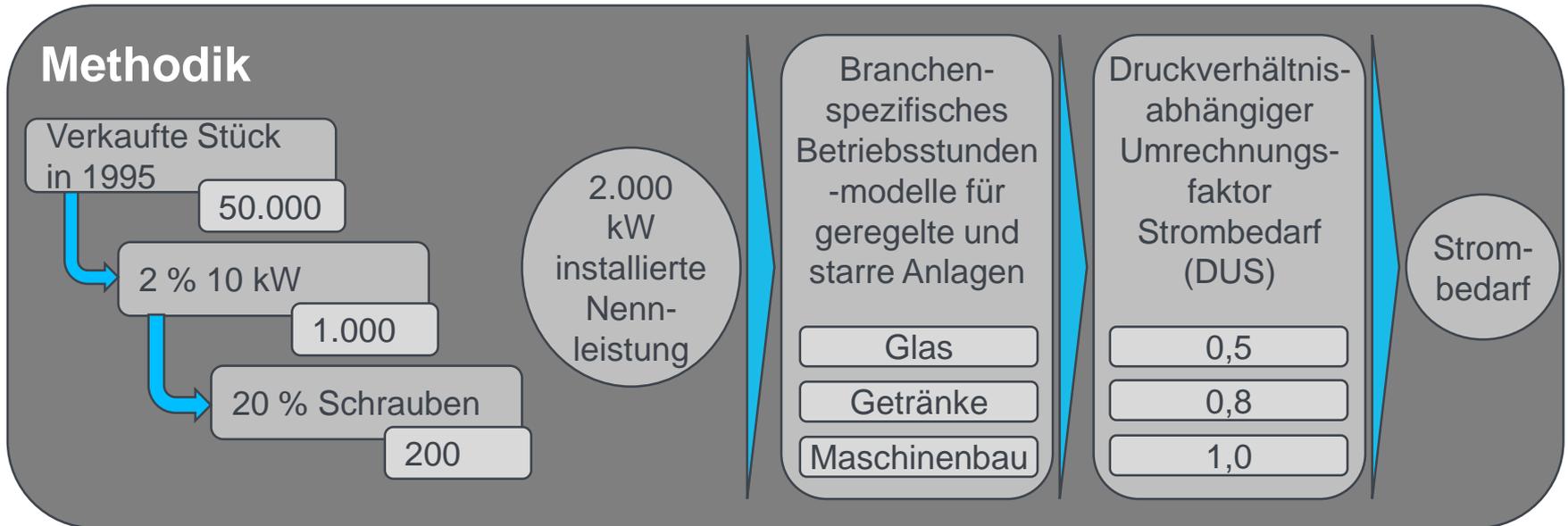
Bisherige Angaben zu Stromverbräuchen der Druckluft schwer nachvollziehbar

- Unger & Radgen (2017) diskutieren die Qualität bisheriger Untersuchungen zum Stromverbrauch der Druckluft auf der ganzen Welt
  - Unterschiedliche Ergebnisse für das gleiche Betrachtungssystem
  - Momentaufnahmen einzelner Jahre
  - Basieren auf Schätzungen, Expertenbefragungen oder lassen die Berechnung völlig offen
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen – AGEB weisen kontinuierliche Energieverbräuche für Prozess- und Querschnittstechnologien aus (Rohde 2019)

# Methodik

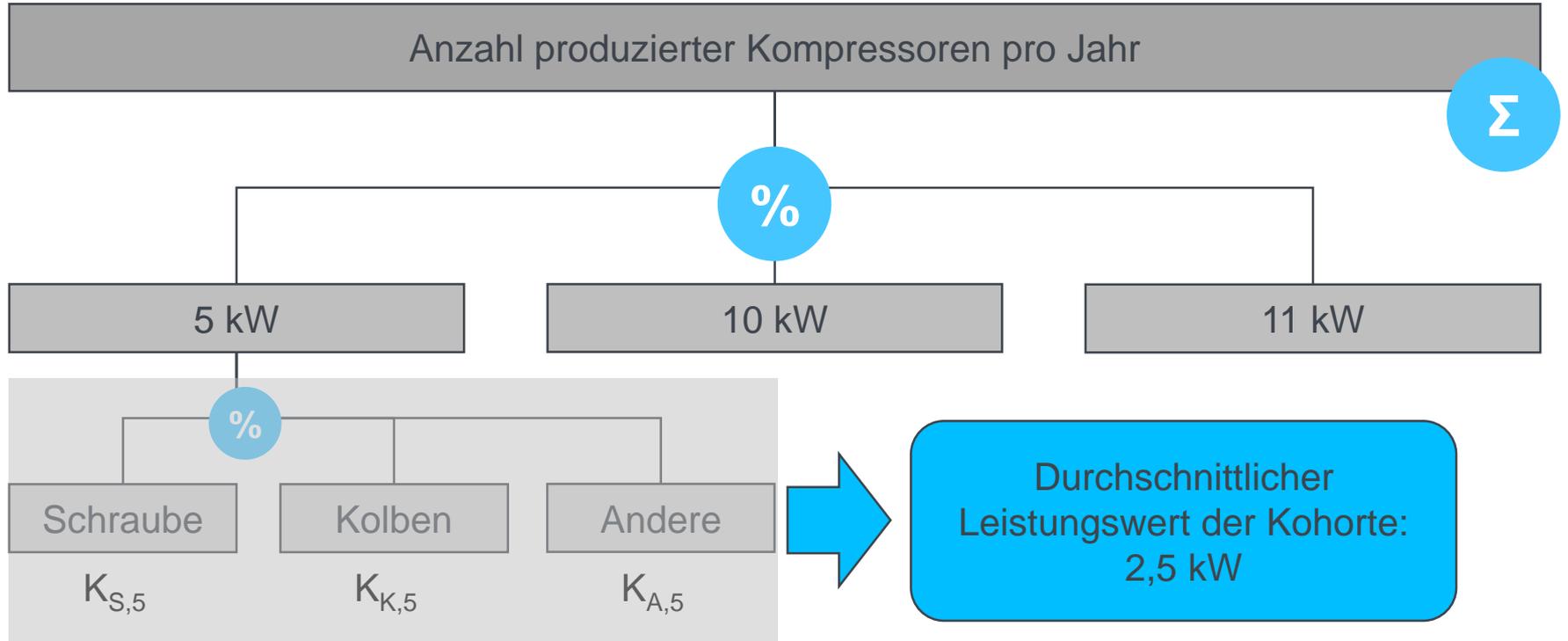
Berechnungsmethodik unterteilt die Kompressoren in Kohorten

- Betrachtung in Kohorten erlaubt eine Berücksichtigung branchenspezifischer Lastprofile, Betriebsstundenmodelle und Druckniveaus
- Untersuchung von Effizienzpotentialen möglich



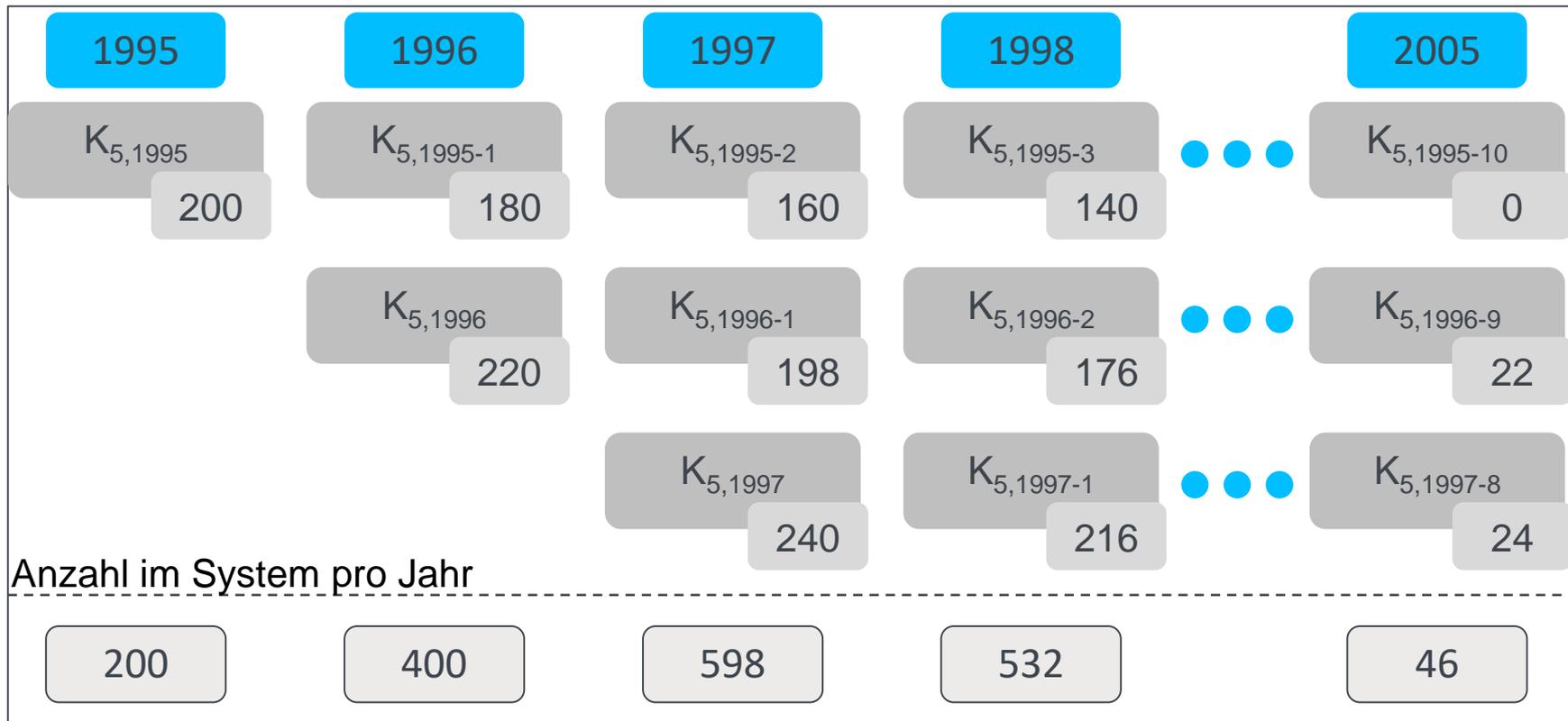
# Methodik – Kohortenbildung

Produktionszahlen nach PRODCOM als jährliche Bezugsgröße



## Methodik – Austrittsfunktion

Rechenbeispiel für eine Austrittsrate von 10 % vom Anfangsjahr pro Jahr



## Methodik – Betriebsstundenmodell

Die Betriebsstundenmodelle werden zunächst in Laststufen unterteilt

Betriebsstundenmodell drehzahlstarr		
Lastbereich	Anteil Stunden	Stunden absolut
Aus	26,50 %	2.322
Leerlauf	5,00 %	438
Lastlauf	68,50 %	6.000

Quelle: eigene Erhebung

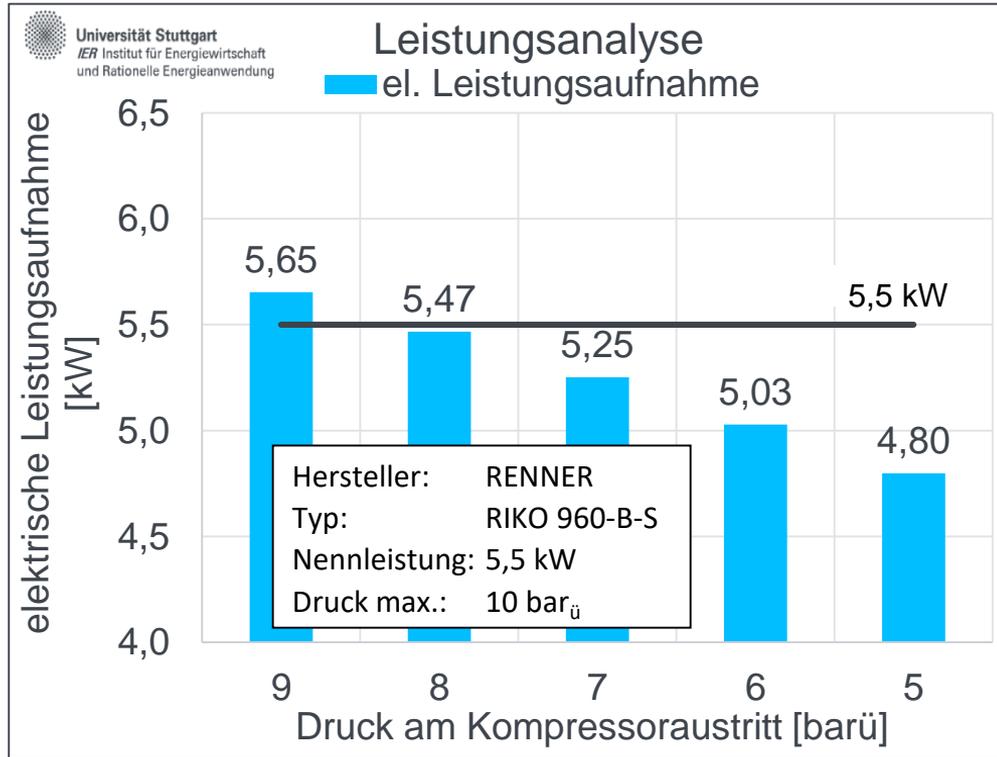
- Drehzahlstarr mit 3 Betriebspunkten
- Drehzahlvariabel mit quasi beliebig vielen Laststufen
- Jede Laststufe mit druck- und lastabhängigen Leistungsfaktoren

Betriebsstundenmodell drehzahl geregelt		
Lastbereich in %	Anteil Stunden	Stunden absolut
0	39,62 %	3470,9
15-34	2,81 %	246,4
35-44	4,51 %	395,4
45-54	5,61 %	491,8
55-59	11,89 %	1041,2
60-64	10,08 %	883,4
65-69	6,89 %	603,8
70-74	5,42 %	474,7
75-79	3,58 %	313,8
80-84	2,74 %	240,2
85-89	3,91 %	342,6
90-99	2,92 %	255,9

Quelle: eigene Messung

# Methodik – Druckabhängiger Leistungsfaktor Strom

Stellt den Zusammenhang zwischen Nennleistung und Stromaufnahme dar



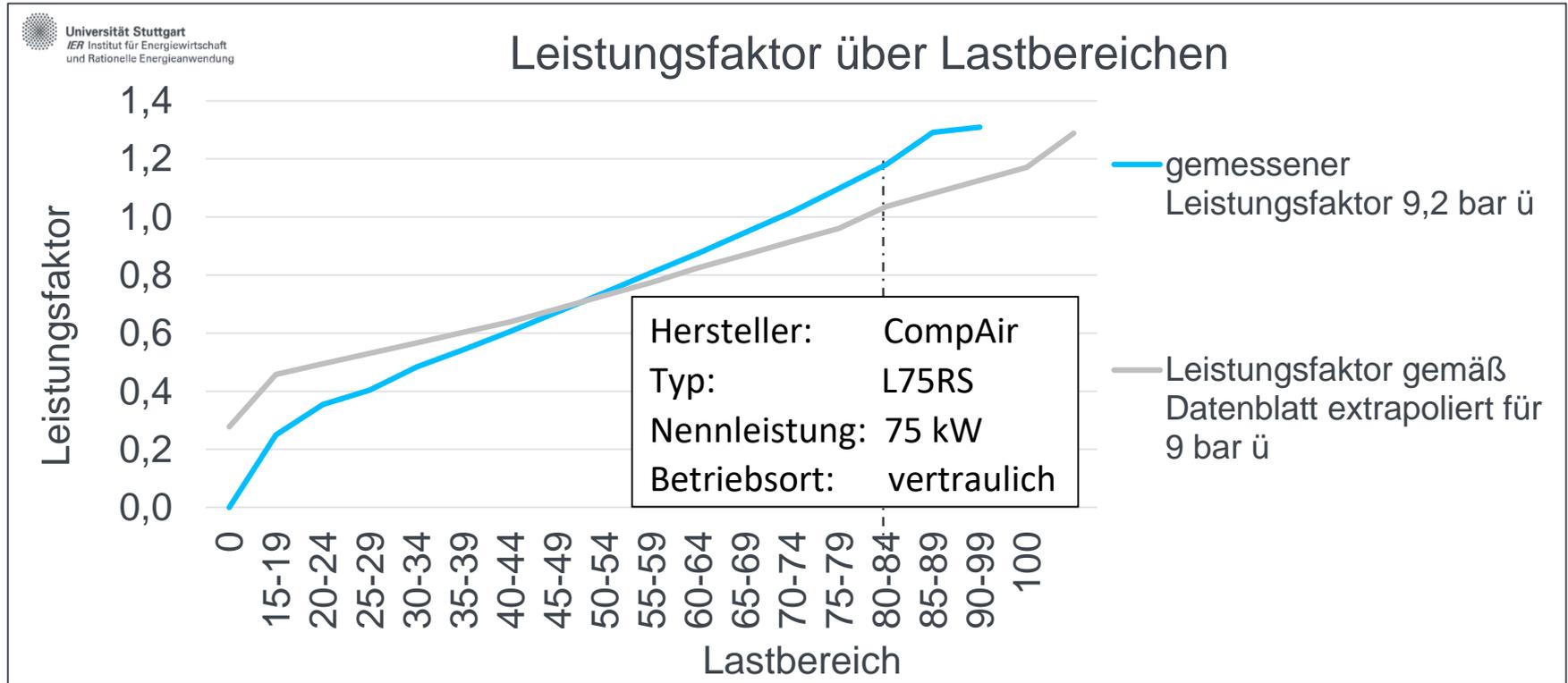
Quelle: eigene Messung

Mittelwert Druck [bar <sub>ü</sub> ]	Leistungs-faktor	Druck-verhältnis mittlerer Betriebsdruck /max. Druck
8,99	1,03	0,90
8,01	0,99	0,80
7,03	0,95	0,70
6,03	0,91	0,60
5,03	0,87	0,50

Quelle: eigene Messung

# Methodik – Druckabhängiger Leistungsfaktor Strom

Leistungsfaktor für drehzahlgeregelte Anlagen steigt über alle Bereiche linear



Quelle: eigene Messung

## Methodik – Betriebsstunden und Leistungsfaktor

Ein Jahresleistungsfaktor rechnet die Nennleistung in den Stromverbrauch um

### Annahme eines Betriebsstundenmodells drehzahlstarrer Kompressoren

Lastbereich	Anteil Stunden	Stunden absolut	Leistungsfaktor	Gewichtete Leistung
Aus	97,00 %	8.497,2	0	0
Leerlauf	0,00 %	0	0,2	0
Lastlauf	3,00 %	262,8	1,1	289,08

- Annahme: nur 20 % der Kompressoren dieser Größe werden tatsächlich genutzt

*Jahresleistungsfaktor*

$$\begin{aligned} &= (\text{Anteil Stunden}_{Aus} * \text{Leistungsfaktor}_{Aus} + \text{Anteil Stunden}_{Leer} * \text{Leistungsfaktor}_{Leer} \\ &+ \text{Anteil Stunden}_{Last} * \text{Leistungsfaktor}_{Last}) * 8.760 * \text{Anteil laufender Kompressoren} \\ &= 57,816 \end{aligned}$$

# Methodik – Produktionsstatistiken

## Bedeutung der PRODCOM-Kodierung

- 28132630: Reciprocating displacement compressors having a gauge pressure capacity  $\leq 15$  bar, giving a flow  $\leq 60$  m<sup>3</sup>/hour
- 28132650: Reciprocating displacement compressors having a gauge pressure capacity  $\leq 15$  bar, giving a flow per hour  $> 60$  m<sup>3</sup>),
- 28132670: Reciprocating displacement compressors having a gauge pressure capacity  $> 15$  bar, giving a flow per hour  $\leq 120$  m<sup>3</sup>
- 28132690: Reciprocating displacement compressors having a gauge pressure capacity  $> 15$  bar, giving a flow per hour  $> 120$  m<sup>3</sup>
- 28132730: Rotary displacement compressors, single-shaft
- 28132753: Multi-shaft screw compressors

## Methodik – Produktionsstatistiken

PRODCOM-Daten als Basis für die Bestandsrechnung (Eurostat 2019)

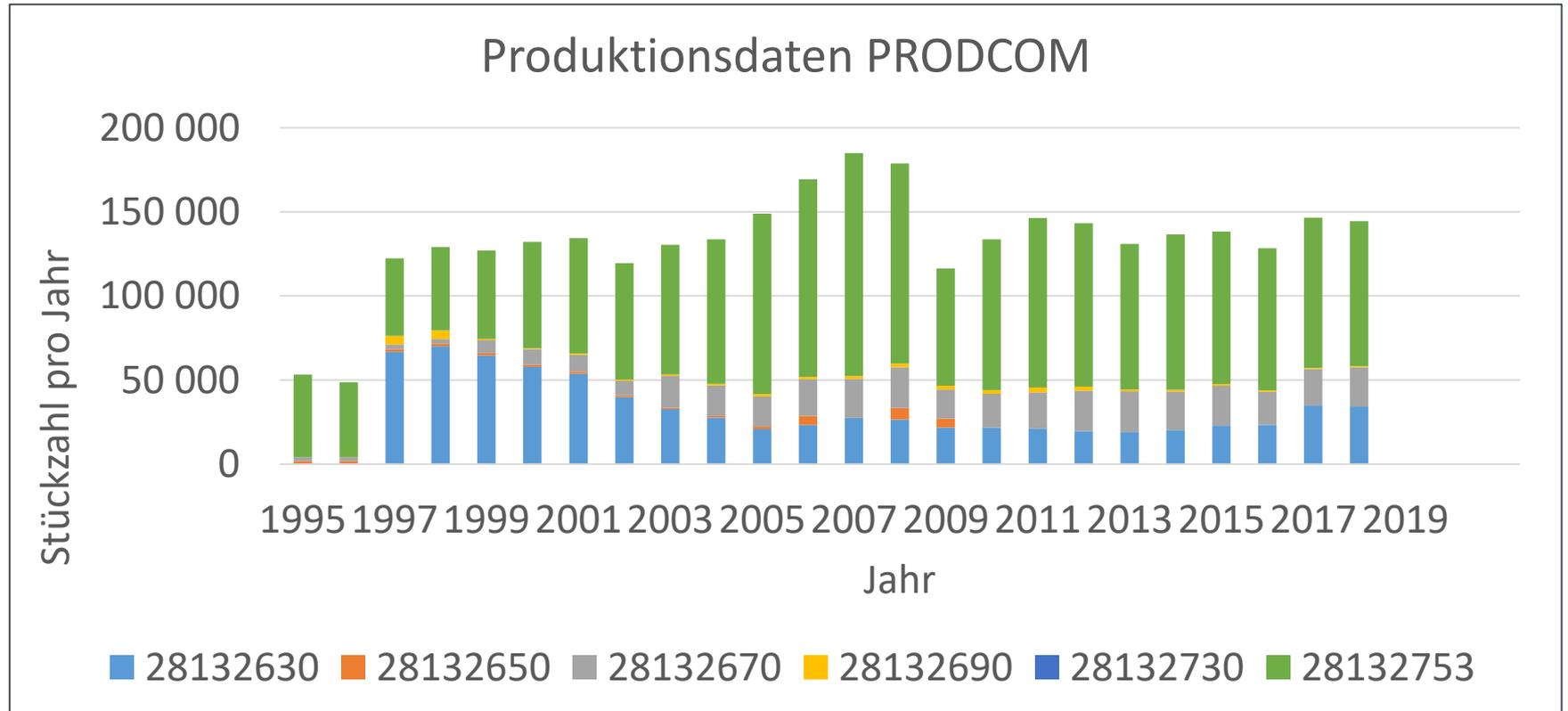
ProdQNT	28132630	28132650	28132670	28132690	28132730	28132753	Summe
1995	0	1.916	2.177	0	0	49.092	<b>53.185</b>
1996	0	1.833	2.247	0	0	44.487	<b>48.567</b>
1997	66.815	1.593	2.673	5.220	0	46.090	<b>122.391</b>
1998	70.040	1.484	2.777	5.159	0	49.561	<b>129.021</b>
1999	64.622	1.257	7.947	657	0	52.550	<b>127.033</b>



ProdQNT	28132630	28132650	28132670	28132690	28132730	28132753	Summe
2014	20.230	0	22.920	1.083	0	92.330	<b>136.563</b>
2015	22.895	0	23.704	986	0	90.607	<b>138.192</b>
2016	23.179	0	19.788	833	0	84.575	<b>128.375</b>
2017	34.734	0	21.717	779	0	89.347	<b>146.577</b>
2018	34.192	0	23.418	655	0	86.246	<b>144.511</b>

# Methodik – Produktionsstatistiken

Entwicklung der einzelnen PRODCOM-Daten über die Jahre



# Methodik – Produktionsstatistiken

PRODCOM-Daten als Basis für die Bestandsrechnung (Eurostat 2019)

ProdQNT	Summe	Kohortenanteil 5 kW	Kohorte
1995	53.185	26,96 %	<b>14.339</b>
1996	48.567	26,96 %	<b>13.094</b>
1997	122.391	26,96 %	<b>32.997</b>
1998	129.021	26,96 %	<b>34.784</b>
1999	127.033	26,96 %	<b>34.248</b>

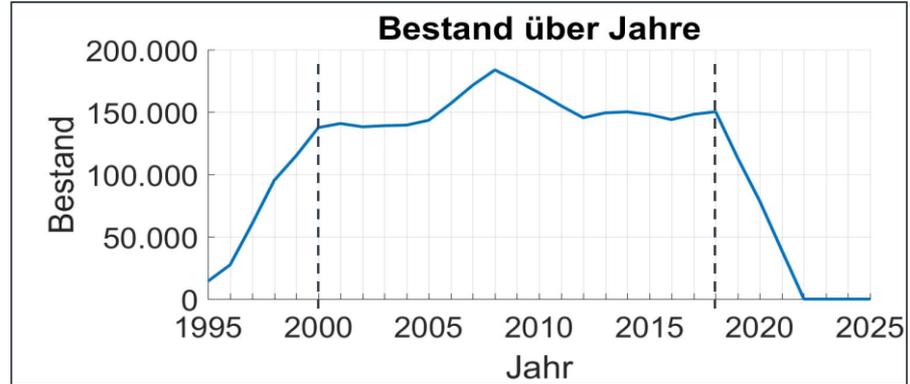


ProdQNT	Summe	Kohortenanteil 5 kW	Kohorte
2014	136.563	26,96 %	<b>36.817</b>
2015	138.192	26,96 %	<b>37.257</b>
2016	128.375	26,96 %	<b>34.610</b>
2017	146.577	26,96 %	<b>39.517</b>
2018	144.511	26,96 %	<b>38.960</b>

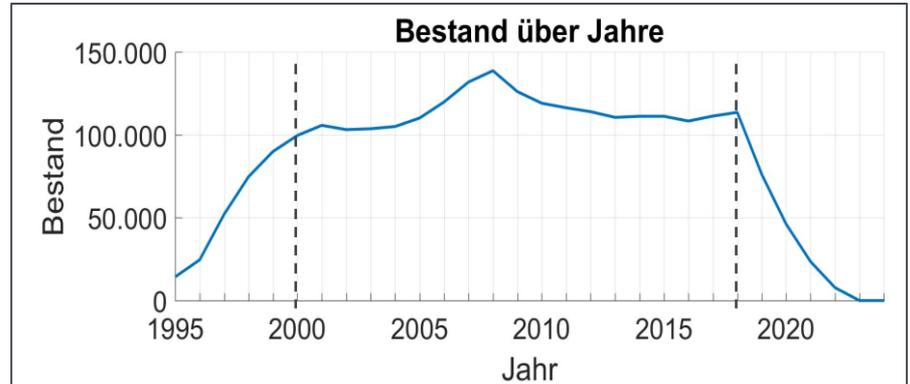
# Beispielrechnung – Bestandsfunktion mit variablen Austrittsfunktionen

Lebensdauer hat erheblichen Einfluss auf den Strombedarf

- 100 % Ausfall im 5. Jahr
- Circa 150.000 Kompressoren



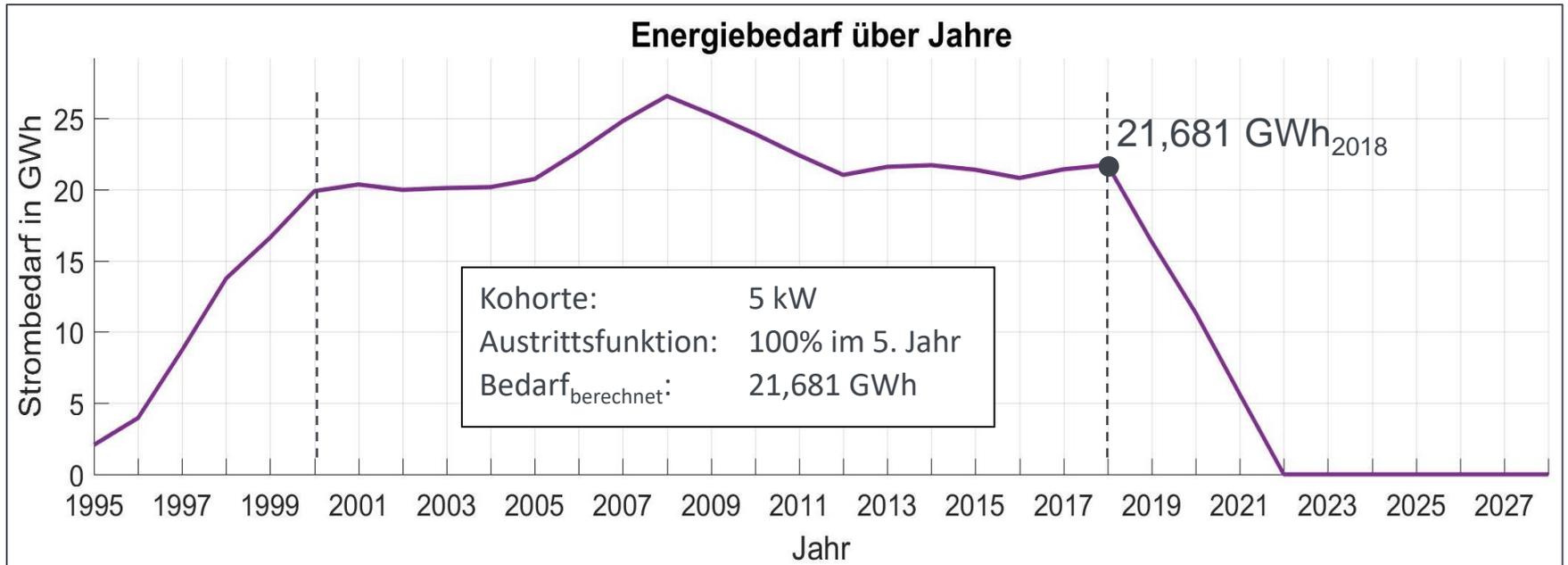
- 20 % vom jeweiligen Anfangsjahr fallen pro Jahr aus
- Circa 76.000 Kompressoren



## Beispielrechnung – Stromverbrauch

Der Stromverbrauch ist über die Jahre aufgezeigt darstellbar

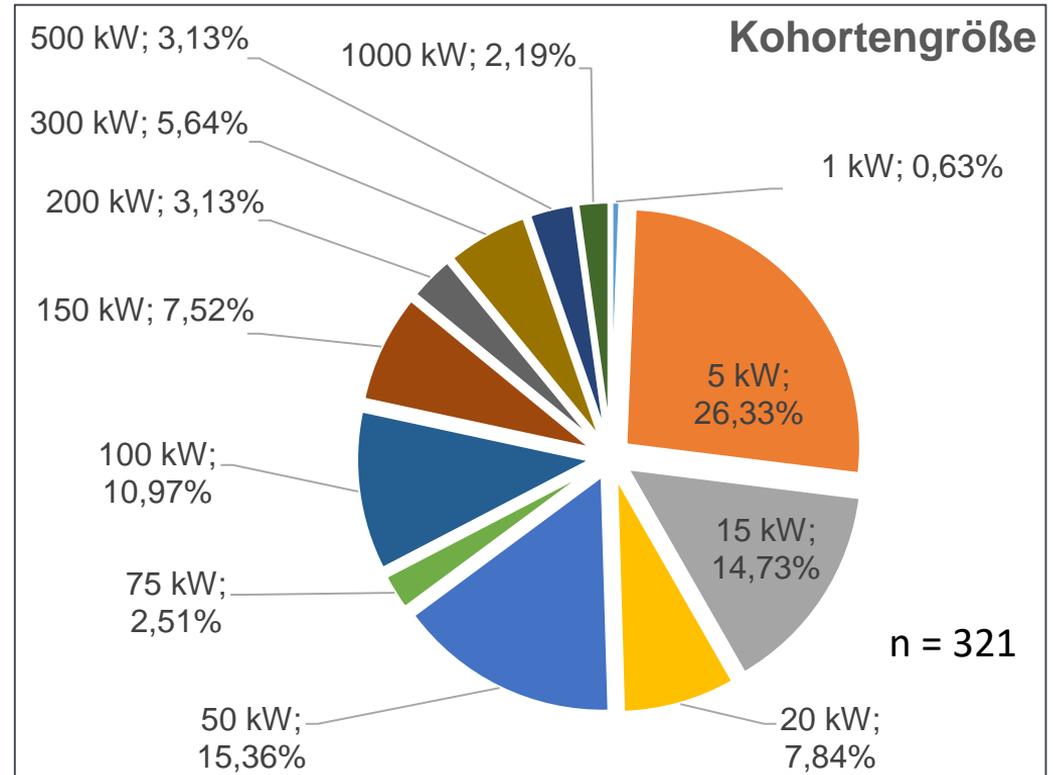
- Abfall der Bedarfskurve durch Austrittsfunktion bedingt – keine Prognose
- Szenarienanalysen für die Zukunft grundsätzlich vorstellbar



# Marktübersicht

Das Verständnis über die Zusammensetzung des Druckluftmarktes ist notwendig

- Anteile Nennleistungsklassen
- Anteile Schrauben, Kolben, Membran
- Alter der Kompressoren im Markt
- Durchschnittliche Laufleistung



Quelle: eigene Erhebung

## Ausblick

Mit Hilfe umfangreicher Datenakquisen wird die Methode stetig verfeinert

- Aufnahme von Lastprofilen zur Erstellung von Betriebsstundenmodellen
  - Messungen zur Bestimmung des Leistungsfaktors
  - Weiterentwicklung der Markterhebung zum besseren Marktverständnis
  - Sensitivitätsanalysen zur Identifikation einflussreicher Parameter
- Effizienzpotentiale darstellen
- Aussagekraft von Szenarienanalysen für die Zukunft überprüfen
  - Methode grundsätzlich für alle Elektromotorensysteme (Ventilatoren, Pumpen, etc.) denkbar
- Die einzelnen Parameter müssen technologiespezifisch erhoben werden



**Universität Stuttgart**

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle  
Energieanwendung (IER)

**Vielen Dank!**



**Ulf Lindner (M.Sc)**

E-Mail [ulf.lindner@ier.uni-stuttgart.de](mailto:ulf.lindner@ier.uni-stuttgart.de)

Telefon +49 (0) 711 685-87885

[www.ier.uni-stuttgart.de/](http://www.ier.uni-stuttgart.de/)

Universität Stuttgart

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)

Heißbrühlstraße 49a, 70565 Stuttgart

# Literatur

- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2018). Energie in Österreich 2018 - Zahlen, Daten, Fakten. Wien. Retrieved from <https://www.bmnt.gv.at/energie-bergbau/energie/Zahlen--Daten--Fakten.html>
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019). Energie in Österreich 2019 – Zahlen, Daten, Fakten. Wien. Retrieved from <https://www.bmnt.gv.at/energie-bergbau/energie/Zahlen--Daten--Fakten.html>
- Eurostat (2019). Sold production, exports and imports by PRODCOM list (NACE Rev. 2) - annual data (DS-066341). Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/data/database/>
- Fleiter, T. (Ed.) (2013). Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale". Stuttgart: Fraunhofer-Verl. Retrieved from <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-234719.html>
- Rohde, C. (2019). *Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2017: Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) - Entwurf*. Karlsruhe. Retrieved from Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) website: [https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=isi\\_-\\_einzebericht\\_industrie\\_2013\\_-\\_2017.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=isi_-_einzebericht_industrie_2013_-_2017.pdf)
- Radgen, P. (Ed.) (2002). Market study for improving energy efficiency for fans. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.
- Sauer, A., & Bauernhansl, T. (Eds.) (2016). Energieeffizienz in Deutschland: Eine Metastudie. Analyse und Empfehlungen (2. Auflage). Berlin: Springer-Verlag.

# Literatur

- Unger, M., & Radgen, P. P. D. Energy Efficiency in Compressed Air Systems: A review of energy efficiency potentials, technological development, energy policy actions and future importance. In Proceedings of the 10th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS' 2017) (pp. 207–233).